

近 50 年东北冷涡异常特征及其与 前汛期华南降水的关系分析

苗春生 吴志伟 何金海 池艳珍

南京信息工程大学, 南京 210044

摘 要 利用中国气象局国家气象信息中心提供的 1951~2004 年中国 160 站华南前汛期 (5~6 月) 月平均降水、气温资料、欧洲中心提供的 ERA-40 再分析资料和 Reynolds 海温资料, 对东北冷涡与华南前汛期降水进行了统计分析, 定义了一个前汛期东北冷涡强度指数 (NECVI), 并研究了前汛期东北冷涡异常年同期东亚季风、西太平洋副高、对流层低层的垂直运动异常特征和前期全球海表温度 (SST) 的先兆信号, 结果表明: 前汛期东北冷涡强度与华南降水存在显著的正相关, 东北冷涡强年, 前期东亚冬季风偏弱, 同期东亚夏季风异常爆发提前且偏强, 西太平洋副高位置偏南, 华南地区低层上升运动发展, 降水偏多; 东北冷涡偏弱年, 前期东亚冬季风偏弱, 同期东亚夏季风爆发推迟且偏弱, 西太平洋副高位置偏北, 华南地区低层下沉运动发展, 降水偏少; 前汛期东北冷涡与前期中国近海海温存在显著的负相关关系, 前汛期东北冷涡异常强年, 前期对应着 La Niña 的成熟阶段或发展阶段, 而前汛期东北冷涡异常弱年则对应着 El Niño 的成熟阶段或发展阶段。

关键词 前汛期 东北冷涡 旱涝

文章编号 1006-9895 (2006) 06-1249-08

中图分类号 P426

文献标识码 A

The Anomalous Features of the Northeast Cold Vortex During the First Flood Period in the Last 50 Years and Its Correlation with Rainfall in South China

MIAO Chun-Sheng, WU Zhi-Wei, HE Jin-Hai, and CHI Yan-Zhen

Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the 1951 - 2004 monthly precipitation and surface air temperature of 160 Chinese stations supplied by National Climatic Center, the reanalysis data from ERA-40 datasets supplied by ECMWF with resolution $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ and the Reynolds sea surface temperature (SST) data with resolution $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$, the correlation between the northeast cold vortex (NECV) and the rainfall during the first flood period in South China has been investigated statistically and a season time-scale (May-June) northeast cold vortex index (NECVI) during the first flood period has been defined. The anomalous features of the East-Asian summer monsoon (EASM), the western Pacific subtropical high (WPSH) and the vertical movements in the low troposphere during the anomalous-NECV first flood periods have been analyzed and the preceding signals of the global SST in the 6 months before the first flood period in South China have been studied using the composite analysis method and the correlation analysis method. Results show that there is a significantly positive correlation between the NECV and the precipitation during the first flood period in South China, strong NECV related to more precipitation and vice versa. The anomalously strong-NECV first flood periods are often related to the weak EASM, more southward WPSH and strong ascending movements developing in the low troposphere in South China, which offer necessary atmospheric circulation conditions for the

increasing of precipitation during the first flood period in South China, whereas the anomalously weak-NECV first flood periods are usually associated with the strong EASM, more northward WPSH and strong descending movements developing in the low troposphere in South China, which offer necessary atmospheric circulation conditions for the decreasing of precipitation during the first flood period in South China. There is a significantly negative correlation between the NECV during the first flood period and the SST in the sea areas from Arabian Sea, across the Bay of Bengal, the South China Sea to the equatorial western Pacific during the preceding months before the first flood period, which implies that the preceding East Asian winter monsoon is weak on account of the small land-sea thermal difference. The equatorial eastern Pacific also exhibits a colder SST phase in the preceding months of high-NECV first flood periods, which corresponds to the mature phase or the developing phase of La Niña, and vice versa. All these offer some predictive signals for the NECV forecasting during the first flood periods.

The emphasis of this paper is concentrated on the long time scale, season scale, investigation on the NECV. However, the NECV is a very complicated weather phenomenon. The mechanisms of the interactions between the NECV and the precipitation during the first flood period in South China are still open questions and need further investigations.

