马音,陈文,冯瑞权,等. 2012. 我国东部梅雨期降水的年际和年代际变化特征及其与大气环流和海温的关系 [J]. 大气科学, 36 (2): 397-410, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11050. Ma Yin, Chen Wen, Fong Soikun, et al. 2012. Interannual and interdecadal variations of precipitation over eastern China during Meiyu season and their relationships with the atmospheric circulation and SST [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 397-410.

我国东部梅雨期降水的年际和年代际变化特征 及其与大气环流和海温的关系

马音1,2 陈文1 冯瑞权3 梁嘉静3 梁永权3

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心,北京 100190
 2 中国科学院研究生院,北京 100049
 3 澳门地球物理暨气象局,澳门

摘 要 基于我国 160 站 59 年 (1951~2009 年) 的月降水观测资料、美国气象环境预报中心和国家大气研究中 心 (NCEP/NCAR) 提供的再分析资料和 Hadley 中心的海表温度 (Sea Surface Temperature, 简称 SST) 资料, 对 我国东部 (100°E 以东, 15°N~40°N) 梅雨期 (6 月和7月) 降水的时空变化特征进行了分析, 结果发现: 我国梅 雨期降水主要表现为长江一华南反位相变化型和江南一致变化型两个模态。通过波谱分析的方法将梅雨期降水 量变化中的年际(周期<8年的部分)和年代际(周期≥8年的部分)两种时间尺度进行分离,对这两种时间尺度 上降水的时空变化规律分别进行分析,结果发现:无论是在年际还是年代际时间尺度上,我国东部梅雨期降水都 主要表现为长江一华南反位相变化型和江南一致变化型,其中长江一华南反位相变化型有明显的年际和年代际 变化,而江南一致变化型则主要表现为年代际变化。进一步对与这两种不同时间尺度相联系的大气环流和海温 异常进行分析,结果发现:与长江一华南反位相变化型相联系的大气环流异常在年际时间尺度上表现为欧亚大陆 中高纬的双阻型,从低纬到高纬"+-+"的经向波列分布,东亚副热带急流显著增强;在年代际时间尺度上表 现为欧亚大陆一致的正位势高度异常,副热带高压增强北抬。海温异常在年际时间尺度上主要是前期日本附近 海域和印度洋海区以及同期南海附近海域的正海温异常:在年代际时间尺度上主要是同期北太平洋中部"马蹄 形"的负海温异常。与江南一致变化型相联系的大气环流异常在年际时间尺度上表现为欧亚大陆中高纬的东阻 型, 东亚沿岸从低纬到高纬"十一十"的经向波列分布; 在年代际时间尺度上表现为大陆低压显著减弱, 东亚副 热带急流减弱南移。海温异常在年际时间尺度上主要是前期北太平洋的负海温异常和澳大利亚东部沿岸的正海 温异常,以及同期南海附近海域的正海温异常,在年代际时间尺度上主要是前期东亚沿岸海域以及同期南海、热 带西太平洋海区的正海温异常。

关键词 梅雨期降水 年际变化 年代际变化 大气环流异常 海温异常
 文章编号 1006 - 9895 (2012) 02 - 0397 - 14
 中图分类号 P461
 文献标识码 A
 doi: 10.3878/j.issn.1006 - 9895.2011.11050

Interannual and Interdecadal Variations of Precipitation over Eastern China during Meiyu Season and Their Relationships with the Atmospheric Circulation and SST

MA Yin^{1, 2}, CHEN Wen¹, FONG Soikun³, LEONG Kacheng³, and LEONG Wengkun³

1 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

2 Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

3 Macau Geophysical and Meteorological Bureau, Macau, China

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421405, 国家自然科学基金资助项目 41025017、40921160379

