

南海夏季风爆发迟早与赤道纬向风关系的诊断研究

周浩^{1, 2, 3} 温之平¹ 蓝光东^{1, 2}

1 中山大学季风与环境研究中心/大气科学系, 广州 510275

2 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080

3 重庆市气候中心, 重庆 401147

摘 要 利用 ECMWF 和 NCEP (1958~1999 年) 的再分析资料, 研究南海夏季风与前期气象要素的关系, 结果表明: 南海夏季风建立日期与当年 2 月份赤道印度洋地区的纬向风存在高层 (200~100 hPa) 为正、低层 (1000~700 hPa) 为负的显著相关分布, 类似于偶极子的分布特征; 而在赤道中太平洋地区 (160°E~160°W) 则存在高层为负、低层为正的另一个显著相关“偶极子”。分析这种相关特征的持续性, 发现上述形势从 2 月份到 5 月份一直存在, 且赤道印度洋地区高低层相反的相关分布从 3 月份开始逐渐东移, 到 5 月份维持在印度洋东部至南海一带。从 5 月份的相关系数分布图可发现, 南海地区低层为负相关, 高层为正相关, 说明低层西风异常、高层东风异常的赤道纬向风分布有利于南海夏季风早爆发。针对南海夏季风建立日期与赤道地区 (10°S~10°N 平均) 纬向风的“偶极子”型相关分布特征, 定义了一个用于诊断南海夏季风爆发迟早的前期因子。该因子与大部分学者定义的南海夏季风建立日期存在着显著的相关, 说明该因子对南海夏季风爆发迟早有一定的反映能力和预测作用。根据 Gill (1980 年) 理论分析发现, 上述 2 月份赤道地区纬向风异常是同期赤道印度洋一大陆桥地区异常强对流活动造成热带赤道大气环流显著异常变化的结果。

关键词 南海夏季风爆发 前期因子 赤道纬向风场

文章编号 1006-9895 (2007) 05-0950-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

Diagnosis of Relationships between the Onset of South China Sea Summer Monsoon and the Equatorial Zonal Wind

ZHOU Hao^{1, 2, 3}, WEN Zhi-Ping¹, and LAN Guang-Dong^{1, 2}

1 Center for Monsoon and Environment Research/Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

2 Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080

3 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

Abstract Using two kinds of the monthly mean reanalysis data (from 1958 to 1999) of the ECMWF and NCEP/NCAR, correlation between the South China Sea (SCS) summer monsoon onset dates and the preceding meteorological fields is analyzed. It is found that there exists a resembling “dipole” of the correlation between the onset dates and the equatorial zonal wind, which is positive in upper layers (200 - 100 hPa) and negative in lower layers (1000 - 700 hPa) over the equatorial Indian Ocean. Another “dipole” is found over the equatorial middle Pacific Ocean (negative correlation in upper layer and positive in lower layer) in February. These patterns persist from February to May with the correlation coefficient “dipole” drifting slowly from the Indian Ocean to eastern regions, finally standing over the eastern Indian Ocean and SCS. By studying the distribution of correlation coefficient in May, it is found

收稿日期 2006-04-11 收到, 2006-08-18 收到修改稿

资助项目 中国气象局广州热带海洋气象研究所开放基金课题“南海夏季风爆发迟早的机理和预测研究”

作者简介 周浩, 男, 1981 年出生, 硕士, 主要从事热带气象学的研究。E-mail: zhouhao-cq@hotmail.com

that the negative correlation areas correspond to anomalous westerly wind in lower layers and positive correlation area corresponds to anomalous easterly wind in upper layers over SCS regions, which is favorable for the early onset of SCS summer monsoon.

A preceding factor for diagnosing the onset of SCS summer monsoon is defined according to the correlation coefficient “dipole” characteristic. The factor is actually the vertical shear of mean zonal wind over the equatorial ($10^{\circ}\text{S}-10^{\circ}\text{N}$) Indian Ocean ($50^{\circ}\text{E}-90^{\circ}\text{E}$) and that over the Pacific Ocean ($160^{\circ}\text{E}-160^{\circ}\text{W}$). If the factor has positive (negative) value, the anomalous Walker circulation (anti-Walker circulation) exists over the equatorial region, the SCS summer monsoon onset is earlier (later) in February. The high correlation coefficient between the preceding factor and most of summer monsoon onset dates indicates this factor can diagnose and forecast SCS summer monsoon onset.

The farther research shows that the preceding factor which explains the equatorial zonal wind anomalies is corresponding to some kinds of OLR anomalies in the tropic region in February. In early (late) monsoon years, there is the negative (positive) anomaly of OLR over the equatorial eastern India Ocean and Sumatra regions, which will firstly do favor to form two anomalous barometric low (high) centers over equatorial eastern IO and anomalous barometric low (high) belt over the equatorial western Pacific Ocean, and then induce anomalous west (east) wind over the equatorial India Ocean and anomalous east (west) wind over the equatorial Pacific Ocean in February. This diagnostic result can be explained by Gill's research.

Key words SCS summer monsoon onset, preceding factor, equatorial zonal wind

1 引言

近年来,对东亚季风系统的研究^[1]表明,南海夏季风是亚洲季风中爆发最早的系统,南海夏季风的爆发往往预示亚洲季风区大气环流由冬季形势向夏季形势转变。因此,关于南海夏季风建立的研究得到了广大专家学者的重视,也取得了很多重要的成果^[2, 3]。

从气候平均态来看,南海夏季风建立日期大约在 5 月第 4 候。许多学者用不同指标确定的建立日期虽然存在差异,但对于多数年份,建立日期基本上一致,特别是建立日期的气候平均值几乎都相同^[4],为 5 月第 4 候。南海夏季风的爆发存在明显的年际变化,有的年份爆发早,有的年份爆发晚。最早的在 4 月底,最迟的则到了 6 月初^[4]。其建立为什么会有如此明显的年际变化?有没有什么前期的因子可以用于预测南海夏季风爆发的迟早?