Key words the first flood period, the Northeast cold vortex, droughts and floods

1 引言

长期以来,我国气象学家一直关注华南前汛期旱涝并对其进行了大量的研究。早在 20 世纪三四十年代,竺可桢^[1]和涂长望等^[2]就指出,华南前汛期降水是夏季风推进的产物,华南前汛期旱涝与季风的进退紧密相关。朱乾根和何金海^[3]明确提出东亚季风区可分为南海-西太平洋热带季风区和大陆-日本副热带季风区,并认为造成华南前汛期降水的夏季风属副热带季风。陶诗言和陈隆勋的研究^[4]显示在印度西南季风强的夏季,东亚夏季风往往偏弱。黄荣辉等^[5]提出,东亚夏季风雨带的季节内变化还与西太平洋暖池的热状态关系密切。吴国雄等^[6]和张琼等^[7]的研究表明华南、江南夏季旱涝与中国近海海温(如南海、印度洋等)关系密切。He 等^[8]的统计分析结果显示,夏季西太平洋副高的三个参数(面积、强度和脊线纬度)与东亚副热带季风降水存在很高的相关。综观前人关于华南前汛期旱涝的研究,对于热带低纬地区的影响因子考虑较多,而源自北半球中高纬地区的天气系统考虑较少。

事实上,中高纬天气系统对华南前汛期旱涝同样有着重要的影响作用^[9~12],而东北冷涡正是这样天气系统的重要代表,它是东亚中高纬大气环流系统中的重要组成部分,一次东北冷涡活动的生命周期一般为 5~7 天,因此它是一个天气尺度的系统。孙力^[13]从天气学的角度对东北冷涡的影响作用和某些天气学特征进行了研究。然而,从空间上看东

北冷涡不仅对东北地区的天气气候有着很大影响,而且可引导高纬的冷空气南下影响中低纬度地区,从时间上看频繁的东北冷涡活动,不仅影响到中短期天气,而且对长期天气同样有着重大影响。这也是本文的研究出发点。开展这些研究,不仅可以了解中高纬系统对华南前汛期降水的作用,而且可以为该地区的短期气候预测提供具有参考意义的结果。

2 资料和方法

本文所用月平均降水和气温资料取自中国气象局国家气象信息中心提供的 1951~2004 年中国 160 站月平均气温,1958~2002 年高度场、风场和海平面取自欧洲中心 ERA-40 再分析资料集(水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$),海温取自 Reynolds 海温资料集(水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$)。

对 35 年资料(1956~1990 年)的统计分析^[13]表明,5 月和 6 月月平均可出现东北冷涡 12.5 天和 15.1 天,其对天气影响最为显著的特征是影响地区出现持续低温连阴雨,尤以持续低温特征更为显著。因此低温持续时间越长,则导致影响区域的前汛期地面平均气温偏低,表明东北冷涡活动越频繁,强度越强,反之则表明东北冷涡较弱。基于此,本文首先定义一个前汛期东北冷涡强度指数(NECVI):参考 Ting 和 Wang^[14]采用统计手段划分降水区的方法,先计算全国 160 站 5~6 月地面平均气温标准差,得到东北地区地面气温变率最大的测站,以之为基点站再计算其与全国 160 站的单

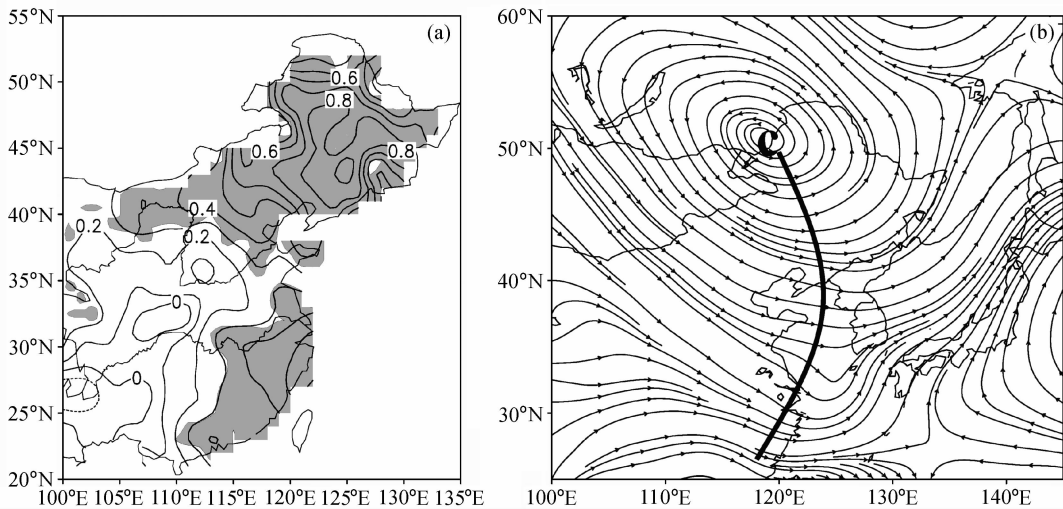


图 1 (a) 以长春站为基点的 5~6 月地面气温单点相关分布 (阴影表示置信度检验达 95% 的区域); (b) NECVI 异常强年和异常弱年 5~6 月 500 hPa 合成差值流场 (黑粗线为槽线)