作者简介 马音, 女, 1984年出生, 博士研究生, 主要从事季风和气候动力学研究。E-mail: mayin@mail. iap. ac. cn

收稿日期 2011-03-07, 2011-05-03 收修定稿

Abstract Based on the monthly mean rainfall data at 160 China stations, the National Centers for Environmental Prediction /National Centers for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis dataset, and HadISST1 dataset for 1951 - 2009, the temporal evolution and spatial distribution of precipitation over eastern China (15°N - 40°N, east of 100°E) during the Meiyu season (June and July) are investigated with the empirical orthogonal function (EOF). It shows that there are two dominant modes, the first EOF mode depicting a precipitation oscillation between the Yangtze River valley and South China, and the second EOF mode describing a consistent precipitation anomaly over the south of the Yangtze River. In this study two time scales are separated as: interannual component whose period is shorter than eight years and interdecadal component whose period is longer than eight years. After analyzing the precipitation at these two time scales during Meiyu season, it is found that for both of the annual scale and the decadal scale, the first two leading modes are a precipitation oscillation between the Yangtze River valley and South China, and a consistent precipitation anomaly over the south of the Yangtze River. The result of the comparison between these two time scales shows that the pattern for the precipitation oscillation between the Yangtze River valley and South China has clear interannual and interdecadal variations, and the pattern for the consistent precipitation anomaly over the south of the Yangtze River is mainly characterized by interdecadal variation. The atmospheric circulation and the sea surface temperature (SST) patterns associated with these two modes are investigated through the regression / correlation method. It shows that although the leading modes of interannual component are similar to those at the decadal scale, the associated circulation and SST anomalies are quite different. The atmospheric circulation anomalies associated with the pattern which shows the precipitation oscillation between the Yangtze River valley and South China for the interannual component include the double blockings at mid - high latitudes and the meridional wave train over Eurasia, and the East Asian subtropical jet shows significant positive anomaly. The atmospheric circulation anomalies associated with this pattern of the interdecadal component include the consistent positive geopotential height anomaly over Eurasia, and the subtropical high over East Asia strengthens and shifts northward. The SST anomalies associated with this pattern of the interannual component is mainly represented by the positive SST anomaly over the ocean around Japan and the Indian Ocean during the preceding winter and spring, and over the South China Sea during the simultaneous Meiyu period. The SST anomalies associated with this pattern of the interdecadal component is mainly represented by the negative horseshoe SST anomaly over the North Pacific during the simultaneous Meiyu period. The atmospheric circulation anomalies associated with the pattern which shows the consistent precipitation anomaly over the south of the Yangtze River for the interannual component are characterized by the Okhotsk blocking high and the meridional wave train in East Asia. And the atmospheric circulation anomalies associated with this pattern of the interdecadal component include the positive geopotential height anomaly over Eurasia and the East Asian subtropical jet weakens and shifts southward. The SST anomalies associated with this pattern of the interannual component mainly are represented by the negative SST anomaly over the North Pacific and the positive SST anomaly over the east coast of Australia during the preceding winter and spring, and the positive SST anomaly over the South China Sea during the simultaneous Meiyu season. The positive SST anomalies over the coast seas of East Asia during the preceding winter and spring, and those over the South China Sea and the tropical western Pacific during the simultaneous Meiyu period are highly correlated with this pattern of the interdecadal component.

Key words precipitation during the Meiyu season, interannual variation, interdecadal variation, atmospheric circulation anomaly, SST anomaly

1 引言

梅雨期是东亚夏季风随季节由南向北推进过程 中的重要阶段,受东亚夏季风的影响,我国东部地 区梅雨期降水具有相当显著的年际变化。一些研究 对梅雨的年际变化进行了分析讨论(陶诗言等, 1988;邓爱军等,1989;徐卫国和江静,2004)。近 年来,随着观测资料长度的不断增加,人们发现我 国梅雨期降水不仅年际变异大,而且具有明显的年 代际变化特征。魏凤英和谢宇(2005)利用小波分 析发现梅雨存在 2~3 年和 6~7 年周期振荡。徐群 (2007)的研究表明,长江中下游梅雨在 20 世纪 70 年代末发生了一次强年代际突变,从1958~1978 年的弱梅雨时段突变为1979~1999年的强梅雨时 段。平凡等(2006)对长江流域汛期降水进行分 析,发现影响年代际变化的因子和年际变化的因子 是不同的。吕俊梅等(2009)对最近一百多年来中 国东部降水的跃变特征进行分析,指出长江中下游 降水发生了5次年代际尺度的跃变。在对梅雨期降 水年际变化进行研究时,往往会将年代际变化也混 淆进来,特别是利用较长时间的资料进行分析时更 是这样。因而在本研究中,我们将试图对梅雨期降 水变化中存在的年际时间尺度和年代际时间尺度进 行分离,分别予以讨论。

梅雨作为东亚气候系统的成员,受到多种大尺 度环流形势的影响。张庆云等(2003)的研究表 明,中高纬度的阻塞高压、西太平洋副热带高压、 中纬度西风急流等环流系统的变化都对我国梅雨期 降水具有直接的影响。张顺利等(2002)的研究指 出,当西太平洋副热带高压、南海季风涌、中高纬 度冷空气和青藏高原中尺度对流系统处于活跃阶段 时,长江流域易出现致洪暴雨。龚道溢等(2002) 研究发现5月北极涛动(Arctic Oscillation,简称 AO) 指数与随后夏季长江中下游地区降水存在显 著的负相关。以往许多研究也都指出,对应东亚夏 季降水的异常,往往存在有某些关键区域的海表面 温度异常(黄荣辉和孙凤英, 1994), 有关海温与我 国夏季降水的关系的研究已有不少。黄荣辉和陈文 (2002)的研究指出, ENSO (El Niño and Southern Oscillation) 循环对东亚夏季风降水有很大影响, 而热带西太平洋海温通过影响对流亦可造成江淮夏 季降水异常 (Huang and Sun, 1992)。倪东鸿等 (2004)的研究发现,当夏季黑潮海温为正异常时, 长江流域降水偏多,反之则偏少。 宗海锋等 (2006)分析了与梅雨期降水不同空间分布型相联系 的冬季海温关键海域。基于以往的研究,本文将分 别研究年际时间尺度和年代际时间尺度上, 与梅雨 期降水相关联的大气环流和海温异常,以便对与不 同时间尺度相联系的可能的物理原因有更好的认识。

以往对于梅雨期降水的研究多用 6、7、8 月代 表整个夏季进行分析,而已有研究 (Tao and Chen, 1987; Ding, 2004) 表明,我国夏季降水的分布具 有明显的随季节推进的特点: 5、6 月份为华南前汛 期,降水主要位于华南地区; 6、7 月份为梅雨期, 降水主要位于长江流域;8月份为华北雨季,降水 主要位于华北和东北。这使得用6、7、8月平均降 水代表夏季降水进行分析可能存在一定问题,因为 这种做法可能会模糊降水区域随时间分布的不均匀 性,从而混淆不同雨期降水的变化特征。本文着重 讨论梅雨期降水,从气候平均来看,江淮流域梅雨 期降水主要集中在6、7月份,因此,我们将以6、7 月作为梅雨期,考察梅雨期降水的时空变化特征, 分别对年际和年代际时间尺度变化进行研究并加以 比较,同时探讨这两个时间尺度上梅雨期降水与大 气环流和海温的关系。