孙淑清等^[5]指出冬季风异常对流场的影响可以从冬季一直持续到春、夏季,在强冬季风年,南海夏季风爆发偏早、偏强,且突发性显著。赵永平等^[6]利用 LEVITUS 和 NCEP/NCAR 1982~1997 年逐月 SST 资料指出,前期冬春季南海暖池持续偏暖(冷)时,初夏南海季风的爆发一般偏晚(早)。何敏等^[7]指出南海冬、夏季风存在隔季的相关,冬季风的强度可以作为南海夏季风爆发早、晚

和强、弱的信号。蓝光东等^[8]利用 ECMWF 1979~1993 年的再分析资料研究指出,利用 4 月份 40°S 纬圈平均大气热源垂直积分的距平值,可得到南海夏季风爆发时间的前期判断标准。王黎娟等^[9]则认为南海夏季风的建立与冬季位于苏门答腊的对流中心由冬入夏沿“大陆桥”和中南半岛的系统性移动有密切联系。黄荣辉等^[10]利用 1978~1999 年的平均高云量(HCA)资料发现春季菲律宾周围的高云量与南海夏季风爆发日期的相关系数达到了一 0.76,说明菲律宾周围春季的对流活动强弱对南海夏季风的爆发有重要的影响。通过以上回顾可知,前人指出了一些对南海夏季风爆发迟早有前兆信号意义的物理因子,但这些研究所用资料的时间序列较短,最长的是黄荣辉等^[10]的研究,利用了 1978 年至 1999 年 22 年的资料。对于更长时间的资料序列而言,以上揭示的事实是否也显著存在?是否还有其他能够更好预示南海夏季风爆发迟早的前期因子?本文将利用 ECMWF 和 NCEP/NCAR 两套长达 40 年以上的再分析资料,试图找出与南海夏季风爆发迟早具有较好关系的前期因子,并结合前人的工作探讨南海夏季风爆发迟早的原因和物理机制。

2 资料说明和研究方法

本文使用了两套再分析资料的逐月常规气象要

素场，一套是欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的再分析格点资料（简称 EAR）。另一套是美国环境预报中心和美国国家大气研究中心（NCEP/NCAR）第 1 版的再分析格点资料（简称 NCEP）。EAR 垂直方向有 18 个标准等压面（1000、925、850、775、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa），水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬度，总长度为 528 个月（1958 年 1 月～2001 年 12 月）。NCEP 垂直方向则为 17 层（分别为 1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa），水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬度，总长度为 698 个月（1948 年 1 月～2006 年 2 月）。

本文主要运用相关分析研究南海夏季风建立日期的年际变化与前期各标准等压面上逐月平均气象要素场的年际变化之间的关系，并依据显著相关分布深厚且能持续 2 个月以上的原则，找出对南海夏季风建立迟早有预测意义的前期因子。

3 南海夏季风建立日期的选定

为了研究影响南海夏季风爆发迟早的前期因子，首先必须选定一个具有较好代表性的南海夏季风建立日期。利用国内气象学者^[11~18]定义的南海夏季风建立日期，计算了不同学者定义的南海夏季风建立日期之间的两两相关系数（见表 1）。从表 1 中可见，梁建茵等^[18]确定的南海夏季风建立日期与多数日期的相关系数高于 0.7（超过 99% 信度水平）。相比其他学者，梁建茵等^[18]确定的日期与其他建立日期的相关表现最好，说明该指数定义的方法更具有普遍性，能较好地反映南海夏季风建立的气候特征。因此，本文选择该日期进行以下的研究。

法更具有普遍性，能较好地反映南海夏季风建立的气候特征。因此，本文选择该日期进行以下的研究。

Wang 等^[19]指出，利用南海区域 850 hPa 的纬向风出现西风来定义季风爆发，不仅简单，而且有很好的表征能力。梁建茵等^[18]正是依据南海区域 850 hPa 平均纬向风变化来确定南海夏季风建立日期的，他们认为南海地区 850 hPa 平均纬向风速大于零（表明西太平洋副热带高压脊大部分移出南海地区），同时南海地区偏西风主要来源于孟加拉湾南部。当上述两个条件同时满足并持续 5 天以上，且其后连续中断天数（南海地区平均纬向风小于零）不大于前期西南季风出现天数的 3 倍，则将满足条件的第一天定为南海夏季风建立日期。

梁建茵等^[18]确定的 1958～1999 年南海夏季风建立日期，最早于 4 月 22 日爆发，最晚爆发于 6 月 8 日，平均日期为 5 月 19 日，即 5 月第 4 候，与何金海等^[4]整理的气候平均意义上的南海夏季风建立日期相同。分析建立日期的标准化时间序列可知（图 1），南海夏季风建立日期存在显著的年际变化。

4 南海夏季风爆发迟早的前期因子

利用 ERA（1958～1999 年）的再分析资料计算了南海夏季风建立日期的年际变化与季风爆发前期（1～5 月）纬向风场（18 个标准气压层）的相关，发现建立日期与当年 2 月份赤道印度洋地区的纬向风存在高层（200～100 hPa）为正、低层（1000～700 hPa）为负的显著相关分布，类似于“偶极子”的分布特征；而在赤道中太平洋地区（160°E～

表 1 不同学者确定的南海夏季风建立日期之间的相关系数表（资料长度为 1958～1998 年）

Table 1 The correlation coefficients between the South China Sea (SCS) monsoon onset dates during 1958—1998 from different references

	相关系数							
	戴念军 ^[11]	贺海晏 ^[12]	冯瑞权 ^[13]	李崇银 ^[14]	姚永红 ^[15]	高辉 ^[16]	张秀芝 ^[17]	梁建茵 ^[18]
戴念军 ^[11]	1.00	0.64	0.77	0.51	0.74	0.45	0.64	0.70
贺海晏 ^[12]		1.00	0.68	0.37	0.67	0.77	0.84	0.74
冯瑞权 ^[13]			1.00	0.47	0.59	0.61	0.74	0.78
李崇银 ^[14]				1.00	0.36	0.29	0.33	0.44
姚永红 ^[15]					1.00	0.65	0.56	0.76
高辉 ^[16]						1.00	0.64	0.57
张秀芝 ^[17]							1.00	0.74
梁建茵 ^[18]								1.00

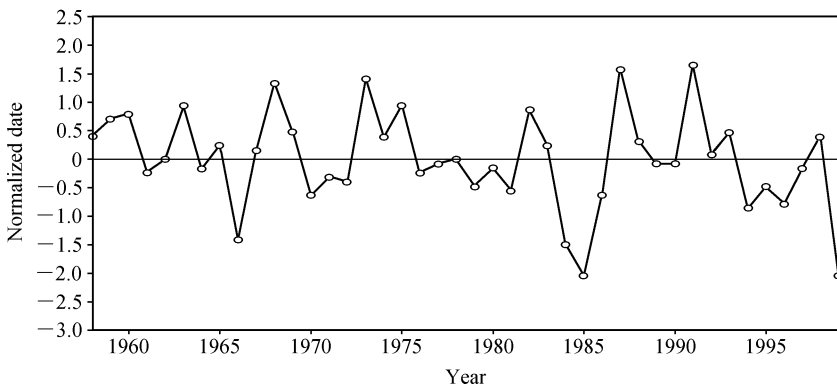


图 1 1958~1999 年 (42 年) 南海夏季风建立日期 (时间序列经过标准化处理)

Fig. 1 Interannual variation of SCS summer monsoon onset dates from 1958 to 1999 (42 years)