Fig. 1 (a) Correlation between Changchun's and 160 stations' surface air temperatures during May–Jun in China (the areas with the 95% significance level are shaded); (b) the difference of 500 hPa streamline fields between high- and low-NECVI (northeast cold vortex index) first flood periods in South China (the bold line is the trough line)

表 1 1951~2004 年前汛期标准化东北冷涡强度指数 (NECVI)

Table 1 The NECVI during the first flood period in South China from 1951 to 2004

年份 Year	NECVI	年份 Year	NECVI	年份 Year	NECVI	年份 Year	NECVI	年份 Year	NECVI
1951	−0.25	1962	0.85	1973	1.05	1984	−0.30	1995	0.40
1952	−0.52	1963	−0.54	1974	1.00	1985	−0.37	1996	−1.03
1953	0.26	1964	0.26	1975	0.20	1986	−1.11	1997	−1.14
1954	2.32	1965	0.24	1976	1.44	1987	0.74	1998	−0.67
1955	0.42	1966	0.43	1977	0.48	1988	−0.59	1999	−0.47
1956	1.60	1967	−1.25	1978	−0.52	1989	0.23	2000	−2.56
1957	1.40	1968	0.34	1979	0.38	1990	0.10	2001	−2.51
1958	0.52	1969	1.33	1980	−0.60	1991	0.05	2002	−1.61
1959	0.72	1970	0.18	1981	0.47	1992	0.95	2003	−1.01
1960	1.82	1971	0.08	1982	−0.10	1993	0.13	2004	−1.42
1961	−0.58	1972	0.43	1983	−0.01	1994	−1.83		

点相关 (如图 1a 所示), 阴影所覆盖的显著相关区域 (通过 95% 水平的置信度检验) 有着与基点站较为一致的地面气温变率, 计算该区域内测站地面气温平均值, 再对 1951~2004 年该区域地面气温均值进行标准化, 在该标准化时间序列前加负号, 将之定义为前汛期东北冷涡强度指数, 表 1 给出 1951~2004 年前汛期标准化东北冷涡强度指数。

3 前汛期东北冷涡异常年 500 hPa 流场的特征

为进行合成分析, 选取标准化 NECVI 最大的 10 年和最小的 10 年分别作为东北冷涡异常强年和

异常弱年的代表年份 (表 2)。由于 ERA-40 资料集的时间长度为 1958~2002 年, 因此本文实际进行合成分析的东北冷涡异常强年为 1960、1962、1969、1973、1974、1976 和 1992 年, 异常弱年为 1967、1986、1994、1996、1997、2000、2001 和 2002 年。

东北冷涡在 500 hPa 天气图上主要表现为在蒙古东部至我国东北地区存在一气旋性活动中心, 为验证本文所定义的前汛期东北冷涡强度指数 NECVI 是否能刻画这一特征, 我们计算了东北冷涡异常强年和异常弱年的 5~6 月 500 hPa 合成差值流场 (如图 1b 所示)。由图 1b 可以清楚看到, 从蒙古至我国东北地区存在显著的气旋性差值环流, 环

表 2 1951~2004 年最高(低)前 10 位的前汛期 NECVI 及对应的标准化降水量 (P_n)

Table 2 The indices and their corresponding normalized precipitation (P_n) during the first flood periods of the 10 highest (lowest) NECVI years from 1951 to 2004

年份	高 NECVI		年份	低 NECVI	
Year	High NECVI	P_n	Year	Low NECVI	P_n
1954	2.32	2.53	2000	-2.56	-1.27
1960	1.82	0.22	2001	-2.51	-0.24
1956	1.60	0.23	1994	-1.83	-0.17
1976	1.44	0.18	2002	-1.61	-0.67
1957	1.40	0.82	2004	-1.42	-1.31
1969	1.33	0.11	1967	-1.25	-0.99
1973	1.05	2.05	1997	-1.14	-0.53
1974	1.00	0.3	1986	-1.11	-0.7
1992	0.95	0.11	1996	-1.03	-0.92
1962	0.85	2.11	2003	-1.01	-0.17

流中心位于东北北部,这表明前汛期 NECVI 异常强年东北地区有气旋性环流发展,而 NECVI 异常弱年气旋性环流是减弱的,反气旋性环流是发展的。此外,从我国东北经黄海至华南地区为一显著的高空槽所控制,表明东北冷涡异常强年冷空气较活跃并随槽后引导气流扩散南下影响华南地区,而东北冷涡异常弱年情况正好相反。综上所述 NECVI 值的大小反映了东北低涡的强弱,因此可以将它作为一个衡量东北冷涡强度的定量指标。