2 资料和方法

本文所使用的资料包括国家气候中心整编的中国 160 个测站的月平均降水资料,水平分辨率为2.5°×2.5°的 NCEP/NCAR 月平均再分析资料 (Kalnay et al., 1996),以及英国气象局哈德莱中心 (Met Office Hadley Centre)提供的水平分辨率为 1°×1°的海表温度资料 (Rayner et al., 2003)。其中再分析资料主要使用了 500 hPa 位势高度场、850 hPa 位势高度场、海平面气压场和 200 hPa 纬向风场。本文研究的时间段为 1951~2009 年,共计 59 年。

同期分析均基于 6、7 月份平均的资料来进行, 在寻找海温的前期信号时,以前一年 12 月至当年 2 月为前冬,而当年 3 月至 5 月为前春。本文对所有 资料先做傅里叶分解(黄嘉佑,2004),取时间尺度 <8 年的信号为年际变化部分,而≥8 年的信号为 年代际变化部分。主要采用经验正交函数(Empirical Orthogonal Function,简称 EOF)分析方法 (Jolliffe,1986)来研究中国东部 1951~2009 年夏 季降水的年际及年代际变化规律,并利用线性回归 和相关分析的方法来研究我国东部夏季降水与大气 环流和海温背景之间的关系。需要说明的是,在对 年际和年代际分量进行回归和相关分析时,本文根 据施能(2002)给出的方法计算了有效自由度,然 后根据有效自由度进行统计上的信度检验。

3 我国东部梅雨期降水的时空变化规 律及其时间尺度的分离

3.1 我国东部梅雨期降水的时空变化规律 首先对 1951~2009 年(共 59 年) 我国东部梅 雨期平均降水进行 EOF 分析,由于我国夏季降水 主要集中在东部地区,因此本文 EOF 分析选取的 区域是 100°E 以东、15°N~40°N,为了能表示出实 际的变化量级,EOF 的空间模态用特征向量场对 标准化的时间序列进行回归后得到的空间分布来表 示。

图1给出了降水 EOF 分析的前两个模态,第 一和第二模态分别解释了总方差的17%和16%。 从 EOF 第一模态 (EOF1) 的空间分布可以看出, 我国梅雨期降水最主要的模态表现为华南大部分地 区的降水异常与长江淮河流域降水异常的反位相分 布型;也就是说,当华南地区降水异常偏少时,长 江中下游及淮河流域往往降水异常偏多,反之亦 然。相应的时间序列表现出明显的年际变化特征, 尤其是 20 世纪 90 年代末以来表现出 2~3 年的周 期变化特征:同时从滑动平均的结果可以看出降水 还存在着年代际变化特征,在20世纪60年代以前 基本为正位相,60年代到70年代表现为弱的负位 相,70年代末到90年代初为正位相,从90年代初 又转变为负位相。EOF 第二模态(EOF2)的空间 分布则主要表现为长江以南大部分地区一致的降水 异常,在长江和黄河之间有很弱的相反的降水异 常。并且与此相对应的时间序列存在非常明显的年 代际变化,从滑动平均的结果可以看出在 20 世纪 90年代初以前基本表现为负位相,而在 90年代初 存在显著的年代际突变。

3.2 我国东部梅雨期降水的年际和年代际变化分 离

通过频谱分析方法提取年际信号,图2给出了 我国梅雨期降水在年际变化尺度上的前两个模态, EOF1和EOF2分别解释了总方差的18%和15%, 相比于原始资料,EOF1的解释方差略有增加,而 EOF2的解释方差略有减少。从图2中EOF1的空间 分布可以看出,我国梅雨期降水在年际变化尺度上 同样主要表现为华南地区与长江流域的反位相变化 分布,华南负信号区的范围较原始资料缩小但强度 增大。相应的时间序列有比较明显的2~3年的周 期。EOF2的空间分布与原始资料结果也类似,同 样表现为长江以南大部分地区一致的正信号,范围 有所扩大,负信号主要出现在黄河与长江之间,其 强度和范围都比原始资料结果明显增大。与EOF2 相应的时间序列则表现出明显的准两年周期振荡。

通过频谱分析方法提取年代际信号,图3给出 了我国梅雨期降水在年代际时间尺度上的前两个模态,EOF1和EOF2分别解释了总方差的28%和 18%。与前面的结果相对比可以看出,年代际尺度 上EOF1的空间分布与原始资料和年际尺度上的 EOF2的空间分布比较相似,而EOF2的空间分布



图 1 1951~2009 年我国东部梅雨期平均降水 EOF 第一模态 (a、b) 和第二模态 (c、d): (a、c) 空间分布型 (深、浅阴影: 通过 99%、 95%信度检验); (b、d) 标准化的时间序列 (直方条)及 11 年滑动平均 (曲线)

Fig. 1 (a, b) Leading and (c, d) second EOF modes of the Jun-Jul mean precipitation for 1951-2009 in eastern China: (a, c) Regression of precipitation on the normalized principal component (dark and light shadings indicate the 99% and 95% confidence levels of correlation, respectively); (b, d) normalized time series (bars) and its 11-year running mean (curve)



