

彭丽霞, 孙照渤, 倪东鸿, 等. 2009. 夏季南亚高压年际变化及其与 ENSO 的关系 [J]. 大气科学, 33 (4): 783–795. Peng Lixia, Sun Zhaobo, Ni Donghong, et al. 2009. Interannual variation of summer South Asia high and its association with ENSO [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 783–795.

夏季南亚高压年际变化及其与 ENSO 的关系

彭丽霞 孙照渤 倪东鸿 陈海山 谭桂容

南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室, 南京 210044

摘 要 采用 1948~2006 年 NCEP/NCAR 月平均再分析资料, 探讨了夏季南亚高压年际变化及其与 ENSO 事件的关系, 结果表明: 在 ENSO 事件暖(冷)位相衰减期的夏季, 印度洋和亚洲大陆南侧海温为正(负)异常, 对应热带印度洋地区低层为上升(下沉)气流而其东侧西太平洋和西侧非洲西部为下沉(上升)气流的异常纬向环流, 低层 850 hPa 上从西太平洋到非洲赤道南北两侧依次各存在一异常反气旋-气旋-反气旋(气旋-反气旋-气旋)环流, 高层 200 hPa 异常流场的分布与 850 hPa 基本相反, 使得南亚高压强度发生显著变化, 强度增强(减弱)、面积扩大(缩小)、东西向扩展(收缩)、脊线北侧气压梯度增大(减小)、南侧气压梯度减小(增大)。

关键词 南亚高压 年际变化 ENSO

文章编号 1006-9895 (2009) 04-0783-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

Interannual Variation of Summer South Asia High and Its Association with ENSO

PENG Lixia, SUN Zhaobo, NI Donghong, CHEN Haishan, and TAN Guirong

Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the NCEP/NCAR monthly reanalysis data, this paper studies the interannual change of summer South Asia high (SSAH) and its relationship to ENSO events. Results show: During the summer decaying stage of ENSO warm (cool) phase, the positive (negative) SST anomaly in the Indian Ocean and its adjacent ocean regions to the south of Asia causes the zonal abnormal circulation in the tropical region with upward (downward) motion in the Indian Ocean and subsidence (ascent) in the eastern Pacific and western Africa, accompanied by two anomalous anti-cyclones-cyclones-anticyclones (cyclones-anticyclones-cyclones) on the south and north sides of the equator at the lower level (850 hPa), and anomalous cyclone-anticyclone-cyclone (anticyclone-cyclone-anticyclone) at the upper level (200 hPa) from the western Pacific westward to Africa; the SSAH becomes stronger (weaker) with its area enlarging (reducing), its east and west borders extending outward (retracting inward), and pressure-gradient force enhancing (reducing) on the south side/reducing (enhancing) on the north side of high ridge. Based on the above analysis, it is found that the SST anomaly in the Indian Ocean and its adjacent ocean to the south of Asia plays an important role in the interannual abnormality of SSAH during the summer decaying stage of ENSO.

Key words South Asia high, interannual variation, ENSO

1 引言

夏季南亚高压是对流层中上层横跨非洲北部、亚洲南部的强大、稳定环流系统,是亚洲夏季风的主要成员之一。夏季南亚高压中心主要位于青藏高原和伊朗高原上空,冬季南亚高压向东南撤到热带太平洋上空,它是热带环流与季风环流相互作用的纽带。冬季南亚高压与热带海洋发生强烈的海气相互作用,夏季南亚高压位于青藏高原上空,与南亚大陆发生强烈的陆气相互作用,因此,南亚高压也是海-陆-气相互作用的纽带。无论在天气尺度还是在气候尺度上,南亚高压的异常变化都不仅仅是一个局地现象,它与整个北半球大气环流密切相关,特别是对我国夏季天气、气候有着重要影响(陶诗言等, 1964; 陈桂英等, 1990; 林海等, 2004; Qian et al., 2005)。1990 年代中期以前,由于受到资料时间长度的限制,气象学家主要从天气尺度和个例分析的角度研究南亚高压的结构、性质、活动规律和维持机制。1990 年代中期以后,随着资料增加和资料时间长度增长,南亚高压的气候异常特征及异常机制的研究越来越受到关注。许多学者(陈咸吉等, 1980; 张琼等, 2000; 谭晶等, 2005; 尤卫红等, 2006)已经指出南亚高压脊线、面积、强度、东西界位置、中心位置都存在显著的年际变化特征(3.8 年或 2~5 年),与赤道东太平洋海温、ENSO 事件存在密切关系。陈咸吉等(1980)指出 100 hPa 南亚高压面积、脊线都存在准 3 年振荡周期,与低纬度对流层中上部高度场存在密切联系,即:高压面积增大,脊线位置偏南,低纬度高度场为正距平,同时指出 500 hPa 西太平洋副热带高压面积、脊线变化也存在明显的准 3 年振荡周期,与南亚高压相应指数变化同位相,认为这些与以坎尔岛为代表的太平洋赤道地区海水表面温度的增暖和变冷密切相关。陈桂英等(1990)指出,盛夏南亚高压东西位置异常与前一年 11 月~当年 3 月赤道东太平洋海温正相关最大,若前一年夏秋季发生的厄尔尼诺,则来年盛夏高压脊线偏南。张琼等(2000)指出南亚高压的 3.8 年的主振荡周期与 ENSO 循环周期一致,与超前 0~5 个月的印度洋海温异常相关最好,与超前 4~6 个月的赤道东太平洋海温相关最好。也有学者从印度和太平洋的综合模态来研究海温异常对南亚高压的影响,如李崇银等

(2001)和杨辉等(2005)研究了综合模态对南亚高压的影响:当综合模为正位相时,南亚高压偏弱、位置偏南偏东;综合模为负位相时,南亚高压偏强、位置偏北偏西,并提出了三条影响南亚高压强度的路径。

ENSO 是热带太平洋地区海-气相互作用的年际变化强信号,对全球大气和海洋有着重要的影响,给我国带来了严重的气候灾害,显著影响季风环流和降水的分布(陈文, 2002; Huang et al., 2004; 何溪澄等, 2008; 宗海锋等, 2008),其中 ENSO 的循环不同阶段,我国季风环流和降水异常有着显著不同(陈文, 2002; Huang et al., 2004)。南亚高压作为亚洲季风的重要成员之一,前面的研究主要表明南亚高压存在显著年际变化,且与 ENSO 存在显著相关关系,但考虑 ENSO 事件存在显著的阶段性和持续性,进一步探讨夏季南亚高压与 ENSO 事件的循环演变关系,以及 ENSO 事件对夏季南亚高压影响的主要物理过程,将有助于深入理解我国气候异常特征及其变化原因。

2 资料和方法

资料主要包括:(1) 1948~2006 年 NCEP/NCAR 月平均再分析资料;(2) 1950~2006 年月平均 Niño 3.4 区($5^{\circ}\text{N}\sim 5^{\circ}\text{S}$, $170^{\circ}\text{W}\sim 120^{\circ}\text{W}$)海温序列(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>);(3) 1854~2007 年月平均扩展重建海平面温度资料(ERSST)(Smith et al., 2003)。

诊断方法主要有:(1) Morlet 小波功率谱和小波交叉功率谱分析;(2) 2~5 年带通滤波;(3) 奇异值分解(singular value decomposition, 简称 SVD)。

3 夏季(6~8 月平均)南亚高压面积年际异常与 ENSO 事件的关系

3.1 南亚高压特征指数的定义以及 ENSO 事件

(1) 南亚高压是对流层中上层 300~50 hPa 横跨副热带亚非大陆的庞大环流系统。研究(陈咸吉等, 1980; 张琼等, 2000; Qian et al., 2002; 谭晶等, 2005)指出,南亚高压位置和强度可以较明确地反映南亚高压系统的演变过程和活动规律。本文主要采用南亚高压面积指数及其主中心强度指数来定量表征南亚高压的强度特征;采用高压脊线、主