4 前汛期东北冷涡与华南降水的关系

为研究前汛期东北冷涡与华南降水的关系,计算了 5~6 月的 NECVI 与中国 160 站前汛期降水的相关系数(图 2a)。由图 2a 可见,在华南和江南地区存在大范围显著的正相关,即当 NECVI 偏大时,东北冷涡偏强,华南前汛期降水偏多,当 NECVI 偏小时,东北冷涡偏弱,华南前汛期降水偏少。如果将华南地区阴影所覆盖的 18 个站的平均降水量定义为该地区的一个华南前汛期降水指数 SCMYI,计算 NECVI 时间序列和 SCMYI 时间序列的相关系数达 0.52,通过 99.9% 的置信度检验。由图 2b 可见 SCMYI 的变率与 NECVI 的变率趋于一致,这些均表明东北冷涡和华南前汛期降水确实存在显著的相关关系。

此外,从年代际时间尺度上看,近 50 年来 SCMYI 和 NECVI 似乎都存在下降的趋势,在 1976 年以前前汛期东北冷涡较强,华南前汛期降水也偏

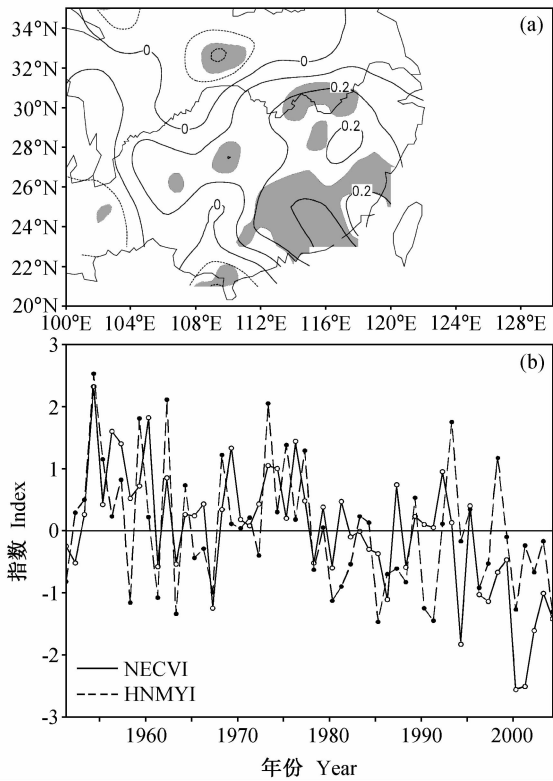


图 2 (a) 1951~2004 年 NECVI 与华南前汛期降水的相关分布(阴影表示置信度检验达 95% 的区域);(b) 1951~2004 年 NECVI 与华南前汛期降水指数 SCMYI 时间序列

Fig. 2 (a) Correlation between the NECVI and precipitation in South China during the first flood period (May-June) from 1951 to 2004 (the correlation coefficients with confidence level exceeding 95% are shaded); (b) time series of the NECVI during the first flood period and the SCMYI (South China Meiyu Index) from 1951 to 2004

多,而 1976 年以后前汛期东北冷涡较弱,华南前汛期降水也偏少,这表明在年代际尺度上前汛期东北冷涡和华南前汛期降水同样存在一定的相关关系。

从表 2 可以看到 ($P_n = \Delta P / \sigma$, ΔP 为华南前汛期降水距平, σ 为其标准差),前汛期东北冷涡最强的 10 年中,华南前汛期降水全部偏多,甚至有 3 年偏多超过 2 倍标准差,而东北冷涡最弱的 10 年中,华南前汛期降水全部偏少,其中 7 年偏少超过 0.5 倍标准差。这些进一步验证了东北冷涡和华南前汛期降水之间的显著正相关关系。

5 前汛期东北冷涡异常年同期东亚季风、西太副高和低层垂直运动的特征

为研究前汛期东北冷涡异常年同期东亚夏季风的特征,给出了东北冷涡异常强年与异常弱年 5~6

月的 850 hPa 合成风差值场 (图 3)。在蒙古高原有一个显著的差值反气旋中心存在, 而我国东北地区则为显著的差值气旋中心所控制, 两个中心之间的差值偏北气流直达华南地区。此外, 华南和南海地区 850 hPa 合成风差值场呈现一偶极子模态, 即华南地区为一差值气旋中心, 而南海地区为一差值反气旋中心, 这表明前汛期东北冷涡异常强年对流层低层华南地区有低值系统发展, 气旋中心西北侧偏北风差值气流加强, 东亚夏季风偏弱, 东北冷涡异常弱年情况正好相反。以上结果均显示, 前汛期东北冷涡异常强年同期东亚夏季风显著偏弱, 而东北