图 2 同图 1, 但为 1951~2009 年我国东部梅雨期平均降水年际变化 Fig. 2 Same as Fig. 1, but for interannual component



图 3 同图 1, 但为 1951~2009 年我国东部梅雨期平均降水年代际变化 Fig. 3 Same as Fig. 1, but for interdecadal component

与原始资料和年际尺度上 EOF1 的空间分布较为相似。

年代际 EOF1 的空间分布表现为长江以南大部 分地区一致的正信号,这与年际尺度 EOF2 的空间 分布较一致,但不同的是,在年代际尺度上,广东 省西南部有一个显著的正异常中心,而该地区在年 际尺度上表现为负异常,同时年际尺度上在广东东 部还存在一个显著的正中心,但在年代际尺度上该 地区没有显著信号。对于长江以北的负信号区,年 代际和年际尺度上的结果不论是位置还是强度都存 在明显差异。与年代际 EOF1 相应的时间序列在 20世纪 90年代初以前基本为负位相,90年代初转 为正位相,21世纪初又转变为负位相;也就是说, 我国南方在 20世纪 90年代以前降水持续偏少,90 年代以后降水异常增多,进入 21世纪降水又有减 少的趋势。年代际 EOF2 的空间分布表现为华南与 长江流域的反位相分布,整体模态与年际尺度 EOF1 的空间分布相似,但年代际尺度上长江流域 的正信号强度比年际尺度上减弱了 20%左右,华南 的负信号减弱了近 70%。与年代际 EOF2 相应的 时间序列在 20 世纪 50 年代为正位相,60 年代~70 年代末基本为负位相,70 年代末~90 年代初为正 位相,90 年代以后又以负位相为主。

上述分析表明,我国东部梅雨期降水主要表现 为长江一华南反位相变化型和江南一致变化型,无 论在年际或年代际时间尺度变化上均如此。但是, 对于江南一致变化型来说,年代际变化尺度上所解 释的方差(28%)要远大于年际变化尺度所解释的 方差(15%);而对于长江一华南反位相变化型来 说,年代际变化尺度上所解释的方差(18%)与年 际变化尺度所解释的方差(18%)一样。结合空间 分布的差异,可以得出长江一华南反位相变化型有 明显的年际和年代际变化,江南一致变化型则以年 代际变化为主。

4 与我国东部梅雨期降水年际变化相 联系的大气环流和海温异常

4.1 大气环流异常

以往的研究表明,东亚夏季风系统的主要成员 包括中高纬度的阻塞高压、西太平洋副热带高压、中 纬度西风扰动等环流系统。因此,这里选取 500 hPa 和 850 hPa 位势高度场、海平面气压场 (SLP) 和 200 hPa 纬向风场,用这些变量场的年际变化部分 与我国梅雨期降水年际变化部分的 EOF 时间序列 做回归分析,研究与我国梅雨期降水年际变化相联 系的大气环流的变化特征。

图 4 给出了年际变化尺度上与我国梅雨期降水 长江一华南反位相变化型(EOF1)相联系的大气 环流异常。当长江流域降水偏多, 而华南降水偏少 时,由图 4a 可以看出,在 500 hPa 高度上中高纬表 现为双阻型,其中乌拉尔山阻塞高压显著偏强,鄂霍 次克海阻寒高压也偏强但不显著,在中纬度 30°N~ 40°N从巴尔喀什湖以东一直到日本海附近存在显 著的带状负异常分布, 较低纬度的华南到菲律宾附 近地区有显著的正异常,这三个正负异常中心在经 向上呈现"+-+"的波列型态。上述的异常分布 在 850 hPa 和海平面气压场上 (图 4b 和 4c) 也能表 现出来,在垂直方向上表现出准正压的结构。副热 带高压的异常和阻塞的位置决定了在长江流域多雨 而华南少雨。在 200 hPa 上的纬向风异常(图 4d) 表明,20°N~40°N附近地区纬向风异常增强,正 异常中心位于我国山东到黄海一带,而在其两侧地 区纬向风异常减弱。由此可见,东亚副热带西风 急流显著增强,由此引发的急流入口区次级环流的



图 4 对我国东部梅雨期降水年际变化 EOF1 的回归分析: (a) 500 hPa 位势高度; (b) 850 hPa 位势高度; (c) 海平面气压; (d) 200 hPa 纬向风。深、浅阴影: 通过 99%、95% 信度检验

Fig. 4 Regression (contour) of (a) 500-hPa geopotential height, (b) 850-hPa geopotential height, (c) sea level pressure, and (d) 200-hPa zonal wind on the first EOF mode (EOF1) of the Jun-Jul mean precipitation (interannual component). Dark and light shadings indicate the 99% and 95% confidence levels of correlation, respectively

异常上升支正好位于长江流域中下游地区,有利于 该地区降水量增加。反之,当长江流域降水偏少, 华南降水偏多时,对应的环流场上的异常分布表现 出与上述情况相反的结果。