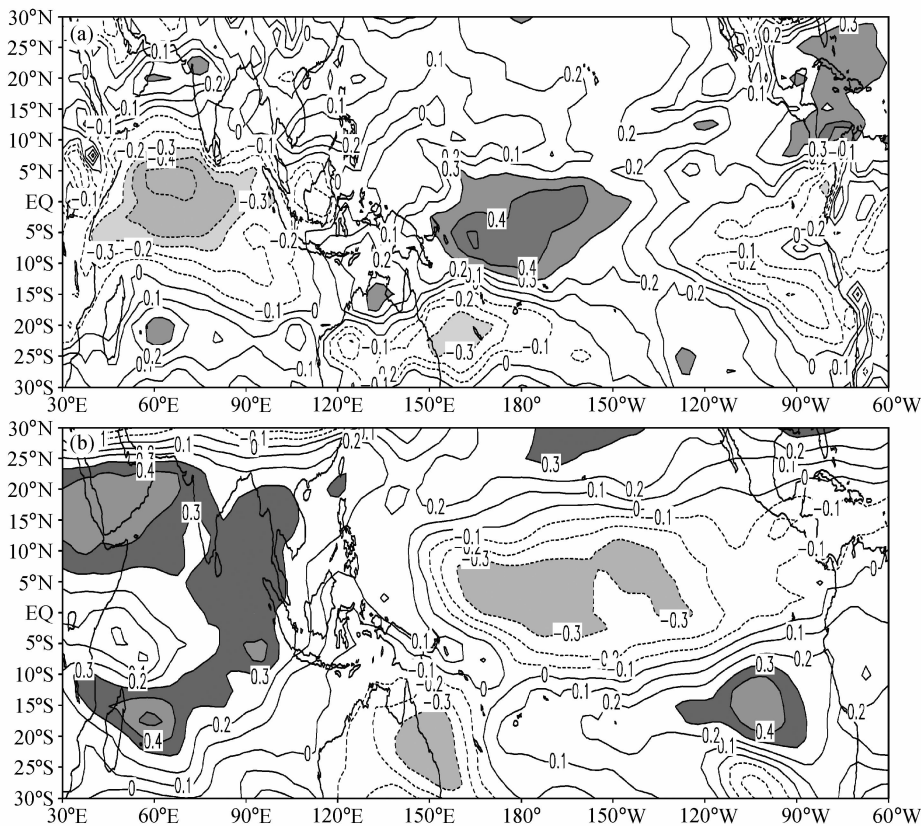


图 2 2 月份 850 hPa (a) 和 200 hPa (b) 的纬向风(ERA) 与建立日期相关系数分布。阴影：超过 95% 信度水平的区域

Fig. 2 The distribution of correlation coefficient between the onset dates and u wind at (a) 850 hPa and (b) 200 hPa in Feb. The correlation areas over the 95% significance level are shaded

160°W) 则存在高层为负、低层为正的另一个显著相关“偶极子”(图 2)。这种特征可以从赤道地区(10°S~10°N 平均) 纬向风与建立日期的相关系数分布图中得到明显表现(图 3a)。分析这种相关的持续性(图 3b~d), 发现上述相关分布形势从 3 月份到 5 月份也一直存在, 且赤道印度洋地区高低层相关系数反号的分布形势从 3 月份开始逐渐东移, 到 5 月份维持在印度洋东部到南海一带。从 5 月份

的相关分布图可发现, 南海地区低层为负相关, 高层为正相关, 说明低层西风异常, 高层东风异常的赤道纬向风分布有利于南海夏季风爆发偏早。采用同样方法分析 NCEP 资料, 发现在赤道印度洋和中太平洋地区也分别存在一个显著相关“偶极子”(见图 4a), 从图 4b~d 可以知道这种相关分布特征的持续性, 这些特征与用 ERA 资料得出的结果相吻合。

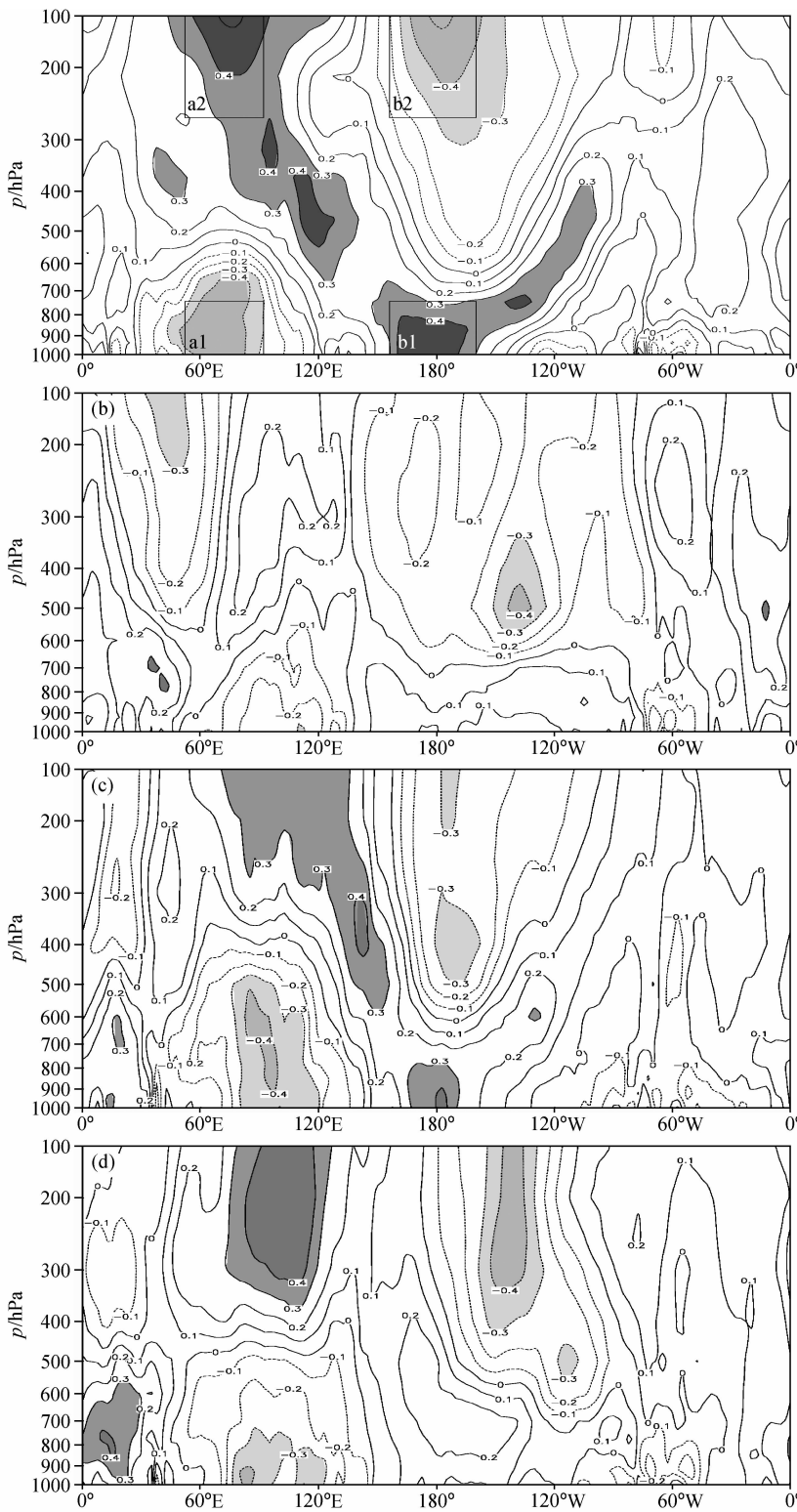


图 3 赤道 (10°S~10°N 平均) 纬向风(ERA)与建立日期相关系数分布图: (a) 2 月; (b) 3 月; (c) 4 月; (d) 5 月。阴影: 超过 95% 信度水平的显著相关区。选取图 a 中 a1、a2、b1 和 b2 四个区域来定义南海夏季风爆发迟早的前期因子