冷涡异常弱年东亚夏季风较强。前汛期东北冷涡的异常和同期东亚季风的异常存在显著的联系。

为探讨前汛期东北冷涡异常年同期西太平洋副高的异常活动, 计算异常年 5~6 月份合成 TTR 场 (图 4)。TTR 是 ERA-40 资料集中的对外长波辐射资料, 相当于 NCEP 资料集中的 OLR 资料。TTR 的低值中心对应于对流发展旺盛的区域, 从 TTR 的高低中心的配置变化可以较清楚地反映副高的变化。东北冷涡异常强年 (图 4a) 热带西太平洋 (0°~15°N) 存在大范围显著的 TTR 正距平异常区, 而在副热带地区 (15°N~30°N) 为大范围显著的

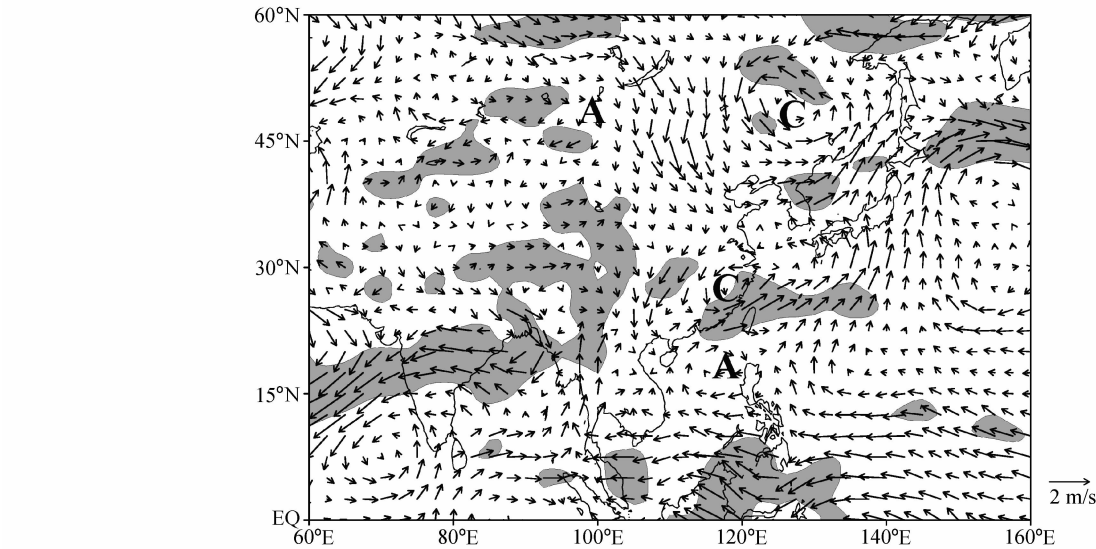


图 3 华南前汛期东北冷涡异常强年与异常弱年的 850 hPa 合成风差值场。阴影表示置信度检验达 95% 的区域
Fig. 3 Composite difference of the 850 hPa wind fields between high- and low-NECV first flood periods in South China. The areas exceeding the 95% confidence level are shaded

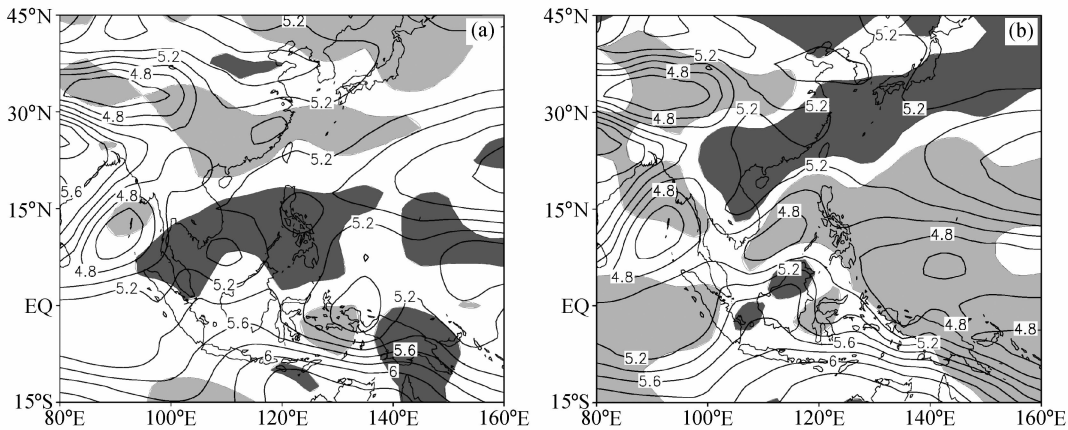


图 4 华南前汛期东北冷涡异常年合成 TTR 场 (单位: $10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 东北冷涡异常强年; (b) 东北冷涡异常弱年。阴影表示置信度检验达 95% 的区域, 浅色为显著负异常, 深色为显著正异常