中心经向位置指数及其纬向位置指数来定量表征南亚高压的位置变化。参考张琼等（2000），定义如下：

- ① 面积指数：200 hPa 高度场上（ $0^{\circ}\sim50^{\circ}\text{N}$ ， $0^{\circ}\sim165^{\circ}\text{E}$ ）区域内位势高度值 ≥12500 gpm 的格点数。
- ② 东（西）伸指数：200 hPa 高度场上 12500 gpm 等值线最东（西）端点所在位置的经度。
- ③ 风场脊线：200 hPa 水平风场上纬向风为零（ $u=0$ ）的连线（简称 u 脊）。
- ④ 高度场脊线：200 hPa 高度场上 $0^{\circ}\sim50^{\circ}\text{N}$ 范围内经向最大值的连线（简称 h 脊）。
- ⑤ 主中心强度：200 hPa 高度场上（ $0^{\circ}\sim50^{\circ}\text{N}$ ， $0^{\circ}\sim160^{\circ}\text{E}$ ）区域内最大位势高度值（在 12500 gpm 等值线范围内）。其对应的经、纬度就是南亚高压主中心的地理位置。

（2）ENSO 反映了赤道中东太平洋地区大尺度的海气相互作用过程。由于判断指标的不同以及标准气候的改变（ENSO 监测小组，1989；王绍武，1999；李晓燕，2000，2005；秦大河，2003），所以

ENSO 事件发生的次数、起止时间、强度、持续时间等存在一定差异。采用 1 月 Niño3.4 区海温时间序列（将 1950~2006 年平均作为气候平均），当其距平绝对值大于 1 个标准差时，就认为发生了 ENSO 事件。与其他研究工作（ENSO 监测小组，1989；王绍武等，1999；李晓燕等，2000，2005；秦大河等，2003）比较可知，本文基本划分出了中等强度及以上的 ENSO 事件，忽略了较弱 ENSO 事件。1 月 Niño3.4 区海温距平大于 1 个标准差的年份有 1958、1966、1969、1973、1983、1987、1992、1998、2003 年，小于 -1 个标准差的年份有 1955、1956、1971、1974、1976、1989、1999、2000 年，它们分别处于 ENSO 事件的暖、冷位相。

3.2 夏季南亚高压面积指数与 ENSO 事件的关系

图 1 给出了南亚高压面积指数距平及其年际分量（由图 3a 知，面积指数存在显著 2~5 年周期，因此用 2~5 年带通滤波序列近似代表其年际分量）和 1 月 Niño3.4 区海温指数距平时间演变。由图 1a 可知，1977 年以前，1 月 Niño3.4 区海温的较冷年有 1955、1956、1971、1972、1974、1976 年，对

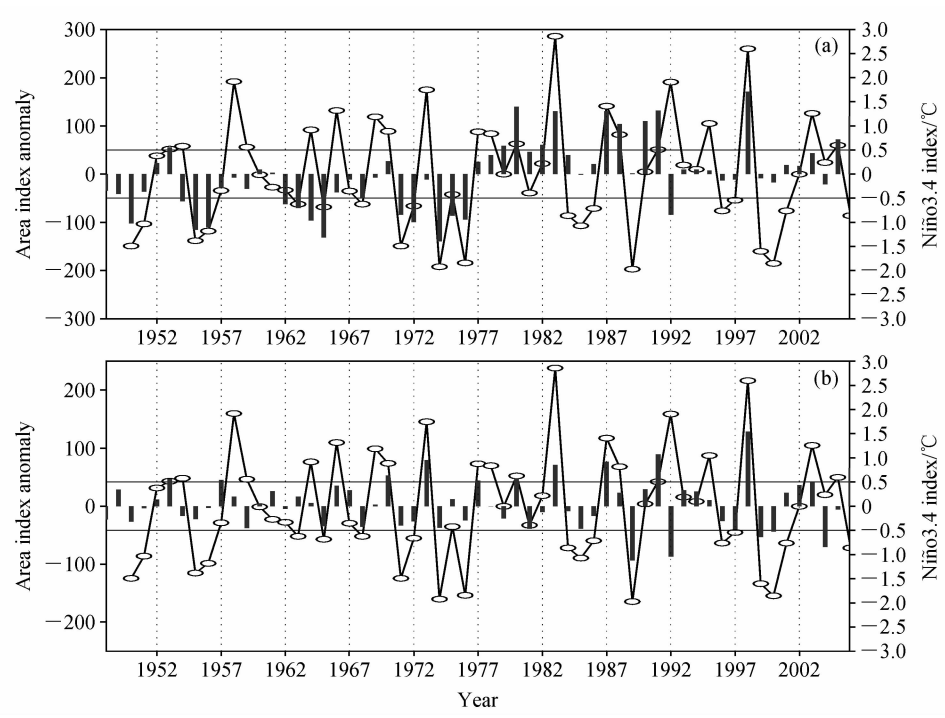


图 1 夏季南亚高压面积指数距平（a，直方柱）及其 2~5 年滤波序列（b，直方柱）和 1 月 Niño3.4 区海温距平（空心圆）。水平直线： $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 海温距平

Fig. 1 (a) Area index anomaly (bars) of summer South Asian high (SSAH) and (b) its 2-5 years band-pass filtered value (bars), and Niño3.4 SST anomaly (hollow circles) in Jan. The horizontal lines denote $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ SST anomalies

应 La Niña 事件 (ENSO 监测小组, 1989; 王绍武等, 1999; 李晓燕等, 2000, 2005; 秦大河等, 2003), 当年夏季南亚高压面积指数为负异常; 但是, 1977 年以前, 当海温偏暖时, 南亚高压面积指数却仍为负异常。1977 年以后, 1 月 Niño3.4 区海温的较暖年有 1977、1983、1987、1988、1998、2003、2005 年, 对应 El Niño 事件 (ENSO 监测小组, 1989; 王绍武, 1999; 李晓燕, 2000, 2005; 秦大河, 2003), 当年夏季南亚高压面积指数为正异常; 但是, 1992 年中等强度的 El Niño 事件却对应夏季南亚高压面积指数负异常。需要指出, 1977 年以后, 当海温偏冷时, 南亚高压面积指数却并非负异常, 如 1989、1999、2000 年基本正常。这里得到了“南亚高压在 1977 年以前主要受 La Niña 事件影响, 1977 年以后主要受 El Niño 事件影响”的结论, 可能是因为南亚高压较强的年代际变化掩盖了南亚高压与 ENSO 的年际变化关系的缘故。

由图 1b 可见, 经 2~5 年带通滤波的南亚高压面积指数与 1 月 Niño3.4 区海温关系密切。滤波后, 1977 年以前, 1 月 Niño3.4 区海温暖异常年有 1958、1964、1966、1969、1970、1973、1977 年, 南亚高压面积在夏季或至少两个月为正异常 (图略); 1977 年以后, 1 月 Niño3.4 区海温冷异常年有 1984、1985、1989、1996、1999 和 2000 年, 南亚高压面积为负异常。滤波前, 6 月、7 月、8 月和夏季南亚高压面积指数与 1 月 Niño3.4 区海温的相关系数分别为 0.49、0.50、0.52 和 0.51; 滤波后, 南亚高压面积指数年际分量与 1 月 Niño3.4 区海温的相关系数分别为 0.52、0.52、0.53 和 0.57。滤波前后两者的相关系数基本一致, 表明两者相关的时间尺度主要是年际的, 因此, 夏季南亚高压面积指数的年际异常与 ENSO 关系密切。

本文仅考虑南亚高压年际变化与 ENSO 的关系, 排除夏季南亚高压面积指数在 1970 年代末发生位相转变的年代际分量的干扰, 把资料分成 1950~1976 年和 1978~2006 年两个时间段, 分别计算在不同时段南亚高压面积指数与不同季节全球海温场的相关分布, 结果表明: 夏季高压面积指数的年际变化与 ENSO 事件的海温变化有密切关系。赤道中东太平洋的显著相关区在前 1 年夏季开始出现, 秋、冬季最强, 显著相关区面积最大; 当年春

季相关开始减弱, 到夏季显著相关区已很小。印度洋的显著相关区在当年冬季开始出现 (相关强度和面积均小于赤道中东太平洋), 春季最强, 同年夏季南亚高压面积指数的年际变化与赤道中东太平洋海温的相关很弱, 相关显著区位于亚洲大陆以南的西太平洋和印度洋。1950~1976 年和 1978~2006 年两时段时滞相关图分布演变情况类似, 图 2 仅列出 1978~2006 年时段的时滞相关图。