Fig. 3 Altitude-longitude cross sections of the correlation coefficients between the onset dates and the 10°S–10°N mean zonal wind (ERA): (a) Feb; (b) Mar; (c) Apr; (d) May. The correlation areas over the 95% significance level are shaded. Four regions a1, a2, b1, and b2 in (a) are selected to define a preceding factor for diagnosing the onset of SCS summer monsoon

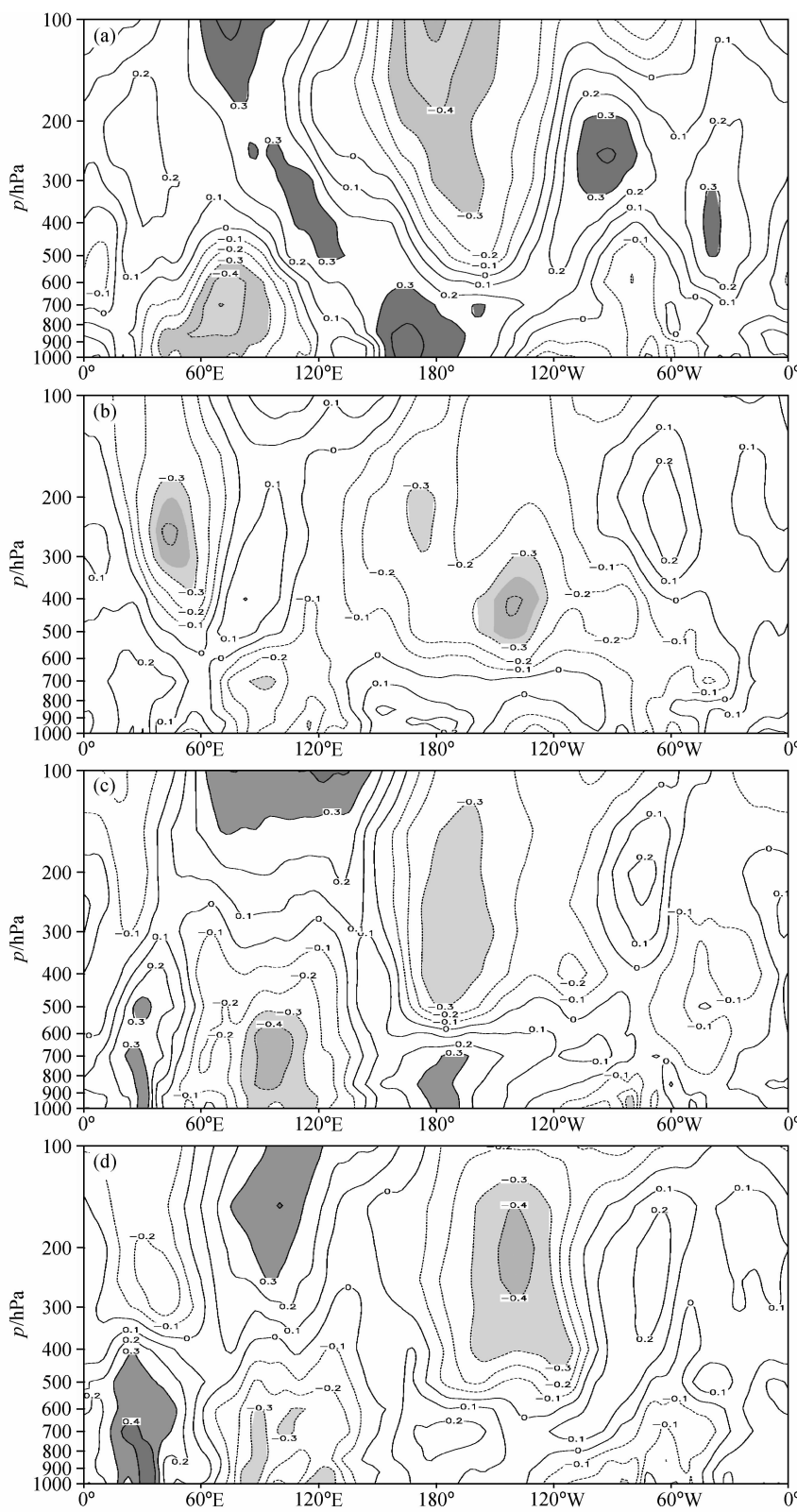


图 4 赤道 ($10^{\circ}\text{S}\sim10^{\circ}\text{N}$ 平均) 纬向风 (NCEP) 与建立日期相关系数分布图: (a) 2 月; (b) 3 月; (c) 4 月; (d) 5 月。阴影: 超过 95% 信度水平的显著相关区

Fig. 4 As in Fig. 3, except for the data of zonal wind from NCEP

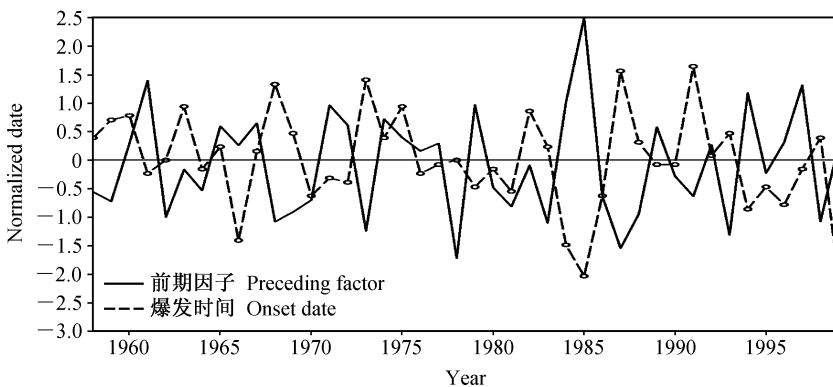


图5 标准化后的南海夏季风建立日期和 f_e 年际变化曲线(时间序列经过标准化处理)