Fig. 4 The composite top thermal radiation ($10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) field for anomalous NECV years; (a) Strong NECV years; (b) weak NECV years. The light (dark) shading represents significantly negative (positive) anomaly with 95% significance level

TTR 负距平异常区,表明西太副高位置偏南;东北冷涡异常弱年(图 4b)情况正好相反,热带西太平洋(0~15°N)存在大范围显著的 TTR 负距平异常区,而在副热带地区(15°N~30°N)为大范围显著的 TTR 正距平异常区,表明西太副高位置偏北。这表明前汛期东北冷涡的异常与西太副高的异常相关联,东北冷涡强年副高往往偏南,而东北冷涡弱

年副高往往偏北。

为研究前汛期东北冷涡异常年同期对流层低层垂直运动特征,给出东北冷涡异常强年与异常弱年的 700 hPa 合成垂直速度差值场(图 5),总体特征是:华南地区为一显著带状差值上升运动区所覆盖,即前汛期东北冷涡异常强年华南低层上升运动发展,为华南前汛期降水偏多提供了必要的动力条件,而东北冷涡异常弱年华南地区对流层低层上升运动减弱、下沉运动发展,使得华南前汛期降水偏少。

6 前汛期东北冷涡异常年海温的异常

为研究前期海表温度对前汛期东北冷涡强度的影响,计算了前汛期 NECVI 指数与其前期 1~6 月的全球海表温度 SST 的相关系数(如图 6 所示)。从前一年 11 月开始到当年 4 月份,可以看到从南中国海到西太平洋、孟加拉湾、阿拉伯海以及印度洋北部均为显著负相关区,就是说前汛期东北冷涡异常强年前期,上述海区的海表温度偏低。我们知道海陆热力差异是产生季风的驱动力之一^[15],前期冬季当海温偏低时,则海陆热力差异变小,导致东亚冬季风强度偏弱;反之,前汛期东北冷涡异常弱年前期,上述海区的海表温度偏高,海陆热力差

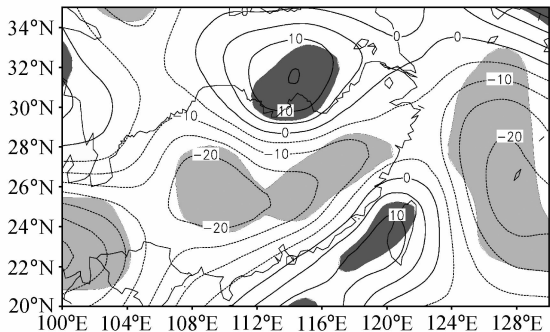


图 5 华南前汛期东北冷涡异常强年与异常弱年的 700 hPa 合成垂直速度差值场(单位: 10^{-3} hPa/s)。阴影表示置信度检验达 95% 的区域,浅色为显著上升运动,深色为显著下沉运动

Fig. 5 Composite difference of the 700 hPa vertical velocity (10^{-3} hPa/s) fields between high- and low-NECVI first flood periods in South China. The light (dark) shading represents ascending (descending) motion with 95% significance level

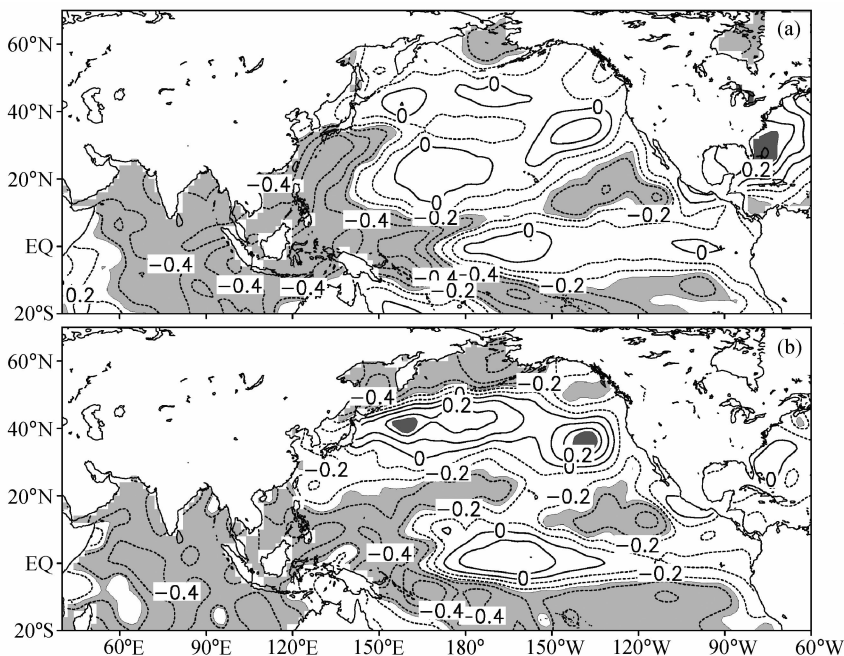


图 6 前汛期东北冷涡强度指数 NECVI 与前期海表温度的相关系数: (a) 前一年 11 月; (b) 当年 4 月。阴影为置信度检验达 95% 的区域

Fig. 6 The correlation coefficient between NECVI during the first flood period and the SST fields in the preceding months: (a) The preceding Nov; (b) the preceding Apr. The areas with the 95% confidence level are shaded