利用 1 月 Niño3.4 区海温时间序列与全球海温进行类似图 2 的相关分析 (图略), 或者对 ENSO 冷、暖事件的全球海温距平进行合成 (图略), 所得结果与图 2 一致, 表明图 2 基本反映了 ENSO 事件的发生、发展、成熟和衰退过程。Alexander et al. (2002) 对 ENSO 事件发展过程有类似的描述。

由于小波功率谱分析在时域和频域上都具有良好的局部化特征, 所以下面采用 Morlet 小波功率谱分析和交叉小波分析方法, 分析夏季南亚高压面积指数和 1 月 Niño3.4 区海温的标准化序列的周期特征 (图 3)。由图 3a、b 可知, 南亚高压面积指数和 1 月 Niño3.4 区海温都在 1960 年代中期到 1970 年代中期和 1980 年代以后到 21 世纪初有显著的 2~5 年周期。由图 3b 可见, Niño3.4 区海温 2~5 年的周期, 1965 年至 21 世纪初非常显著, ENSO 事件频发。Niño3.4 区海温变化的主周期在 1965~1975 年为 3.5 年、1980~1995 年为 4 年、1993~2002 年为 3 年和 5 年且 5 年周期振动较弱。图 3a, 1965 年以前, 高压面积指数 2~5 年的周期并不显著, 1965~1975 年和 1980 年~21 世纪初周期非常显著。高压面积指数变化的主周期在 1965~1975 年为 2.9 年、1980~1995 年为 3.5 年、1995~2002 年为 3 年和 4 年。另外, 在 1965 年以前, 1 月 Niño3.4 区海温和高压面积指数还存在显著的 4~7 年周期, 但是由于边界效应的影响, 需要资料的验证。由图 3c 可见, 1 月 Niño3.4 区海温和南亚高压面积指数的 2~5 年周期变化在 1970 年代前后及 1980~2000 年关系显著: 1 月 Niño3.4 区海温偏暖, 则夏季南亚高压面积增大; 1 月 Niño3.4 区海温异常偏冷, 则夏季南亚高压面积减小。南亚高压 2~5 年的周期变化与 ENSO 事件存在着显著的相关关系, 而且 2~5 年带通滤波的南亚高压面积指数方差占未滤波的 35%, 这表明南亚高压年际变化非常重要。

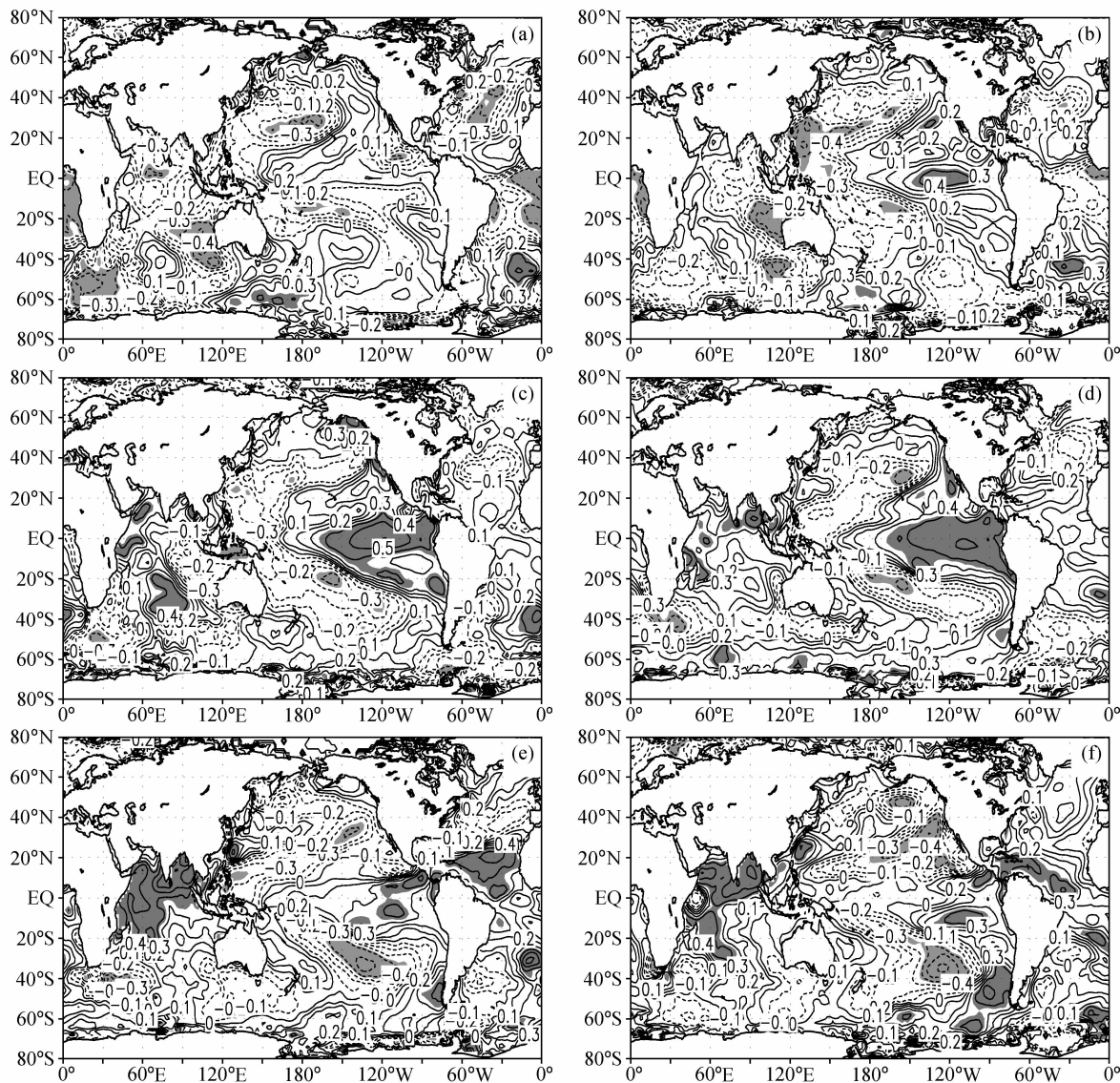


图 2 1978~2006 年时段夏季南亚高压面积指数序列与各季全球海温的相关分布：前一年 (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季；当年 (e) 春季、(f) 夏季。阴影区表示通过 95% 信度检验

Fig. 2 Correlations of SSAH area index and global SST fields in the preceding (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, and (e) spring, (f) summer of the same year during 1978–2006. Shaded areas show the 95% confidence level

4 ENSO 事件衰减期夏季南亚高压的异常特征

南亚高压活动特征明显的表征为位置、强度、范围的显著变化，量化的各活动特征为我们较全面了解南亚高压年际活动特征提供了有利的手段。图 4 表明，在 El Niño 事件衰减期的夏季，南亚高压增强，中心强度增加，面积扩大，东西方向扩展，高压脊线和中心位置变化不明显，中心强度增加 20 gpm，12500 gpm 等值线东端东伸约 5°(经度)，

西端西伸约 2°(经度)，脊线以北等高线较密集，经向气压梯度增大，脊线以南经向气压梯度减小。由 El Niño 事件衰减期夏季位势高度合成场与其气候平均的差值分布(图略)可知，正异常主要位于 30°N~30°S，最大值在赤道附近并向南北递减，30°N 以北主要为负异常，30°N 以南主要为正异常。在 La Niña 事件衰减期的夏季，南亚高压减弱，中心强度减小，面积缩小，东西方向收缩，高压脊线和中心位置变化不明显，中心强度减少 15 gpm，12500 gpm 等值线东端西缩约 15°(经度)，