Fig. 5 Time series of the SCS monsoon onset date and the preceding factor f_e

针对南海夏季风建立日期与2月份赤道地区($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 平均)纬向风的“偶极子”型相关系数分布特征,选取图3a中a1、a2、b1、b2四个区域的平均纬向风速定义用于诊断南海夏季风爆发迟早的前期因子:

$$f = u_1 - u_2, \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} u_1 = u_{a1} - u_{b1}, \\ u_2 = u_{a2} - u_{b2}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, u_{a1} 和 u_{b1} 为2月份($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{E}$)区域1000~700 hPa和200~100 hPa多层平均的纬向风速; u_{a2} 和 u_{b2} 为2月份($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $160^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$)区域1000~700 hPa和200~100 hPa多层平均的纬向风速。 u_1 、 u_2 分别定义了2月份赤道印度洋和赤道太平洋地区高低层纬向风切变,前期因子 f 实际上反映的是热带低纬地区东(太平洋地区)、西(印度洋地区)沃克环流系统的强弱, f 为正值,表明东(西)边的沃克环流(横向季风环流)偏强,且南海夏季风建立早;反之,东(西)边的沃克环流(横向季风环流)偏弱,季风建立晚。这样定义的反映2月份赤道纬向风垂直分布结构的指数对南海夏季风爆发迟早是否具有预测能力?通过下面的分析,可得到初步的结果。

根据 f 的定义,用ERA资料计算的前期因子记为 f_e ,用NCEP资料计算的前期因子记为 f_n 。图5为 f_e 与梁建茵等^[18]确定的南海夏季风建立日期年际变化曲线,从中可见前期因子 f_e (实线)与建立日期(虚线)有着明显相反的变化趋势,通过分析可知两者相关系数达到-0.52,超过99%的信度水平, f_n 与建立日期的相关系数也达到-0.51,同样超

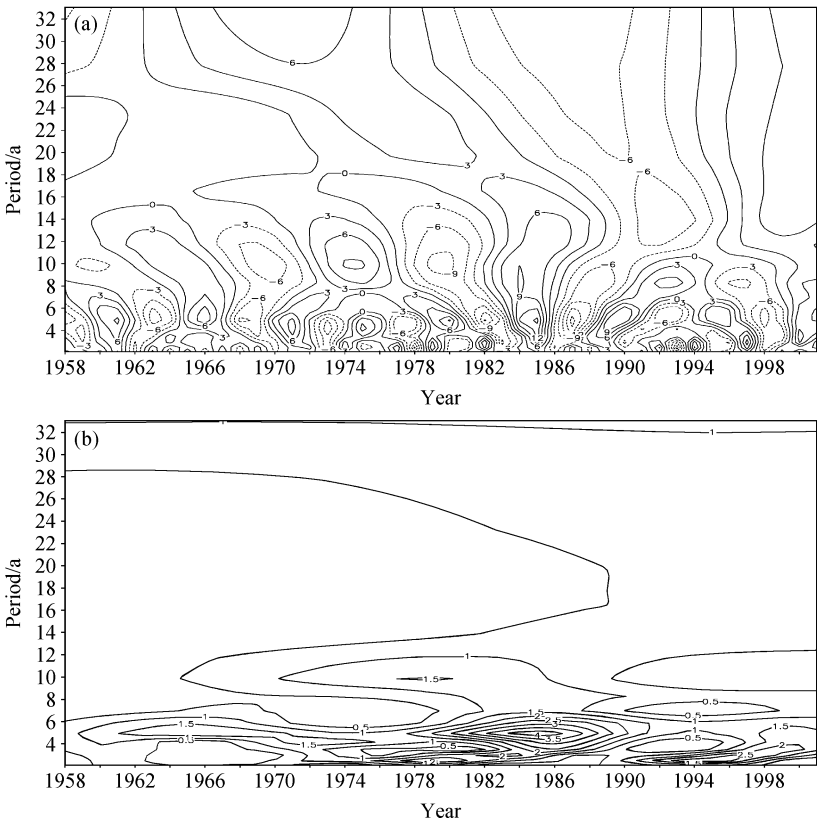
过了99%的信度水平。图6a是前期因子 f_e 时间序列小波分析的实部,图6b为小波模。从图6可看出,前期因子主要存在4~6年的周期(20世纪80年代最显著)和10年左右的长周期。分析 f_n 序列的周期特征,得到与上述相近的结果(图略)。

为了更好地说明由2月份赤道纬向风场来定义的前期因子对于南海夏季风爆发迟早的征兆作用,表2列举了该前期因子与文献[11~17]确定的南海夏季风建立日期(40年)的相关系数。可见,不管是 f_e , 还是 f_n , 多数相关系数达到了95%的信度水平,反映出该因子的确对季风爆发迟早有一定的征兆和预测能力。

5 前期因子反映的2月赤道纬向风异常产生的物理机制

前面详细地分析了2月份赤道平均纬向风对南海夏季风爆发的征兆作用,因此只要知道2月份赤道平均纬向风变化特征,就可以预测后期南海夏季风爆发的早晚。南海夏季风爆发迟早的这个前期信号产生的原因是什么?背后是否有更多的有力证据来支持这个信号的产生?本节将重点分析2月份赤道纬向风异常产生的物理机制,以及南海夏季风爆发迟早与2月份其他气象要素变化异常的联系。

图7是 f_e 与2月份850 hPa位势高度场相关系数分布图。在赤道印度洋-西太平洋存在显著的负相关,其中印度洋-大陆桥一带以赤道为对称轴南北半球各有一个显著负相关中心,南海-西太平洋呈“>”形的负值带,南北半球中高纬度太平洋地区则为正相关中心。直接用南海夏季风建立日期与2月份的850 hPa位势高度场计算相关,结果与



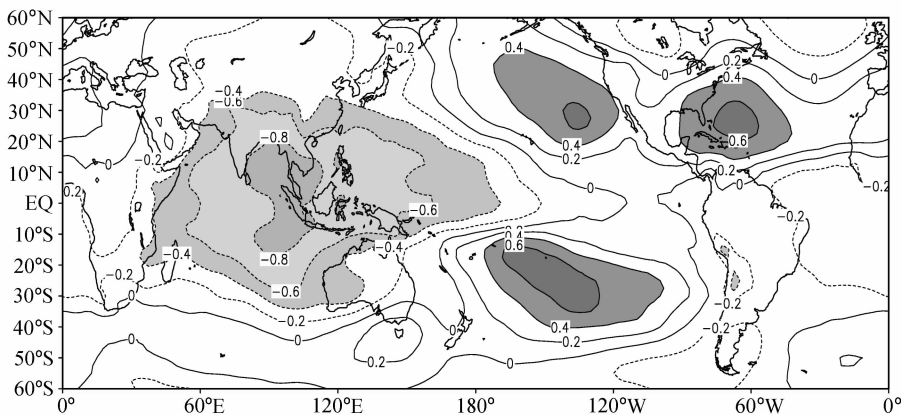


图 7 f_e 与 2 月份 850 hPa 位势高度场相关系数分布图。阴影：超过 95% 信度水平的区域

Fig. 7 The distribution of correlation coefficient between the preceding factor f_e and geopotential height at 850 hPa in Feb. The correlation areas over the 95% significance level are shaded