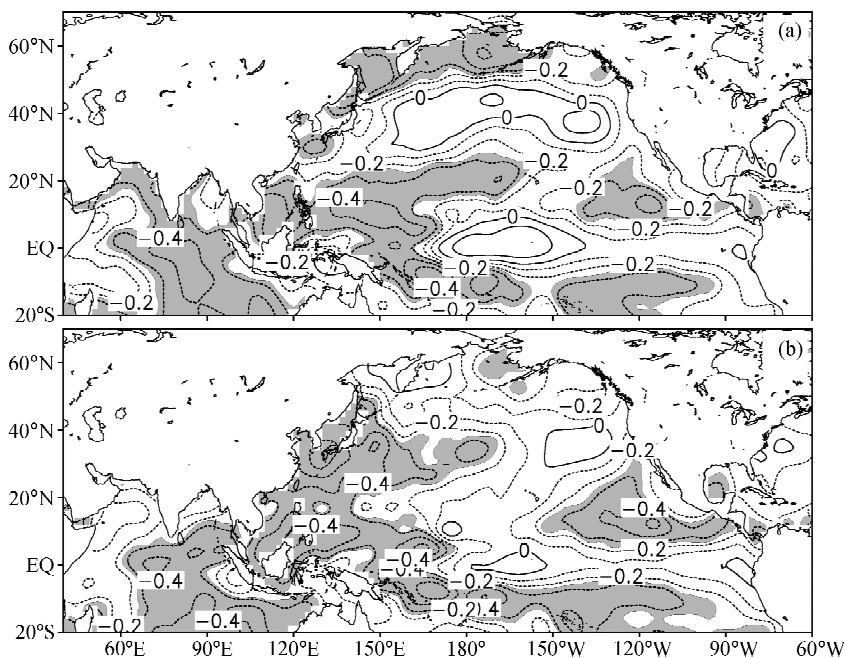


图 7 前汛期东北冷涡强度指数 NECVI 与同期海表温度的相关系数：(a) 当年 5 月；(b) 当年 6 月。阴影为置信度检验达 95% 的区域

Fig. 7 The correlation coefficient between NECVI and the SST fields during the first flood period: (a) May; (b) Jun. The areas with the 95% confidence level are shaded

异加大，导致东亚冬季风强度偏强。因此，前汛期东北冷涡异常强（弱）年前期东亚冬季风偏弱（强）。到了 5、6 月份（图 7），从南中国海到西太平洋、孟加拉湾、阿拉伯海以及印度洋北部依然为显著负相关区，表明前汛期东北冷涡异常强年同期上述海区的海表温度偏低，海陆热力差异加大，东亚夏季风爆发提前且强度较强，而前汛期东北冷涡异常弱年同期东亚夏季风爆发推迟且强度较弱。

另外，我们还注意到在前一年 11 月份（图 6a）赤道东太平洋有显著的 SST 正相关区向西发展，并逐月向西传播（图略），至当年 4 月（图 6b）在北美沿岸至赤道东太平洋地区出现大范围显著负相关区，表明前汛期东北冷涡异常强年前期，赤道东太平洋海温呈现降低的趋势。因此，前汛期东北冷涡异常强年前期对应着 La Niña 的成熟阶段或发展阶段，而前汛期东北冷涡异常弱年前期对应着 El Niño 的成熟阶段或发展阶段。事实上，在 10 个高 NECVI 指数年中，有 6 年为 La Niña 年，而 10 个低 NECVI 指数年中有 6 年为 El Niño 年。

7 结论和讨论

华南前汛期降水异常时有发生，本文从气候的

时间尺度（5~6 月）对东北冷涡与华南前汛期降水的关系进行了研究，重点分析前汛期东北冷涡异常年同期大尺度大气环流场和前期海温场异常的一些基本特征。根据以上分析，我们可以得出以下结论：

（1）前汛期东北冷涡和华南降水有显著的正相关关系，东北冷涡偏强时，华南降水偏多，而东北冷涡偏弱时，华南降水偏少。

（2）前汛期东北冷涡偏强时，前期东亚冬季风异常偏弱，同期东亚夏季风爆发提前且强度较强，西太副高位置偏南，华南地区低层上升运动发展；东北冷涡偏弱时，前期东亚冬季风较强，同期东亚夏季风爆发推迟且强度较弱，西太副高位置偏北，华南地区低层下沉运动发展。