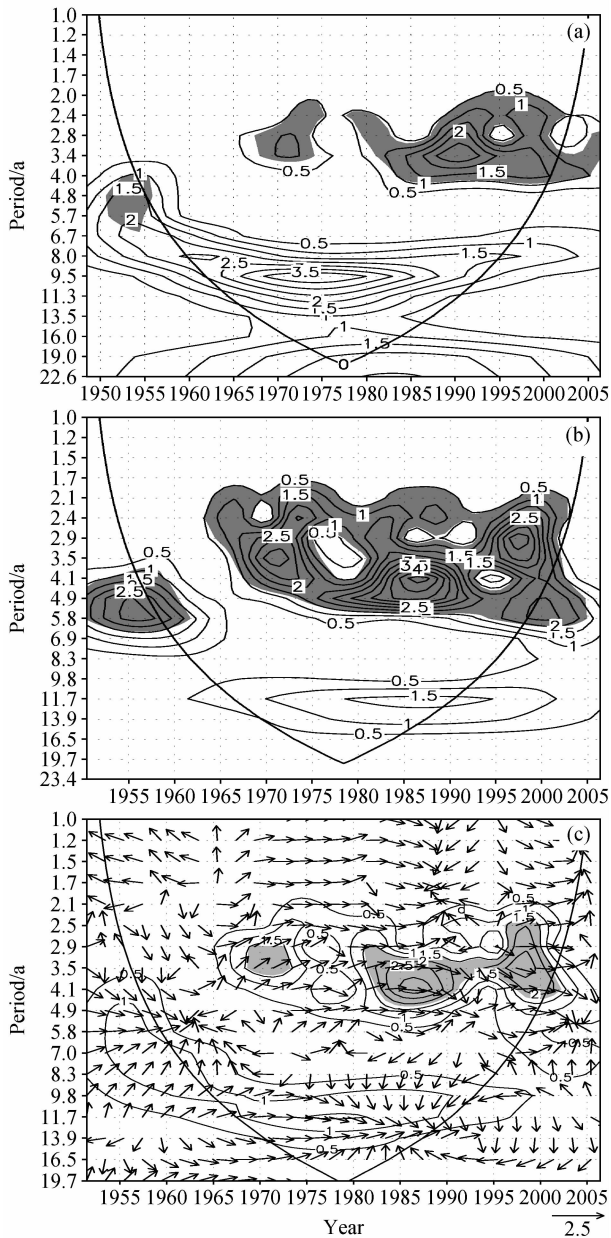


图3 夏季南亚高压面积指数 (a) 和 1 月 Niño3.4 区 SST (b) 的小波功率谱分析以及两者交叉小波功率谱分析 (c)。阴影: 通过 95% 红噪音信度检验; 细弧线以下区域为小波头部影响区; (c) 箭头表示两者位相差, 向右 (左) 表示同 (反) 位相, 向下 (上) 表示南亚高压超前 (落后) Niño3.4 海温 90° 位相

Fig. 3 Morlet wavelet power spectrum analysis of (a) SSAH area index and (b) Niño3.4 SST in Jan, and (c) their cross wavelet analysis. Shadings denote 95% confidence level; lower regions of pitch arc is the cone of influence; in (c), arrow denotes the relative phase relationship with in-phase (anti-phase) pointing right (left), and South Asian high leading (lagging) Niño3.4 SST by 90° pointing straight down (up)

西端东缩约 5° (经度), 脊线以北经向梯度减小, 脊线以南经向气压梯度增大。相应合成高度场与气候

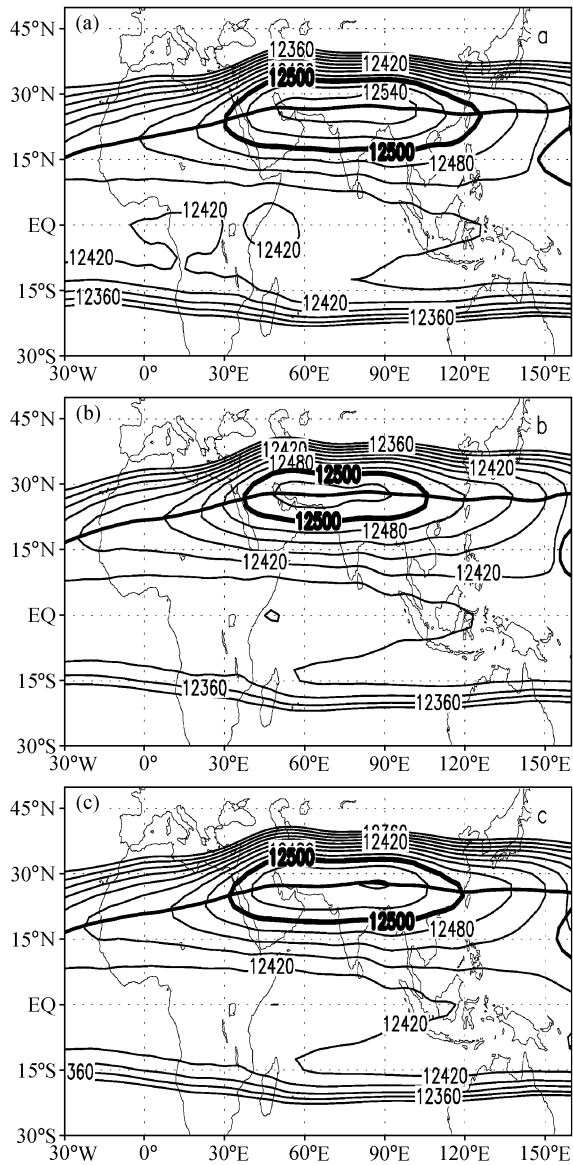


图4 ENSO (a) 暖位相、(b) 冷位相时以及 (c) 气候平均的夏季 200 hPa 高度场 (单位: gpm) 和风场脊线 ($u=0$) 合成分布

Fig. 4 Composites of summer 200-hPa height (gpm) fields in the (a) warm and (b) cold phases of ENSO, and (c) climate averaged summer 200-hPa height (gpm) field, and the ridge lines with $u=0$

平均场的差值分布 (图略) 表明, 负异常主要位于 40°N~40°S, 负异常在赤道最强并向南北递减; 赤道东太平洋的南北两侧也有较强负异常, 中心强度为 -28 gpm。

在 ENSO 事件衰减期的夏季, 由 ENSO 暖位相与冷位相的 200 hPa 位势高度场差值分布图 (图 5a) 可明显地看到, 高度场异常主要位于南亚高压风场脊线 ($u=0$) 以南地区, 且南亚高压强度异常

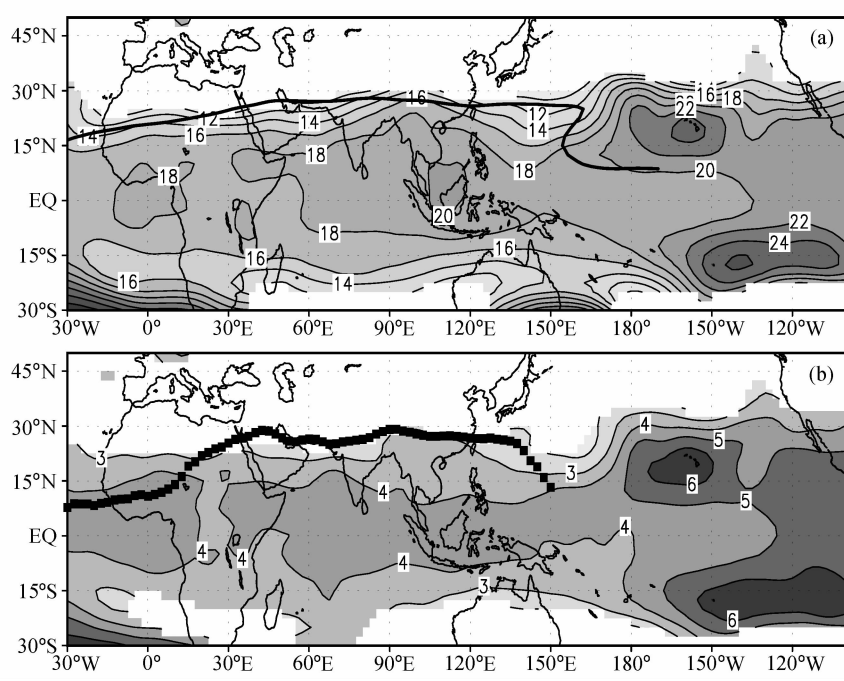


图 5 ENSO 暖位相-冷位相 (a) 200 hPa 高度场距平合成场差值分布 (单位: gpm, 粗线为气候平均风场脊线 $u=0$) 和 (b) 500~200 hPa 平均温度场距平差值分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$, 方块线为气候平均温度脊线)。阴影: 通过 0.05 显著性水平检验