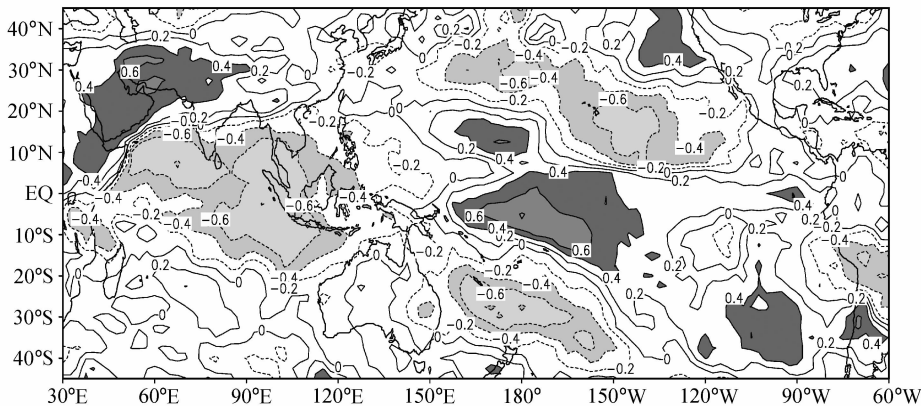


图 8 f_e 与 2 月份全球 OLR 相关系数分布图。阴影：超过 95% 信度水平的区域

Fig. 8 The distribution of correlation coefficient between the preceding factor f_e and OLR in Feb. The correlation areas over the 95% significance level are shaded

文选取 1985 和 1987 年进行个例分析。这两年分别代表南海夏季风爆发早年和晚年，从图 5 可知，这两年同时也是前期因子 f_e 正负异常年。如图 10a，1985 年赤道印度洋一大陆桥表现为明显的 OLR 负异常，说明该年这个地区对流活动旺盛。同时图 11a、c 表明，在 850 hPa 赤道印度洋出现西风异常，而太平洋出现强东风异常，高度场在赤道印度洋-大陆桥一带为较大的负异常。表明 1985 年季风爆发前期 2 月份大气流场、高度场和 OLR 分布形势是符合前面探讨的。同样，分析季风爆发晚年的 1987 年大气流场、高度场和 OLR 分布形势，发现呈现出相反分布特征。个例分析再次证实，对南海夏季风爆发迟早有显著影响的上述 2 月份赤道纬向风异常结构，与对南海夏季风爆发迟早有相同

影响的位势高度场、OLR 分布异常有很好的配合关系，这种配合关系恰好可以由 Gill 的理论模型^[20]来解释。

6 小结

(1) 利用 ERA 和 NCEP 两套资料通过相关分析研究了南海夏季风建立日期与前期 2 月份赤道地区(10°S~10°N) 纬向风的关系，结果表明：赤道印度洋地区纬向风与建立日期的相关系数存在高层为正、低层为负的显著相关“偶极子”，而在赤道中太平洋地区则存在高层为负、低层为正的另一个显著相关“偶极子”。分析这种相关特征的持续性，发现上述特征从 2 月份到 5 月份一直存在，且赤道印度洋地区高低层反号的相关分布形势从 3 月份开

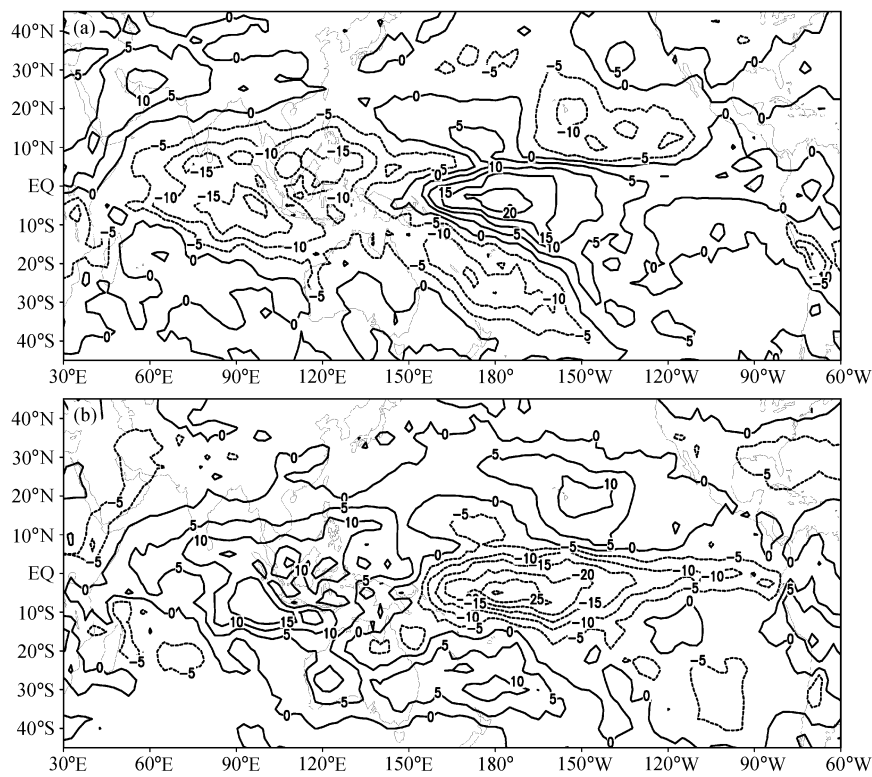


图 9 2 月份全球 OLR 异常(单位: W/m^2)合成分布图: (a) 前期因子 f_e 正异常年; (b) 前期因子 f_e 负异常年

Fig. 9 Composites of OLR anomalies (W/m^2) in Feb. (a) Years with positive anomalous f_e , (b) Years with negative anomalous f_e