（3）前汛期东北冷涡和前期中国近海海温存在显著的负相关关系，同时前汛期东北冷涡异常强（弱）年，前期对应着 La Niña 的成熟阶段或发展阶段（El Niño 的成熟阶段或发展阶段）。

东北冷涡究竟通过何种可能物理机制作用于华南前汛期降水？从前面的分析不难看出，东北冷涡异常强年，往往伴随着较强的干冷空气扩散南下，与此同时同期东亚夏季风爆发提前且强度较强，东亚夏季风向北输送大量的暖湿气流，这就导致华南

地区环流的斜压性加大,随着斜压不稳定的发展,最终造成华南地区前汛期降水偏多。

然而,由于东北冷涡是很深厚的系统,从低层到高空都有系统反映,如何更好地定义东北冷涡,尚需进一步探讨。同时东北冷涡是一个天气尺度系统,每一次东北冷涡活动与不同环境场相配合造成华南前汛期降水异常的机制并不完全相同,需要区别研究。

致谢 感谢中国气象局国家气象信息中心和欧洲中心(ECMWF)提供的相关气象资料。

参考文献 (References)

- [1] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量. 地理学报, 1934, **1**: 1~27
Zhu K Z. The enigma of southeast monsoon in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1934, **1**: 1~27
- [2] 涂长望, 黄士松. 中国夏季风之进退. 气象学报, 1944, **18** (1): 1~20
Tu C W, Huang S S. The advance and withdraw of Chinese summer monsoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1944, **18** (1): 1~20
- [3] 朱乾根, 何金海. 亚洲季风建立及其中期振荡的高空环流特征. 热带气象学报, 1985, **1** (1): 9~18
Zhu Q G, He J H. Features of the upper circulation in the establishment of Asian monsoon in 1979 and its medium-range oscillation. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1985, **1** (1): 9~18
- [4] Tao S Y, Chen L X. The East Asian summer monsoon. Proceedings of International Conference on Monsoon in the Far East. Tokyo, Nov. 5-8, 1985, 1~11
- [5] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. 大气科学, 1994, **18** (2): 141~151
Huang R H, Sun F Y. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western Pacific warm pool on the summer climate anomalies in East Asia. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1994, **18** (2): 141~151
- [6] 吴国雄, 刘还珠. 降水对热带海表温度异常的邻域响应 I. 数值试验. 大气科学, 1995, **19** (4): 422~434
Wu G X, Liu H Z. Neighborhood response of rainfall to tropical sea surface temperature anomalies. Part I: Numerical experiment. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1995, **19** (4): 422~434
- [7] 张琼, 刘平, 吴国雄. 印度洋和南海海温与长江中下游旱涝. 大气科学, 2003, **27**: 992~1006
Zhang Q, Liu P, Wu G X. The relationship between the flood and drought over the lower reach of the Yangtze River valley and the SST over the Indian Ocean and the South China Sea. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 2003, **27**: 992~1006
- [8] He J H, Zhou B, Wen M, et al. Vertical circulation structure, interannual variation features and variation mechanism of western Pacific subtropical high. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (4): 497~510
- [9] Li J P, Wang J. A modified zonal index and its physical sense. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(12): 1632, doi: 10.1029/2003GL017441
- [10] Ju J H, Lü J M, Cao J, et al. Possible impacts of the Arctic oscillation on the interdecadal variation of summer monsoon rainfall in East Asia. *Adv. Atmos. Sci.*, 2005, **22**(1): 39~48
- [11] Wu Z W, Li J P, He J H, et al. The occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid- and lower reaches of the Yangtze River. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**, L05813, doi: 10.1029/2005GL024487
- [12] 吴志伟, 江志红, 何金海. 近 50 年华南前汛期降水、江淮梅雨和华北雨季旱涝特征对比分析. 大气科学, 2006, **30**: 391~401
Wu Z W, Jiang Z H, He J H. The compare analysis of flood and drought features among the first flood period in South China, Meiyu and rainy season in North China in the past 50 years. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 2006, **30**: 391~401
- [13] 孙力. 东北冷涡持续活动的分析研究. 大气科学, 1997, **21** (3): 297~307
Sun L. A study of the persistence activity of northeast cold vortex in China. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1997, **21** (3): 297~307
- [14] Ting M F, Wang H. Summer time U. S. precipitation variability and its relation to Pacific sea surface temperature. *J. Climate*, 1997, **10**(8): 1853~1873
- [15] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 362pp
Chen L X, Zhu Q G, Luo H B, et al. *East-Asian Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 362pp