图 5 给出了年际变化尺度上与我国梅雨期降水 江南一致变化型(EOF2)相联系的大气环流异常 分布。由图 5a 可以看到, 500 hPa 中高纬表现为鄂 霍次克海阻塞高压的显著偏强,中纬度的长江下游 地区到我国东海存在一个负异常中心,低纬在南海 北部上空有一个较弱的正异常中心。上述的正负中 心与 850 hPa 和海平面气压场上的异常分布基本是 类似的(图 5b 和 5c)。副热带高压的异常和阻塞的 位置决定了降水主要出现在江南到华南一带, 但副 热带高压异常信号的偏弱决定了江南一致变化型的 年际变化也较弱。200 hPa 高度上纬向风场的异常 表明(图 5d),显著的纬向西风增强主要出现在我 国南方地区并向东北延伸至北太平洋中部海域,而 我国华北、东北地区的纬向西风则有所减弱。因 此,东亚副热带西风急流增强南压,由此引发的急 流入口区次级环流的异常上升支正好位于江南和华 南地区,有利于该地区降水量增加。上述环流场上 的配置有利于我国江南降水一致偏多,相反的异常 分布状况则有利于我国江南降水一致偏少。

4.2 海温异常

大气环流的异常变化往往是由某些外强迫因子 的变化引起的,海表面温度就是其中一个重要的影 响因子。影响中国夏季降水的关键海域有很多,如 赤道东太平洋(陈烈庭和吴仁广,1998)、西太平洋 暖池(黄荣辉和孙凤英,1994)、印度洋(陈烈庭, 1988)、南海(张琼等,2003)、北大西洋(徐海明 等,2001)等等。下面,用前期以及同期的海温的 年际变化部分与我国梅雨期降水年际尺度上的 EOF时间序列做相关分析,来研究与我国梅雨期 降水年际尺度变化相联系的海温异常的变化特征。

图 6 给出了年际变化尺度上与我国梅雨期降水 长江一华南反位相变化型(EOF1)相联系的 SST 异常分布。在前期冬季的赤道中东太平洋有一个弱 的正 SST 异常信号,同时印度洋和 20°N 以北的东 亚大陆沿岸有显著的正 SST 异常信号,特别是后 者可以持续到春季(见图 6a、b)。值得注意的事, 在澳大利亚西北的印度洋区域,从前冬开始该区域 就有显著的正 SST 信号出现 (图 6a),这一正异常 的范围在春季有所扩展,且向西北部移动,到达苏 门答腊岛西南部(图 6b)。到了梅雨期,该正异常 再向东北方移动,到达苏门答腊岛附近,此时菲律 宾海周围出现大范围正海温异常(图 6c)。Xie et al. (2009)的研究表明, 夏季菲律宾附近的低层反 气旋是由持续的印度洋海温异常东传,并通过海气 相互作用激发的。这里我们的结果也表明,对于梅 雨期菲律宾海附近的低层反气旋,其 SST 信号的 关键区可能也在印度洋,位于澳大利亚西北部及苏 门答腊岛西南部附近。







图 6 我国东部梅雨期降水年际变化 EOF1 与 SST 的相关系数的空间分布: (a) 前冬; (b) 前春; (c) 同期。等值线间隔: 0.15°C; 深、浅 阴影: 通过 99%、95%信度检验

Fig. 6 Correlation (contour) between EOF1 (interannual) of the Jun-Jul mean precipitation and the SST field for (a) the preceding winter (DJF), (b) the preceding spring (MAM), and (c) the simultaneous summer (JJ). Contour interval: 0.15° C; dark and light shadings indicate the 99% and 95% confidence levels of correlation, respectively

图 7 给出了年际变化尺度上与我国梅雨期降水 江南一致变化型 (EOF2) 相联系的 SST 异常分布。 图 7b 是与降水变化对应的同期 SST 异常分布,可 以看到,正海温信号主要出现在南海和菲律宾附近 海域,负信号则主要出现在黑潮延伸体区域。而在 前期的春季,在北太平洋有一个类似"马蹄形"的 负海温异常分布,在黑潮延伸体区域为正海温异常 (图 7a)。这里为什么春季黑潮延伸体区域的正海 温异常到梅雨期会南移到南海和菲律宾附近海域, 值得进一步研究。

5 与我国东部梅雨期降水年代际变化 相联系的大气环流和海温异常

5.1 大气环流异常

图 8 给出了年代际变化尺度上与我国梅雨期降

水江南一致变化型(EOF1)相联系的大气环流异 常,由图可以看出,对应于年代际尺度上我国江南 降水一致偏多的情况,在500 hPa、850 hPa 和海平 面气压场上(图 8a-c),中纬度的大陆上均表现为 一致的正异常,显著的异常中心位于贝加尔湖附 近。200 hPa 纬向风场上(图 8d),30°N 以南地区 有显著的西风正异常,而我国华北、东北地区则表 现为显著的东风异常。大陆上的低压减弱和东亚副 热带急流的南移,会导致降水多出现在我国南方。 而对应于年代际尺度上我国江南降水一致偏少的环 流配置与上述情况相反。

图9给出了年代际变化尺度上与我国梅雨期降 水长江一华南反位相变化型(EOF2)相联系的大 气环流异常。由图9可以看到,对应我国年代际尺 度上长江流域降水偏多、华南降水偏少的情况,在



图 7 我国东部梅雨期降水年际变化 EOF2 与 SST 的相关系数的空间分布: (a) 前春; (b) 同期。等值线间隔: 0.15°C; 深、浅阴影: 通过 99%、95%信度检验

Fig. 7 Correlation (contour) between EOF2 (interannual) of the Jun-Jul mean precipitation and the SST field for (a) the preceding spring (MAM), and (b) the simultaneous summer (JJ). Contour interval: 0.15°C; dark and light shadings indicate the 99% and 95% confidence levels of correlation, respectively