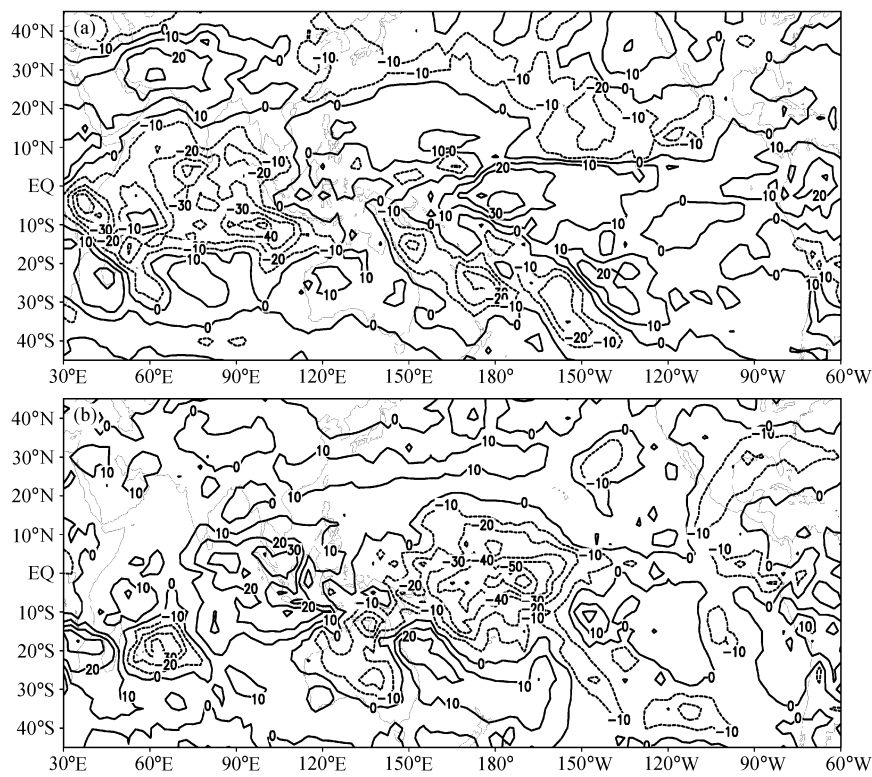


图 10 2 月份 OLR 异常场(单位: W/m^2): (a) 1985 年; (b) 1987 年

Fig. 10 The distributions of OLR anomalies (W/m^2) in Feb of 1985 (a) and 1987 (b)

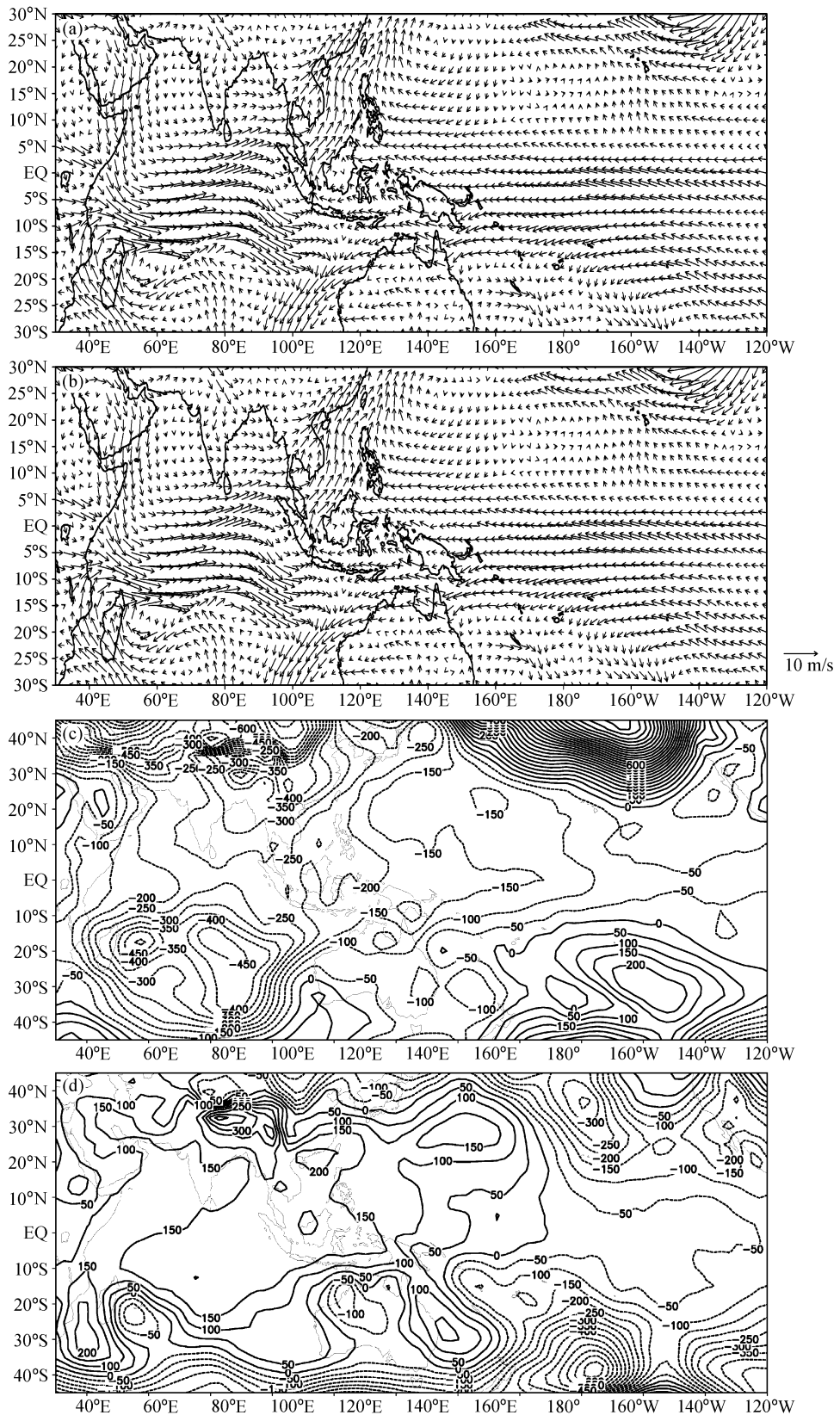


图 11 2 月份 850 hPa 异常风场 (a、b) 与位势高度异常场 (单位: gpm) (c、d): (a、c) 1985 年; (b、d) 1987 年

Fig. 11 The distributions of wind vector anomalies (a, b) and geopotential height anomalies (gpm) (c, d) at 850 hPa in Feb; (a, c) 1985 年; (b, d) 1987 年

始逐渐东移, 到 5 月份就维持在印度洋东部至南海一带, 南海地区低层为负相关, 高层为正相关, 说明低层西风异常、高层东风异常的赤道纬向风分布有利于南海夏季风早爆发。

(2) 针对南海夏季风建立日期与 2 月份赤道地区 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) 纬向风场的“偶极子”型相关分布特征, 定义了一个用于诊断季风爆发迟早的前期因子 f , 该因子实际上反映的是热带低纬地区东(太平洋地区)、西(印度洋地区)沃克环流系统的强弱。 f 为正值, 表明东(西)边的沃克环流(横向季风环流)偏强, 且南海夏季风建立早; 反之, 东(西)边的沃克环流(横向季风环流)偏弱, 季风建立晚。前期因子 f 与大部分学者确定的建立日期存在显著的相关关系, 表明该因子对南海夏季风爆发迟早有一定的诊断能力和预测作用。

(3) 诊断分析发现对南海夏季风爆发迟早有显著影响的上述 2 月份赤道纬向风场异常结构, 与对南海夏季风爆发迟早有相同影响的位势高度场、OLR 分布异常有很好的配合关系, 这种配合关系恰好可以由 Gill 的理论模型^[20]来解释, 前期因子反映的 2 月份赤道地区纬向风异常是同期赤道印度洋-大陆桥地区异常强对流活动造成热带赤道大气环流显著异常变化的结果。