Fig. 5 (a) Differences of 200-hPa height anomaly fields (units: gpm, thick line denotes climatically average ridge for $u=0$), and (b) 200~500 hPa averaged temperature anomaly (units: $^{\circ}\text{C}$, square lines denote climatically average temperature ridge) between the warm and cold events (warm-cold). Shaded areas denote the difference exceeding 95% confidence level

在赤道附近最大并向南北方向递减。此外, La Niña 事件对应的高度场负异常强度要大于 El Niño 事件对应的高度场正异常强度 (图略)。

表 1 列出了南亚高压主中心强度、主中心经度、主中心纬度、东伸指数、西伸指数、面积指数、 $0^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 平均风场脊线 ($u=0$) 位置、 120°E 风场脊线 ($u=0$) 位置以及 $0^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 平均高度场脊线位置在 1950~2006、1950~1976、1978~2006 年与 1 月 Niño3.4 区海温指数序列的相关系数。需要说明的是: (1) 120°E 风场脊线位置与中国长江中下游降水关系密切; (2) 南亚高压在 1970 年代末发生了一次显著的年代际变化, 因此对 1950~1976 年和 1978~2006 年两个时段分别求相关。由表 1 可知: 这些指数可以分为两类, 一类是强度类指数, 包括高压中心强度、面积指数、东伸指数和西伸指数; 一类是位置类指数, 包括高度场中心位置、风场脊线位置、高度 (h) 脊位置。强度类指数与 ENSO 事件密切相关, 位置类指数与 ENSO 的关系不密切。高压中心强度、高压面积、高压东界与 Niño3.4 区海温的相关为正, 高压西界与 Niño3.4 区海温的相关为负, 表明在 El Niño 衰减

期的夏季, 南亚高压强度增加、面积扩大、东西扩展; La Niña 衰减期夏季则反之。高压中心纬度只在 6 月与 ENSO 相关显著, 暖位相衰减期 6 月高压脊线偏南, 冷位相衰减期 6 月高压脊线偏北; 7 月、8 月高压位置与 ENSO 关系没有通过 95% 信度检验。

5 ENSO 事件影响南亚高压的可能途径

下面进一步分析在 ENSO 事件衰减期夏季相应环流和海温异常变化, 探讨 ENSO 事件影响南亚高压年际变化的物理过程。据 3.1 节给出的 ENSO 事件的冷、暖位相年, 给出 200~500 hPa 温度场 (图 5b), 以及高 (200 hPa)、低 (850 hPa) 空异常环流场 (图 6) 的冷暖位相合成差值分布图。

吴国雄等 (1999) 和刘屹岷等 (1999) 从全涡度方程出发并指出, 南亚高压的形成既与季风降水的潜热释放有关, 也与青藏高原的感热加热有关, 两者均起着增强南亚高压的作用。刘宣飞等 (1999) 和 Qian et al. (2002) 证明南亚高压具有趋热性, 夏季南亚高压主要由热力斜压机制维持。因此, 对流层中高层温度场异常与南亚高压异常有着

表 1 不同时段夏季南亚高压指数与 1 月 Niño3.4 区海温的相关系数
Table 1 Correlation coefficients between Niño3.4 SST in Jan and SSAH indices during different periods

指数	6 月			7 月		
	1950~2006 年	1950~1976 年	1978~2006 年	1950~2006 年	1950~1976 年	1978~2006 年
主中心强度	0.442	0.625	0.358	0.379	0.570	0.229
主中心经度	0.027	-0.196	0.179	0.015	-0.027	0.008
主中心纬度	-0.272	-0.213	-0.258	-0.206	0.010	-0.329
东伸指数	0.541	0.583	0.487	0.336	0.425	0.243
西伸指数	-0.256	-0.435	-0.003	-0.494	-0.596	-0.377
面积指数	0.489	0.668	0.437	0.497	0.680	0.380
0°~150°E <i>u</i> 脊	-0.378	-0.171	-0.536	-0.116	0.085	-0.240
120°E <i>u</i> 脊	-0.307	-0.352	-0.275	0.078	0.090	0.117
0°~150°E <i>h</i> 脊	-0.463	-0.406	-0.488	-0.146	0.002	-0.213

指数	8 月			夏季		
	1950~2006 年	1950~1976 年	1978~2006 年	1950~2006 年	1950~1976 年	1978~2006 年
主中心强度	0.524	0.559	0.575	0.468	0.667	0.402
主中心经度	-0.078	-0.074	-0.094	0.096	0.014	0.179
主中心纬度	0.015	0.096	-0.029	-0.158	-0.023	-0.212
东伸指数	0.454	0.516	0.361	0.434	0.504	0.343
西伸指数	-0.540	-0.424	-0.640	-0.441	-0.535	-0.346
面积	0.518	0.456	0.601	0.506	0.638	0.476
0°~150°E <i>u</i> 脊	0.006	0.212	-0.019	-0.271	-0.024	-0.436
120°E <i>u</i> 脊	0.018	0.216	-0.049	-0.121	-0.120	-0.052
0°~150°E <i>h</i> 脊	0.039	0.253	-0.033	-0.263	-0.210	-0.280

注：黑体表示通过 95%信度水平检验。

密切联系。在 ENSO 冷、暖事件衰减期的夏季，对流层中高层（500~200 hPa）温度场异常分布（图 5b）与 200 hPa 高度场异常分布（图 5a）有很好的对应关系。El Niño 年（图略），亚洲南部副热带上空强大的暖中心强度偏强、范围扩大，温度距平场则表明正温度距平在赤道最大，且向南北方向递减，一直延伸到南北纬 30°，阿拉伯海有一显著正距平中心，青藏高原东南端有一较强正距平中心；La Niña 年（图略），南亚地区强大的暖中心强度偏弱、范围缩小，温度距平场则表明负温度距平在赤道最强，且向南北方向递减，一直延伸到南北纬约 40°，负距平中心位于赤道印度洋和赤道非洲地区；冷异常的强度大于暖异常的强度。

图 6 给出 ENSO 冷暖事件高低空环流异常的合成差值分布。由图 6a、b 可知：在 ENSO 暖位相衰减期的夏季，850 hPa 上主要辐合区包括 15°N 以南的印度洋地区，以及 20°N 以北的阿拉伯海东北部地区和青藏高原东南侧到中国长江流域地区，另

外，在热带东太平洋美洲沿岸仍维持有减弱的辐合中心，主要辐散区包括：中心位于赤道 180°的热带、副热带中太平洋地区和分别以（15°N，15°E）、（20°S，30°E）为中心的非洲中北部和非洲南端两地区，对应 200 hPa 上强辐散区位于印度洋、南亚地区，强的辐合区位于热带副热带中太平洋，辐合中心分别位于赤道两侧的（15°N，180°）和（20°S，180°），另外，赤道东太平洋仍维持减弱的辐散中心，赤道非洲也存在非常弱的辐合中心。850 hPa 辐合（辐散）与 200 hPa 上辐散（辐合）有很好的对应，在东半球构成了以印度洋为上升支、其两侧中太平洋和非洲为下沉支的两圈纬向异常环流。

图 6c、d ENSO 冷暖事件风场的有旋分量合成差值图表明，850 hPa 上异常环流系统主要包括 180°左右分别以（15°N，165°W）和（10°S，165°W）为中心的赤道对称的气旋对，180°以西，由赤道以北西太平洋、南海地区的异常反气旋环流和赤道以南印度洋东部、澳大利亚西北部的反气旋环流构成