图 8 对我国东部梅雨期降水年代际变化 EOF1 的回归分析: (a) 500 hPa 位势高度; (b) 850 hPa 位势高度; (c) 海平面气压; (d) 200 hPa 结向风。深、浅阴影:通过 99%、95% 信度检验

Fig. 8 Regression (contour) of (a) 500-hPa geopotential height, (b) 850-hPa geopotential height, (c) sea level pressure, and (d) 200-hPa zonal wind on EOF1 of the Jun-Jul mean precipitation (interdecadal component). Dark and light shadings indicate the 99% and 95% confidence levels of correlation, respectively

500 hPa 高度上, 欧亚大陆表现为一致的位势高度 正异常, 三个显著的正异常中心分别位于乌拉尔山 附近、贝加尔湖以北的北极地区以及鄂霍次克海附 近地区(图 9a); 这三个正异常中心在 850 hPa 和 海平面气压场上(图 9b、c)也是显著的。同时, 850 hPa上在我国华南沿海附近地区的显著正异常 表明副热带高压异常偏强,范围明显偏大。相对而 言,200 hPa纬向风场上的副热带急流在东亚地区



图 9 同图 8, 但为 EOF 第二模态 Fig. 9 Same as Fig. 8, but for EOF2

的异常并不强(图 9d)。也就是说,主要是副热带 高压的异常和阻塞的位置决定了在长江流域多雨而 华南少雨。

对比年际变化尺度上 EOF 前两个主模态对应 的大气环流异常与年代际尺度上的结果,可以发现 其中有很大的不同。与我国梅雨期降水长江一华南 反位相变化型(年际尺度 EOF1,年代际尺度 EOF2) 相联系的大气环流在年际尺度上表现为欧 亚大陆中高纬的双阻型,从低纬到高纬有"+-+"的经向波列的分布形式,以及东亚副热带急流 的显著增强;而在年代际尺度上则主要表现为欧亚 大陆一致的正位势高度异常和副热带高压的增强和 北抬。与我国梅雨期降水江南一致变化型(年际尺 度 EOF2, 年代际尺度 EOF1) 相联系的大气环流在 年际尺度上表现为欧亚大陆中高纬的东阻型,在东 亚沿岸从低纬到高纬有较弱的"十一十"经向波列 的分布形式;而在年代际尺度上则表现为中心位于 贝加尔湖附近地区的大陆低压的显著减弱,东亚副 热带急流的减弱和南移。这些差异说明,尽管我国 梅雨期降水在不同时间尺度上表现出来的空间分布 型非常相似, 但二者背后的环流因子却有很大不 同,因此在分析我国梅雨期降水的变化特点以及对 应的环流特征时,按照年际、年代际尺度进行分离 是十分有必要的。

5.2 海温异常

图 10 给出了年代际变化尺度上我国梅雨期降

水江南一致变化型(EOF1)与 SST 的相关系数。 图 10c 是与降水变化对应的同期 SST 异常,可以看 到,热带太平洋尤其是热带西太平洋以及东亚沿岸 海区均存在显著的正海温异常,北印度洋也有显著 的正信号。通过对年代际尺度 EOF1 与 SST 作超 前相关,我们发现,热带西太平洋的正海温异常在 前冬就已经出现,主要位于东亚近海,北太平洋也 有显著的正海温异常信号(图 10a),这些地区的海 温异常可能对梅雨期降水江南一致变化型起了重要 作用。

年代际变化尺度上我国梅雨期降水长江一华南 反位相变化型(EOF2)与 SST 的相关主要表现为 同期关系。图 11 给出的与同期 SST 的相关系数表 明,最显著的海温异常表现为北太平洋中部"马蹄 形"的负海温异常分布,南太平洋副热带地区也有 显著的负海温异常信号,而北大西洋中部有显著的 正海温异常 20°N。

对比年际变化尺度上 EOF 前两个主模态对应 的海温异常分布与年代际尺度上的结果,同样可以 发现很大的不同。与我国梅雨期降水长江一华南反 位相变化型(年际尺度 EOF1,年代际尺度 EOF2) 相联系的海温异常在年际尺度上主要是前期日本附 近海域和印度洋海区,以及同期南海附近海域的正 海温异常;而在年代际尺度上则主要是同期北太平 洋中部的"马蹄形"负海温异常。与我国梅雨期降 水江南一致变化型(年际尺度 EOF2,年代际尺度





图 11 我国东部梅雨期降水年代际变化 EOF2 与同期 SST 的相关系数的空间分布。等值线间隔: 0.3; 深、浅阴影: 通过 99%、95%信度 检验

Fig. 11 Correlation (contour with 0.3 interval) between EOF2 (interdecadal) of the Jun-Jul mean precipitation and the SST field for the simultaneous summer (JJ). Dark and light shadings indicate the 99% and 95% confidence levels of correlation, respectively

EOF1) 相联系的海温异常在年际尺度上主要是前 期北太平洋上的负海温异常和澳大利亚东部沿岸太 平洋海域的正海温异常,以及同期南海附近海域的 正海温异常;而在年代际尺度上则主要表现为前期 东亚沿岸海域的正海温异常以及同期南海、热带西 太平洋海区的正海温异常。这些差异说明,与我国 梅雨期降水在不同时间尺度上相联系的海温的异常 信号有很大的不同,同样说明了对我国梅雨期降水 按照年际、年代际尺度分离的必要性。