本文揭示了一个较为可信的征兆南海夏季风爆发迟早的前期因子, 但为何南海夏季风爆发迟早会与 2 月份赤道纬向风场有着这样密切的联系? 这种联系又是怎样维持并传播到南海夏季风爆发的月份, 其中的物理机制是怎样的? 前面的分析曾指出前期因子主要存在 4~6 年的周期, 这是否说明该因子与 ENSO 循环也有联系? 能否通过赤道波动的传播以及沃克环流的变化去解释南海夏季风爆发迟早与赤道纬向风场之间的关系? 我们将在后续工作中对这些问题作更进一步的探讨研究。

参考文献 (References)

[1] 丁一汇, 马鹤年. 东亚季风研究的现状. 见: 何金海编. 亚洲季风研究的新进展. 北京: 气象出版社, 1996. 1~14
Ding Yihui, Ma Henian. The present status and future of research of the East Asian monsoon. *The Recent Advances in Asian Monsoon Research* (in Chinese). He Jinhai, Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1996. 1~14
[2] 张庆荣, 梁必骥. 南沙海域海气相互作用与天气气候特征研究. 北京: 科学出版社, 1998. 186~208

Zhang Qingrong, Liang Biqi. *The Studies on the Air-Sea Interaction and the Characteristics of Synoptic Climatology in the Nansha Islands Sea Areas* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1998. 186~208
[3] 丁一汇, 李崇银 (编). 南海夏季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999. 192pp
Ding Yihui, Li Chongyin (Eds). *Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 192pp
[4] 何金海, 丁一汇, 高辉. 等 (编). 南海夏季风建立日期的确定与季风指数. 北京: 气象出版社, 2001
He Jinhai, Ding Yihui, Gao Hui, et al (Eds). *Definition of the Onset Dates of South China Sea Summer Monsoon and the Intensity Index* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 118~119
[5] 孙淑清, 陈隽. 异常东亚冬季风对夏季南海地区风场及热力场的影响. 气候与环境研究, 2000, **5** (4): 400~416
Sun Shuqing, Chen Jun. The variations of wind and thermodynamics fields in the South China Sea in summer during the anomaly winter monsoon. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (4): 400~416
[6] 赵永平, 陈永利. 南海暖池的季节和年际变化及其与南海夏季风爆发的关系. 热带气象学报, 2000, **16** (3): 202~211
Zhao Yongping, Chen Yongli. The seasonal and inter-annual variability of the South China Sea warm pool and its relation to the South China Sea monsoon onset. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2000, **16** (3): 202~211
[7] 何敏, 宋文玲. 南海夏季风对中国夏季降水的影响及预测. 见: 丁一汇, 李崇银编. 南海夏季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999. 112~116
He Min, Song Wenling. Effect and forecast of South China Sea summer monsoon on China summer rainfall. *Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean* (in Chinese). Ding Yihui, Li Chongyin, Eds. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 112~116
[8] 蓝光东, 温之平, 贺海晏. 南海夏季风爆发的大气热源特征及其爆发迟早原因的探讨. 热带气象学报, 2004, **20** (3): 271~280
Lan Guangdong, Wen Zhiping, He Haiyan. Characteristics of atmospheric heat source associated with the summer monsoon onset over the South China Sea and the possible mechanism responsibility for late or early onset of the monsoon. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2004, **20** (3): 271~280
[9] 王黎娟, 何金海, 管兆勇. 苏门答腊地区对流活动及其与南海夏季风建立的关系. 南京气象学院学报, 2004, **27** (4): 451~460
Wang Lijuan, He Jinhai, Guan Zhaoyong. Characteristics of convection activities over Sumatra area and its relationship

- with SCS summer monsoon onset. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2004, **27** (4): 451~460
- [10] 黄荣辉, 顾雷, 徐予红, 等. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系. *大气科学*, 2005, **29** (1): 20~36
- Huang Ronghui, Gu Lei, Xu Yuhong, et al. Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the East Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the tropical Western Pacific. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2005, **29** (1): 20~36
- [11] 戴念军, 谢安, 张勇. 南海夏季风活动的年代和年代际特征. *气候与环境研究*, 2000, **5** (4): 363~374
- Dai Nianjun, Xie An, Zhang Yong. Interannual and interdecadal variations of summer monsoon activities over South China Sea. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (4): 363~374
- [12] 贺海晏, 温之平, 简茂球. 近 50 年南海热带季风建立迟早的气候特征. 见: 何金海, 丁一汇, 高辉编. 南海夏季风建立日期的确定与季风指数. 北京: 气象出版社, 2001. 49~54
- He Haiyan, Wen Zhiping, Jian Maoqiu. The climatological feature of South China Sea tropical monsoon in recent 50 years. *Definition of the Onset Dates of South China Sea Summer Monsoon and the Intensity Index* (in Chinese). He Jinhai, Ding Yihui, Gao Hui, Eds. Beijing: China Meteorological Press, 2001. 118~119
- [13] 冯瑞权, 王安宇, 吴池胜. 南海夏季风建立的气候特征 I. 40 年平均. *热带气象学报*, 2001, **17** (4): 345~354
- Feng Ruiquan, Wang Anyu, Wu Chisheng, et al. Climatological features of the establishment of South China Sea summer monsoon I—40-year mean. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2001, **17** (4): 345~354
- [14] 李崇银, 张利平. 南海夏季风特征及其指数. *自然科学进展*, 1999, **9** (6): 536~541
- Li Chongyin, Zhang Liping. The feature and the index of the South China Sea summer monsoon. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 1999, **9** (6): 536~541
- [15] 姚永红, 钱永甫. 用湿位涡定义的南海西南季风指数及其与我国区域降水的关系研究. *南京大学学报 (自然科学)*, 2001, **37** (6): 781~788
- Yao Yonghong, Qian Yongfu. A study on the South China Sea monsoon index and the relationship between the index and regional rainfalls of China. *Journal of Nanjing University* (Natural sciences) (in Chinese), 2001, **37** (6): 781~788
- [16] 高辉, 何金海, 谭言科, 等. 40a 南海夏季风建立日期的确定. *南京气象学院学报*, 2001, **24** (3): 379~383
- Gao Hui, He Jinhai, Tan Yanke, et al. Definition of 40-year onset date of South China Sea summer monsoon. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2001, **24** (3): 379~383
- [17] 张秀芝, 李江龙, 闫俊岳, 等. 南海夏季风爆发的环流特征及指标研究. *气候与环境研究*, 2002, **7** (3): 321~331
- Zhang Xiuzhi, Li Jianglong, Yan Junyue, et al. A study of circulation characteristics and index of the South China Sea Summer monsoon. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (3): 321~331
- [18] 梁建茵, 吴尚森. 南海西南季风爆发日期及其影响因子. *大气科学*, 2002, **26** (6): 829~844
- Liang Jianyin, Wu Shangsen. A study of southwest monsoon onset date over the South China Sea and its impact factors. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2002, **26** (6): 829~844
- [19] Wang B, Lin H, Zhang Y S, et al. Definition of South China Sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon. *J. Climate*, 2004, **17**: 699~710
- [20] Gill A E. Some simple solutions for heat induced tropical circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106**: 447~462