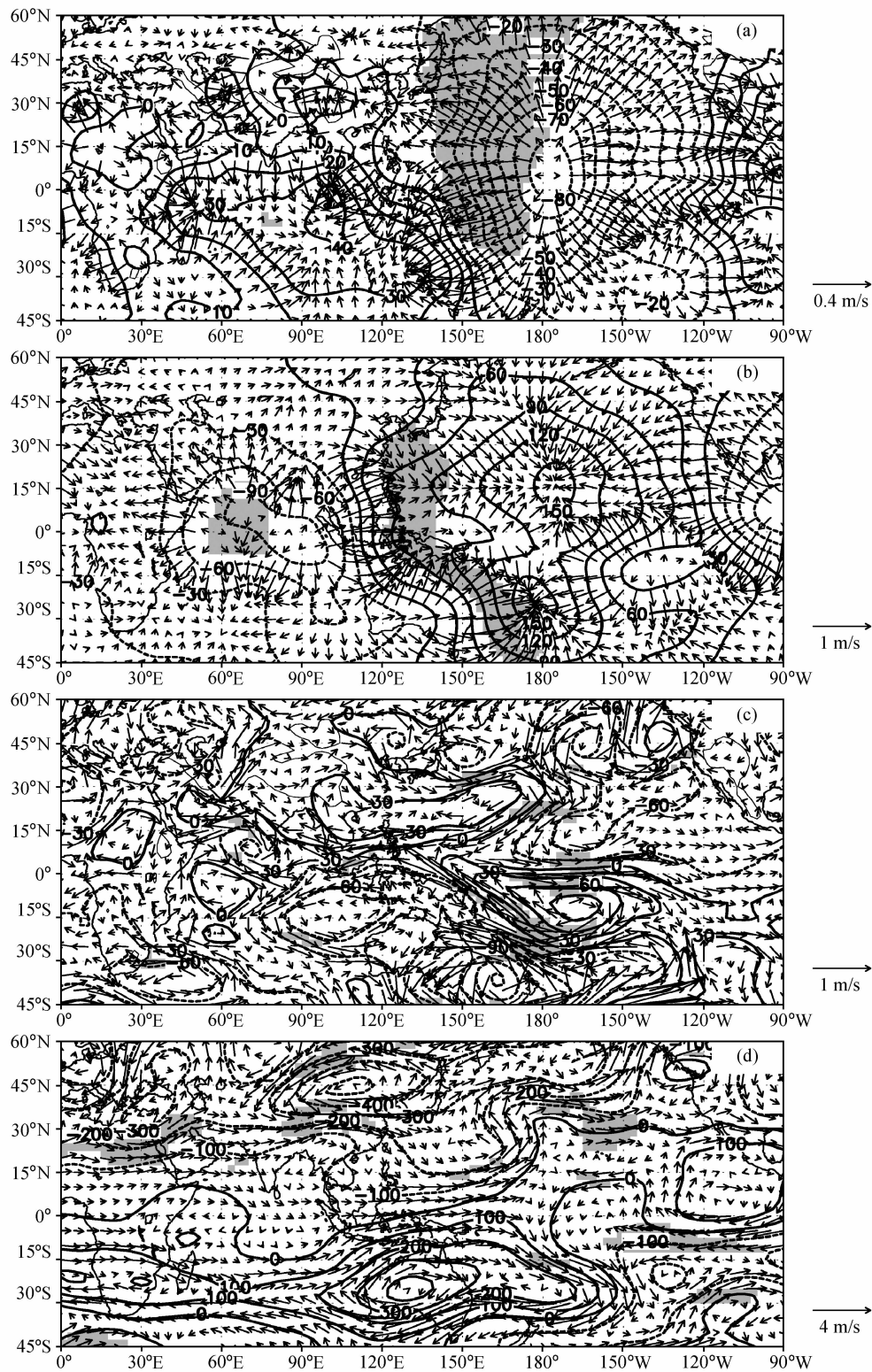


图6 ENSO冷暖事件 (a、c) 850 hPa 和 (b、d) 200 hPa 上环流异常的合成差值分布: (a、b) 速度势 (单位: $10^4 \text{ m}^2/\text{s}$) 和辐散风 (单位: m/s); (c、d) 流函数 (单位: $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$) 和涡旋风 (单位: m/s)。阴影: 通过 95% 的信度检验

Fig. 6 Differences of (a, b) velocity potential ($10^4 \text{ m}^2/\text{s}$), divergent wind (m/s) and (c, d) stream function ($10^6 \text{ m}^2/\text{s}$), non-divergent wind (m/s) between the warm and cold phases of ENSO at (a, c) 850 hPa and (b, d) 200 hPa. Shaded areas denote the difference exceeding 95% confidence level

的较强大的反气旋环流对、中西印度洋地区赤道两侧的气旋环流对以及非洲中西部赤道两侧的弱反气旋环流对; 200 hPa 与此分布情形相反, 南亚上空为异常反气旋环流, 与南亚高压强度增强相对应。另外在 850 hPa 上, 在 $15^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 间, 从日期变更线 (180°) 向西直至印度洋东部为异常偏东气流, 200 hPa 对应为异常偏西气流, 与热带地区印度洋上升、中太平洋下沉的较强异常 Walker 环流相对应。

由高度场、温度场和环流场的异常分布表明, 在 ENSO 事件衰减期的夏季, 印度洋、亚洲南部以及西太平洋上空大气环流的调整对南亚高压的年际异常起着非常重要的作用。大气环流的异常主要受

到大气内部和外强迫两方面的作用, 对于年际变化, 外界强迫必然占主导, 尤其是海洋的影响。

SVD 分析是提取两个气象要素场耦合模态的一种有效方法, 它反映了两要素场在时间和空间上的耦合关系, 因此, 利用 SVD 分析方法可以揭示夏季热带地区海温与 200 hPa 高度场的耦合关系。与前面相关分析处理方法相同, 为消除年代际分量的影响, 将资料分成 1950~1976 年和 1978~2006 年两段, 分别进行 SVD 分析。

由图 7 可见, SVD 第 1 模态反映了 ENSO 模态, 1958、1966、1969、1983、1987、1998、2003、2005 年为 1 月 Niño3.4 区海温暖异常年, 对应 El

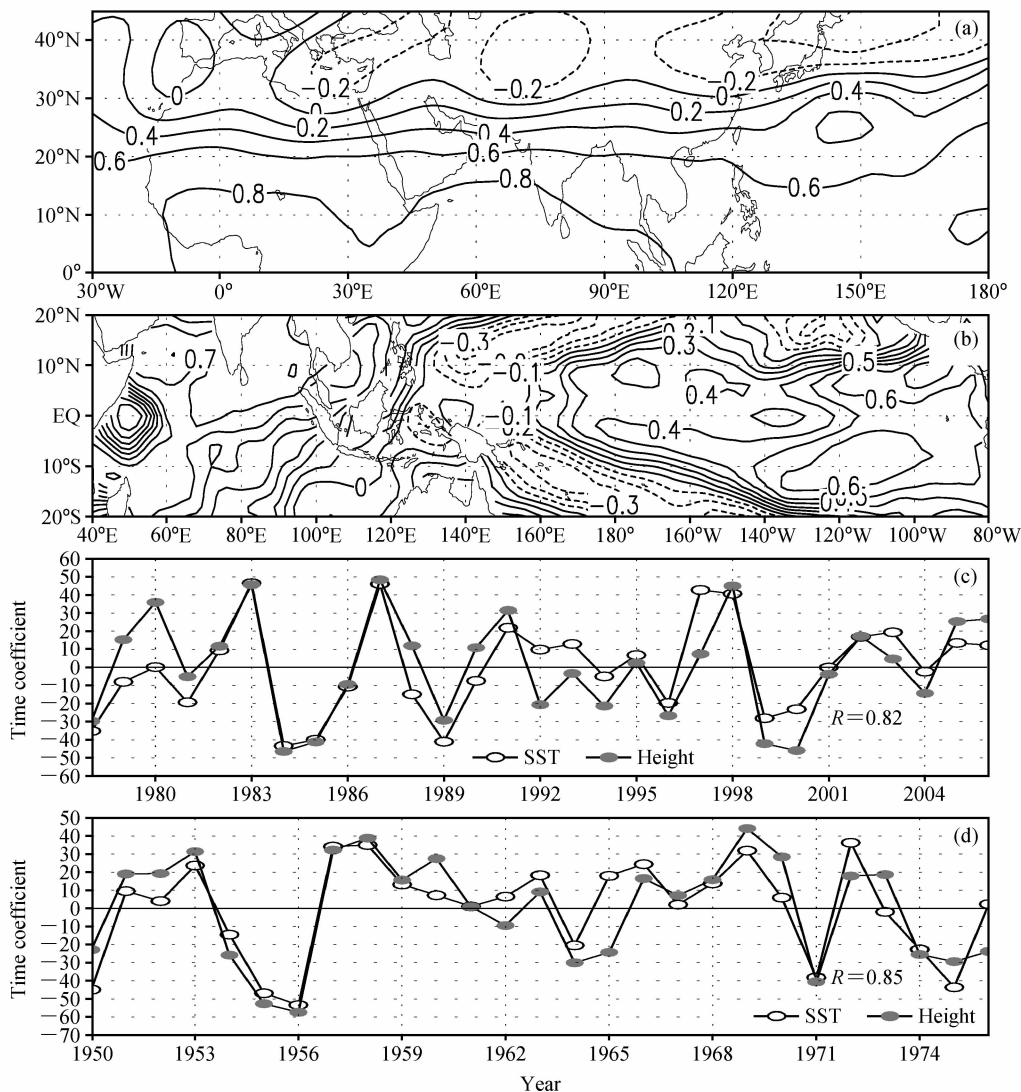


图 7 1978~2006 年 200hPa 高度场 (右场) 和热带海温 (左场) SVD 第 1 模态的 (a) 右异类相关图和 (b) 左异类相关图及其 (c) 时间系数; (d) 1950~1976 年时段 SVD 分析第 1 模态时间系数