6 总结和讨论

基于 1951~2009 年的中国 160 站降水资料、

NCEP/NCAR 再分析资料以及英国气象局哈德莱 中心的 SST 资料,本文对我国东部梅雨期(6月和 7月)降水的时空变化特征进行了分析。结果发 现,我国梅雨期降水最主要的模态是:长江流域和 华南地区反位相变化型的降水分布,以及长江以南 大部分地区一致变化型的降水分布。通过波谱分析 的方法将梅雨期降水量变化中的年际(周期<8年 的部分)和年代际(周期≥8年的部分)两种时间 尺度进行分离,对这两种不同的时间尺度上降水的 时空变化特征分别进行分析,结果发现:我国东部 梅雨期降水表现为长江一华南反位相变化型和江南 一致变化型两个主要模态,无论在年际或年代际时 间尺度变化上均是如此。对于长江一华南反位相变 化型来说, 年际尺度和年代际尺度上解释的方差均 为18%,但年际尺度上的强度稍大;对于江南一致 变化型来说,年代际时间尺度上所解释的方差 (28%) 远远大于年际时间尺度上所解释的方差 (15%)。因此,长江一华南反位相变化型有明显的 年际和年代际变化, 江南一致变化型则主要表现为 年代际变化。

进一步对与这两种不同时间尺度上我国梅雨期 降水异常相联系的大气环流进行分析,对比可以发 现,这两种时间尺度对应的大气环流异常有很大的 不同。与长江--华南反位相变化型(年际尺度 EOF1, 年代际尺度 EOF2) 相联系的大气环流异常 在年际尺度上主要表现为欧亚大陆中高纬的双阻 型,从低纬到高纬有"+-+"的经向波列的分布 形式,以及东亚副热带急流的显著增强;在年代际 尺度上则主要表现为欧亚大陆一致的正位势高度异 常和副热带高压的增强和北抬。而与江南一致变化 型(年际尺度 EOF2, 年代际尺度 EOF1) 相联系的 大气环流异常在年际尺度上主要表现为欧亚大陆中 高纬的东阻型,在东亚沿岸从低纬到高纬有较弱的 "+-+"的经向波列的分布形式;在年代际尺度 上则主要表现为中心位于贝加尔湖附近地区的大陆 低压的显著减弱,东亚副热带急流的减弱和南移。

对与这两种不同时间尺度上我国梅雨期降水异 常相联系的海温异常进行分析,对比得到:与长江 一华南反位相变化型(年际尺度 EOF1,年代际尺 度 EOF2)相联系的海温异常在年际尺度上主要表 现为前期日本附近海域、印度洋海区以及同期南海 附近海域的正海温异常;而在年代际尺度上则主要 表现为同期北太平洋中部的"马蹄形"负海温异 常。与江南一致变化型(年际尺度 EOF2,年代际 尺度 EOF1)相联系的海温异常在年际尺度上主要 是前期北太平洋上的负海温异常和澳大利亚东部沿 岸太平洋海域的正海温异常,以及同期南海附近海 域的正海温异常;而在年代际尺度上则主要表现为 前期东亚沿岸海域的正海温异常以及同期南海、热 带西太平洋海区的正海温异常。

由以上的分析不难看出,如果不对年际和年代 际这两种时间尺度进行分离,那么得到的结果既包 含与年际变化相关联的信号,又包含与年代际变化 相关联的信号。对比这两种时间尺度上的结果可以 发现,虽然这两个时间尺度上梅雨期降水变化的主 要模态十分相似,但它们的强弱和对应的环流、海 温却有很大的不同,因此,对梅雨期降水进行年际 和年代际尺度上的分离,可以使我们更清楚地认识 控制或影响各个时间尺度的物理成因。最后需要说 明的是,本文给出的结果仅限于统计关系,具体的 物理过程和因果关系还有待于今后进一步的研究。

参考文献 (References)

- 陈烈庭. 1988. 热带印度洋一太平洋海温纬向异常及其对亚洲夏季 风的影响 [J]. 大气科学, 12 (特刊): 142-148. Chen Lieting. 1988. Zonal anomaly of sea surface temperature in the tropical Indo - Pacific Ocean and its effect on summer Asia monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 12 (Special Issue): 142-148.
- 陈烈庭,吴仁广. 1998. 太平洋各区海温异常对中国东部夏季雨带 类型的共同影响 [J]. 大气科学, 22 (5): 718-726. Chen Lieting, Wu Renguang. 1998. The joint effects of SST anomalies over different Pacific regions on summer rainbelt patterns in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (5): 718-726.
- 邓爱军,陶诗言,陈烈庭. 1989. 我国汛期降水的 EOF 分析 [J]. 大气科学,13 (3): 289 - 295. Deng Aijun, Tao Shiyan, Chen Lieting. The EOF analysis of rainfall in China during monsoon season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 13 (3): 289 - 295.
- Ding Y H. 2004. Seasonal march of the East-Asian summer monsoon [M] // Chang C P, Ed. East Asian Monsoon. Singapore: World Scientific, 3-53.
- 龚道溢,朱锦红,王绍武. 2002. 长江流域夏季降水与前期北极涛 动的显著相关 [J]. 科学通报,47 (7):546-549. Gong Daoyi, Zhu Jinhong, Wang Shaowu. 2002. Relationship between the summertime precipitation over the reaches of Changjiang River and arctic oscillation of the previous season [J]. Chinese Science Bul-

letin (in Chinese), 47 (7): 546-549.