Fig. 7 First pair of SVD heterogeneous correlation coefficients for (a) 200-hPa height field and (b) tropical SST field and their time coefficients during (c) 1978-2006; (d) same as (c) but for 1950-1976

Niño 事件; 1955、1956、1971、1974、1984、1985、1989、1999、2000 年为 1 月 Niño3.4 区海温冷异常年, 对应 La Niña 事件。1950~1976 年时段的 SVD 分析第 1 模态解释了两物理量场总协方差的 85%, 分别解释了海温场和高度场总方差的 29.62% 和 50.19%, 左右场时间系数的相关系数 (R) 为 0.85, 1978~2006 年时段的 SVD 第 1 模态解释了两物理量场总协方差的 78.2%, 分别解释了海温场和高度场总方差的 27.4% 和 48.05%, 左右场时间系数的相关系数为 0.82。

经分析表明, 1950~1976 年和 1978~2006 年两段 SVD 分析第 1 模态的高度场和海温异常场空间分布形式类似, 因此, 在此只给出了 1978~2006 年时段的高度场和海温空间分布图 (图 7a、b), 在 ENSO 暖事件衰减期的夏季, 赤道中东太平洋海温为正异常, 但异常强度减弱, Niño3 区和 Niño1+2 区海温减弱显著, 印度洋海温的正异常强度最大, 最大正异常位于亚洲大陆南侧与赤道之间的北印度洋, 此分布形态与图 3f 一致。由图 7a 可见, 在 200 hPa 高度场上, 赤道到 30°N 为正异常并由赤道向北递减, 最大正异常位于赤道印度洋。因此, SVD 分析结果表明, 在 ENSO 事件衰减期的夏季印度洋海温对高层南亚高压强度异常起着重要的作用。

张人禾等 (2003) 指出, 热带印度洋和太平洋海温存在显著的 3~7 年周期变化, 且印度洋单极、偶极与 ENSO 关系密切。热带印度洋海温距平从偶极到单极的演变对应着 ENSO 事件从发展到衰减的过程, 偶极处在 ENSO 发展期, 单极处在 ENSO 衰减期, 且偶极超前 Niño3 区海温约 4 个月, 单极落后 Niño3 区海温约 6 个月。

下面分析夏季南亚高压异常与 ENSO 事件衰减期夏季印度洋海温的关系。图 8a 表明: 夏季南亚高压面积指数与前一年 5 月至当年 5 月的 Niño3.4 区海温密切相关, 最大相关在前一年秋季; 而与前一年 9 月至当年甚至后一年的印度洋区域平均海温的相关均显著, 这可能是由于包含了年代际尺度变化的缘故。因此, 在 1978~2006 年时段内作类似分析。由图 8b 可见, 夏季南亚高压面积指数与 Niño3.4 区海温的显著相关时段基本与图 8a 一致; 与印度洋区域平均海温的显著相关时段则发生了显著变化, 显著相关时段仅为当年 2~8 月, 因此, 夏季南亚高压面积指数的年际变化与同期印度洋海温相关更密切。图 8c 表明, 印度洋海温指数与 Niño3.4 区海温指数显著相关时段是从前一年 11 月至当年 9 月, 说明该时段内印度洋海温与 Niño3.4 区海温的关系密切, 与前文结果一致。因此, 夏季南亚高压面积异常与 ENSO 事件衰

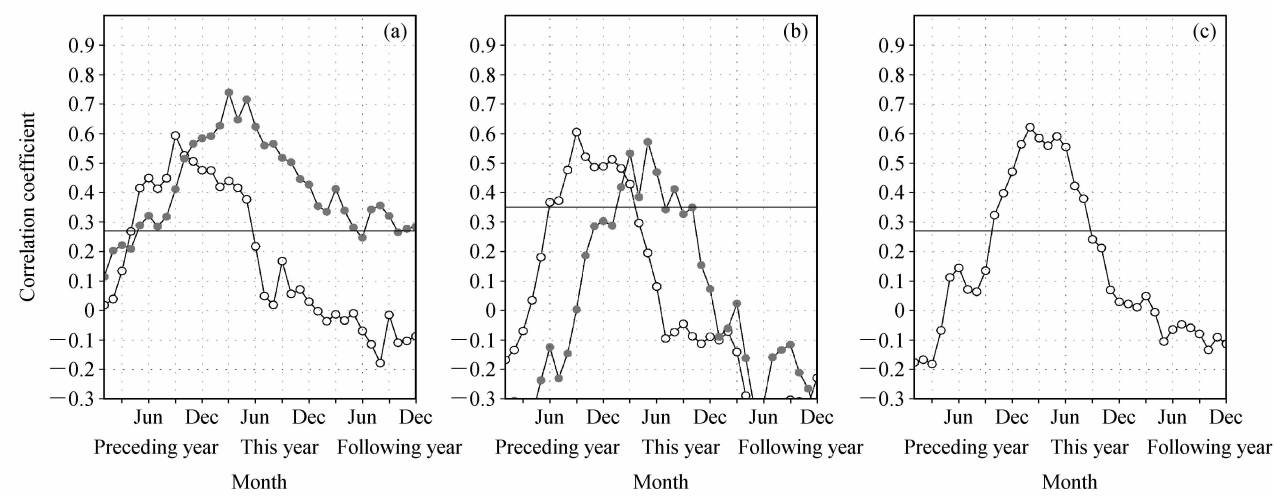


图 8 (a) 1950~2006 年和 (b) 1978~2006 年夏季高压面积指数与 Niño3.4 区 SST (空心圆) 和印度洋 (10°S~20°N, 50°E~110°E) 区域平均海温 (实心圆) 的时滞相关; (c) 1950~2006 年 1 月 Niño3.4 区 SST 与印度洋 (10°S~20°N, 50°E~110°E) 区域平均海温的时滞相关。水平直线表示通过 95% 信度检验

Fig. 8 Monthly leading-lagging correlations between SSAH area index and Niño3.4 SST (hollow circle) and Indian Ocean SST (solid circle) averaged over (10°S~20°N, 50°E~110°E) during (a) 1950-2006 and (b) 1978-2006; and (c) monthly leading-lagging correlation between Jan Niño3.4 SST and Indian Ocean SST averaged over (10°S~20°N, 50°E~110°E) during 1950-2006. The horizontal lines denote the correlation passing 95% confidence level

减期夏季印度洋和亚洲大陆以南海区的海温异常存在密切联系。

6 结论

(1) 夏季南亚高压面积指数 2~5 年周期的年际变化与 1 月 Niño3.4 海温存在密切关系。两者在 1960 年代中期到 1970 年代中期和 1980 年代以后到 21 世纪初都有显著的 2~5 年周期。El Niño (La Niña) 年, 南亚高压面积为正 (负) 异常, 只有 1992 年 El Niño 事件例外。

(2) 南亚高压面积年际异常与 ENSO 事件不同阶段的海温变化存在密切关系, 在 ENSO 事件衰减期的夏季, 显著相关区位于印度洋和亚洲大陆南侧海域。

(3) 夏季南亚高压强度类指标如高压面积、中心强度、东西界, 与 ENSO 事件的关系非常密切; 而夏季南亚高压位置类指数如高压脊线、高压中心位置, 与 ENSO 事件的关系并不十分密切, 特别是在 7 月和 8 月。ENSO 暖 (冷) 位相衰减期的夏季, 南亚高压强度增强 (减弱), 面积扩大 (缩小), 东西方向扩展 (收缩), 脊线南侧经向气压梯度减小 (增大), 脊线北侧气压梯度增大 (减小), 正 (负) 高度场异常值在赤道最强并向南北方向递减直到 30°N 或 30°S。

(4) ENSO 暖 (冷) 位相衰减期的夏季, 热带地区表现出显著的环流异常, 即印度洋地区上升 (下沉) 运动并伴以以东的西太平洋和以西的非洲地区下沉 (上升) 运动, 形成两个纬向异常的闭合环流。其相应的高低空异常环流为, 低层从西太平洋到东印度存在以赤道对称的异常反气旋对 (气旋对), 中西印度洋存在以赤道对称的气旋对 (反气旋对), 以及非洲赤道两侧存在弱的反气旋对 (气旋对), 这样就形成了从东到西的反气旋-气旋-反气旋 (气旋-反气旋-气旋) 的异常环流配置; 高层的异常环流配置与低层相反。因此, 在 ENSO 暖 (冷) 位相衰减期的夏季, 南亚地区上空为异常反气旋 (异常气旋), 使得南亚高压为正 (负) 异常, 强度增强 (减弱)。进一步研究表明, 在 ENSO 事件衰减期的夏季, 印度洋和亚洲大陆南侧海温异常对同期南亚高压的年际变化有重要作用, SVD 分析结果证实了海温异常与高度场异常的密切关系。

参考文献 (References)

- Alexander M A, Blané I, Newman M, et al. 2002. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans [J]. *J. Climate*, 15: 2205-2228.
- 陈桂英, 廖荃荪. 1990. 100 hPa 南亚高压位置与我国夏季降水 [J]. *高原气象*, 9 (4): 432-438.
- Chen Guiying, Liao Quansun. 1990. Relationship between the location features of 100 hPa South Asia High and the summer rainfall in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 9 (4): 432-438.
- 陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. *大气科学*, 26 (5): 595-610.
- Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26 (5): 595-610.
- 陈咸吉, 朱福康, 陆龙骅, 等. 1980. 南亚高压准三年振荡周期 [J]. *气象科技*, 8 (1): 1-3.
- Chen Xianji, Zhu Fukang, Lu Longhua, et al. 1980. The quasi 3-year oscillation of the South Asia high [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 1-3.
- ENSO 监测小组. 1989. ENSO 事件划分标准和指数 [J]. *气象*, 15 (3): 37-38.
- ENSO Monitoring Group. 1989. Definition and indices of ENSO events [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 15 (3): 37-38.
- 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 (2): 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 (2): 335-344.
- Huang Ronghui, Chen Wen, Yan Bangliang, et al. 2004. Recent advances in studies of the interaction between the East Asian winter and summer monsoon and ENSO cycle [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 21 (3): 407-424.
- 李崇银, 穆明权. 2001. 赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响 [J]. *大气科学*, 25 (4): 433-443.
- Li Chongyin, Mu Mingquan. 2001. The dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate [J]. *Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (4): 433-443.
- 李晓燕, 翟盘茂. 2000. ENSO 事件指数与指标研究 [J]. *气象学报*, 58 (1): 102-109.
- Li Xiaoyan, Zhai Panmao. 2000. On indices and indicators of ENSO episodes [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 58 (1): 102-109.
- 李晓燕, 翟盘茂, 任福民. 2005. 气候标准值改变对 ENSO 事件划分的影响 [J]. *热带气象学报*, 21 (1): 72-78.
- Li Xiaoyan, Zhai Panmao, Ren Fumin. 2005. Redefining ENSO episodes based on changed climate references [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 21 (1): 72-78.
- 林海, 徐裕华. 2004. 北半球对流层上部超长波的低频振荡及其与南亚高压变动的关系 [M]//李跃清, 马振峰, 陈静. 青藏高原气

- 象学研究文集. 北京: 气象出版社, 63–69. Lin Hai, Xu Yuhua. 2004. The relationship between the low-frequency oscillation of upper tropospheric super long wave in Northern Hemisphere and the variation of South Asia High [M]//Li Yueqing, Ma Zhenfeng, Chen Jing. Collected Papers of the Tibetan Plateau Meteorology (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 63–59.
- 刘宣飞, 朱乾根, 郭品文. 1999. 南亚高压季节变化中的正斜压环流转换特征 [J]. 南京气象学院学报, 22 (3): 291–299. Liu Xuanfei, Zhu Qian'gen, Guo Pinwen. 1999. Conversion characteristics between barotropic and baroclinic circulations of the SAH in its seasonal evolution [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 22 (3): 291–299.
- 刘屹岷, 吴国雄, 刘辉, 等. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 III: 凝结潜热加热与南亚高压及西太平洋副高 [J]. 气象学报, 57 (5): 525–538. Liu Yimin, Wu Guoxiong, Liu Hui, et al. 1999. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high. III: Condensation heating and South Asia high and western Pacific subtropical high [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (5): 525–538.
- Qian Yongfu, Zhang Qiong, Yao Yonghong, et al. 2002. Seasonal variation and heat preference of the South Asia high [J]. Advance in Atmospheric Sciences, 19 (5): 821–836.
- Qian Yongfu, Zhang Yan, Jiang Jing, et al. 2005. The earliest onset areas and mechanism of the tropical Asian summer monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica, 19 (2): 129–142.
- 秦大河, 翟盘茂, 李晓燕, 等. 2003. 厄尔尼诺 [M]. 北京: 气象出版社, 3. Qin Dahe, Zhai Panmao, Li Xiaoyan, et al. 2003. El Niño (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 3.
- Smith T M, Reynolds R W. 2003. Extended reconstruction of global sea surface temperatures based on COADS data (1854–1997) [J]. J. Climate, 16: 1495–1510.
- 谭晶, 杨辉, 孙淑清, 等. 2005. 夏季南亚高压东西振荡特征的研究 [J]. 南京气象学院学报, 28 (4): 452–460. Tan Jing, Yang Hui, Sun Shuqing, et al. 2005. Characteristics of the longitudinal oscillation of South Asia high during summer [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (4): 452–460.
- 陶诗言, 朱福康. 1964. 夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系 [J]. 气象学报, 34 (4): 385–395. Tao Shiyan, Zhu Fukang. 1964. The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the west-Pacific subtropical anticyclone over the Far East [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 34 (4): 385–395.
- 王绍武, 龚道溢. 1999. 近百年来 ENSO 事件及其强度 [J]. 气象, 25 (1): 9–13. Wang Shaowu, Gong Daoyi. 1999. ENSO events and their intensity during the past century [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 25 (1): 9–13.
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 I: 尺度分析 [J]. 气象学报, 57 (3): 257–263. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Ping. 1999. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high. I: Scale analysis [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (3): 257–263.
- 杨辉, 李崇银. 2005. 热带太平洋-印度洋海温异常综合模对南亚高压的影响 [J]. 大气科学, 29 (1): 99–110. Yang Hui, Li Chongyin. 2005. Effect of the tropical Pacific-Indian Ocean temperature anomaly mode on the South Asian high [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 99–110.
- 尤卫红, 段长春, 赵宁坤, 等. 2006. 夏季南亚高压年际变化的特征时间尺度及其时空演变 [J]. 高原气象, 25 (4): 601–608. You Weihong, Duan Changchun, Zhao Ningkun, et al. 2006. Characteristic time scales of interannual change of South Asia high in summer and its temporal-spatial evolution [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (4): 601–608.
- 张琼, 钱永甫, 张学洪. 2000. 南亚高压的年际和年代际变化 [J]. 大气科学, 24 (1): 67–78. Zhang Qiong, Qian Yongfu, Zhang Xuehong. 2000. The interannual and interdecadal variations of the South Asian high [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (1): 67–78.
- 张人禾, 何金海, 谭言科, 等. 2003. 热带印度洋和赤道中东太平洋海温异常的相互关系 [M]//巢纪平, 李崇银, 陈英仪. ENSO 循环机理和预测研究. 北京: 气象出版社, 294–307. Zhang Renhe, He Jinhai, Tan Yanke, et al. 2003. Correlation between the tropical Indian Ocean and equatorial central and eastern Pacific Ocean [M]//Chao Jiping, Li Chongyin, Chen Yingyi. Studies of Mechanism and Prediction of ENSO Cycle (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 294–307.
- 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 (2): 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 (2): 220–230.