- 黄嘉佑. 2004. 气象统计分析与预报方法 (第三版) [M]. 北京: 气象出版社, 298pp. Huang Jiayou. 2004. Method of Meteorological Statistic Analysis and Forcasting (third edition) [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 298pp.
- 黄荣辉, 陈文. 2002. 关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最 近的进展 [J]. 气候与环境研究, 7 (2): 146-159. Huang Ronghui, Chen Wen. 2002. Recent progresses in the research on the interaction between Asian Monsoon and ENSO Cycle [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (2): 146-159.
- Huang R H, Sun F. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 70 (1): 243-256.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 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 [J]. 大气科学, 18 (2): 141-151. Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (2): 141-151.
- Jolliffe I T. 1986. Principal Component Analysis [M]. New York: Spring-Verlag, 290pp.
- Kalnay E C, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/ NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437-471.
- 吕俊梅, 琚建华, 江剑民. 2009. 近一百年中国东部区域降水的年 代际跃变 [J]. 大气科学, 33 (3): 524 - 536. Lü Junmei, Ju Jianhua, Jiang Jianmin. 2009. Interdecadal regime shifts of regional precipitation over eastern China during the last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 524-536.
- 倪东鸿,孙照渤,陈海山,等. 2004. 夏季黑潮区域 SSTA 及其与中 国夏季降水的联系 [J]. 南京气象学院学报,27(3):310-316. Ni Donghong, Sun Zhaobo, Chen Haishan, et al. 2004. Spatial/ temporal features of summer SSTA in the Kuroshio Current region and its relation to summer precipitation in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 27(3): 310-316.
- 平凡,罗哲贤,琚建华. 2006. 长江流域汛期降水年代际和年际尺 度变化影响因子的差异 [J]. 科学通报, 51 (1): 104-109. Ping Fan, Luo Zhexian, Ju Jianhua. 2006. Difference among the impact factors of interannual and interdecadal precipitation changes in the Yangtze River basin [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (1): 104-109.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. J. Geophys. Res., 108 (D14): 4407.
- 施能. 2002. 气象科研与预报中的多元分析方法(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 244pp. Shi Neng. 2002. Multianalysis in Me-

tetological Research and Prediction (second edition) [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 244pp.

- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]. Chang C P, Krishnamurti T N, eds. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 60 - 92.
- 陶诗言,朱文妹,赵卫. 1988. 论梅雨的年际变异 [J]. 大气科学, 12 (特刊): 13 - 21. Tao Shiyan, Zhu Wenmei, Zhao Wei. 1988. Interannual variability of Meiyu rainfalls [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 12 (Special Issue): 13-21.
- 魏凤英,谢宇. 2005. 近百年长江中下游梅雨的年际及年代际振荡 [J]. 应用气象学报,16(4):492-499. Wei Fengying, Xie Yu. 2005. Interannual and interdecadal oscillations of Meiyu over the middle - lower reaches of the Changjiang River for 1885 - 2000 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (4):492-499.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. J. Climate, 22 (3): 730 – 747.
- 徐海明,何金海,董敏. 2001. 江淮入梅的年际变化及其与北大西 洋涛动和海温异常的联系 [J]. 气象学报,59(6):694-706. Xu Haiming, He Jinhai, Dong Min. 2001. Interannual variability of the Meiyu onset and its association with North Atlantic Oscillation and SSTA over North Atlantic [J]. Acta Mereorologica Sinica (in Chinese), 59(6):694-706.
- 徐群. 2007. 121 年梅雨演变中的近期强年代际变化 [J]. 水科学进展, 18 (3): 327 335. Xu Qun. 2007. Recent strong decadal change of Meiyu in 121 years [J]. Advances in Water Science (in Chinese), 18 (3): 327 335.
- 徐卫国,江静. 2004. 我国东部梅雨雨区的年际和年代际的变化分析 [J]. 南京大学学报(自然科学版): 40(3): 292-303. Xu Weiguo, Jiang Jing. 2004. Characteristics of the rainbelt of Meiyu between interannual and interdecadal climate variations [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 40 (3): 292-303.
- 张庆云,陶诗言,张顺利. 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天 气气候条件 [J]. 大气科学, 27 (6): 1018 – 1030. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2003. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asian during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (6): 1018–1030.
- 张琼,刘平,吴国雄. 2003. 印度洋和南海海温与长江中下游旱涝
 [J]. 大气科学, 27 (6): 992 1006. Zhang Qiong, Liu Ping,
 Wu Guoxiong. 2003. 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 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (6): 992 1006.

张顺利,陶诗言,张庆云,等. 2002. 长江中下游致洪暴雨的多尺度

条件 [J]. 科学通报, 47 (6): 467 – 473. Zhang Shunli, Tao Shiyan, Zhang Qingyun, et al. 2002. Large and meso- α scale characteristics of intense rain in the mid- and lower reach of the Yangtze River [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 47 (6): 467 – 473.

宗海锋,张庆云,陈烈庭. 2006. 梅雨期中国东部降水的时空变化

及其与大气环流、海温的关系 [J]. 大气科学, 30 (6): 1189-1197. Zong Haifeng, Zhang Qingyun, Chen Lieting. 2006. Temporal and spatial variations of precipitation in eastern China during the Meiyu period and their relationships with circulation and sea surface temperature [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1189-1197.