

李宏毅, 林朝晖, 陈红. 2012. 我国华南 4、5 月份降水年代际变化的特征及其与中西太平洋海温的可能关系[J]. 气候与环境研究, 17 (4): 481-494, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.11040. Li Hongyi, Lin Zhaohui, Chen Hong. 2012. Characteristics of the interdecadal variability of precipitation in April and May over South China and possible relationship with the mid-West Pacific SST[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (4): 481-494.

我国华南 4、5 月份降水年代际变化的特征及其与中西太平洋海温的可能关系

李宏毅^{1,2} 林朝晖² 陈红²

1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

摘 要 利用 1951~2005 年华南 4、5 月份降水资料、NOAA 海温资料以及 NCEP 再分析资料, 对华南 4、5 月份降水年代际变化的特征、及其所对应的大尺度环流以及与中西太平洋海温的关系作了分析。结果表明, 华南 4、5 月份降水均在 1970 年代初期发生显著的年代际转变, 从之前的降水偏少转变为降水偏多。华南 4 月份降水与前一年 7~11 月份的中西太平洋海温、华南 5 月份降水与当年 2~5 月份的中西太平洋海温有显著的负相关。在 4、5 月份年代际降水偏少(多)时期, 前期中西太平洋海温偏暖(冷); 同期亚洲大陆南部及非洲大陆的海平面气压显著偏低(高), 北太平洋海区海平面气压偏高(低); 我国华南上空存在反气旋性(气旋性)环流异常, 我国华南地区北边界存在显著的南(北)风异常, 造成华南地区北边界异常水汽输出增强(减弱)。同时, 我国大陆对流层中上层大气显著偏暖(冷), 东亚高空急流显著偏北(南), 副热带高压偏弱(强)偏东(西), 向华南地区输送的水汽减少(增加), 从而在华南地区形成异常的水汽辐散(辐合), 最终导致华南地区 4、5 月份降水的减少(增加)。

关键词 华南 4、5 月份降水 年代际变化 中西太平洋海温异常

文章编号 1006-9585 (2012) 04-0481-14

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.11040

Characteristics of the Interdecadal Variability of Precipitation in April and May over South China and Possible Relationship with the Mid-West Pacific SST

LI Hongyi^{1,2}, LIN Zhaohui², and CHEN Hong²

1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

2 International Center for Climate and Environment Science, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The characteristics of interdecadal variability of precipitation in April and May and the associated atmospheric circulation, as well as the relationship with mid-West Pacific Ocean sea surface temperature (SST) on decadal scale over South China are analyzed by using observational station data, NOAA SST data, and NCEP reanalysis data for the period 1951-2005. The results show that both the April and May precipitation over South China exhibit a notable decadal change in the early 1970s, which experienced a notable low to high transition. The variability of April precipitation has a

收稿日期 2011-03-16 收到, 2012-04-10 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金面上基金项目 41175073, 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201206041, 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421406、2010CB428403, 国家自然科学基金青年科学基金项目 41105073

作者简介 李宏毅, 女, 1981 年出生, 博士, 主要从事气候年代际变化方面的研究。E-mail: lihongyi@cma.gov.cn

significant negative correlation with the Mid-West Pacific Ocean SST from July to November in the preceding year, and precipitation in May has a remarkable negative correlation with SST in the Mid-West Pacific Ocean from February to May in the same year. In the decadal period of lower (higher) rainfall in April and May, the Mid-West Pacific Ocean SST is warmer (colder) in the previous time period; the sea level pressure is significantly lower (higher) in southern Asian continent and the African continent at the same period, and the North Pacific Ocean sea level pressure is higher (lower); there appears an anomalous anticyclonic (cyclonic) circulation over South China, accompanied by a significant southerly (northerly) wind anomalies in the northern boundary of South China, causing a strengthened (weakened) of the anomalous water vapor output in the northern boundary of South China. Meanwhile, the middle and upper troposphere air temperature in the mainland of China is significantly warmer (colder), the East Asian jet stream is obviously northward (southward), the western Pacific subtropical high is weaker (stronger) and eastward (westward), so the water vapor transport to South China is weakened (enhanced), which emerges an anomalous divergence (convergence) of water vapor over South China, resulting in a decrease (an increase) of April and May precipitation over South China.

Key words April and May precipitation over South China, interdecadal variation, mid-West Pacific SST anomalies

1 引言

华南地区通常主要指南岭以南地区,包括广东、广西、海南、福建。华南地区降水时空分布与华北以及江淮流域有着不同的特征(吴尚森等, 1990; 吴尚森和梁建茵, 1992; 林爱兰和吴尚森, 1996; 李春晖等, 2004)。初步研究表明我国华南汛期降水会受到热带海温、副热带高压、极涡、南海季风以及南极海冰等的影响(高绍凤等, 1994; 梁建茵, 1994; 徐海明, 1997; 吴尚森等, 1998; Yang and Lau, 2004), 而青藏高原、欧亚大陆的积雪覆盖也会对我国华南夏季降水产生影响(陈烈庭和阎志新, 1979; 蔡学湛, 2001; Wu and Kirtman, 2007)。但总的来说, 上述研究大都是对华南汛期降水的基本特征及其年际变化的影响机制进行分析, 而较少对华南春季降水进行研究。而春季正是农作物播种和生长的时期, 降水的多少直接影响到我国的国计民生, Li et al. (2009) 已经从环流场和水汽输送的角度分析了华南春季降水年代际变化的原因。近年来也有研究表明华南晚春的降水从 1970 年代末期有了明显的减少, 可能与我国中部上空的对流层上层变冷有着密切的关系(Xin et al., 2006)。3 月, 华南处于冬季风控制时期, 夏季风还没有爆发, 华南主要为锋面降水; 4 月, 是北半球春季代表月, 华南处于冬季风向夏季风过渡的季节; 5 月下旬, 夏季风爆发, 华南主要为夏季风降水, 因此很有必要将春季 3 个月单独进行分析。李宏毅等(2010)对华南 3 月份降水年代际变化的特征、及其对应的大尺度环流以及与太平洋年代际振荡(PDO)的关系

进行了分析。但是关于华南 4、5 月份降水研究的较少, 故本文针对华南 4、5 月份降水, 研究其年代际变化特征及其所对应的大尺度环流特征。

关于华南汛期降水与近海海温的关系, 国内学者很早就进行了研究。研究表明华南夏季降水与前期冬季 1 月的黑潮海温以及菲律宾、台湾一带的海温及北大西洋中纬度海温在整个春、夏季均存在显著的负相关(徐海明, 1997)。华南前汛期(4~6 月)降水与前期西太平洋暖池北部有很显著的负相关(邓立平和王谦谦, 2002)。以上对华南降水与海温的关系研究也都局限于汛期降水, 并且也只是从年际变化的角度进行了分析, 而没有研究降水年代际变化与海温的关系。故本文还将研究华南 4、5 月份降水年代际变化与海温的可能关系。

2 资料与方法介绍

本文使用 1951~2005 年中国气象局整编的 160 站的逐月降水资料, 1951~2005 年逐月 PDO 指数, 1951~2005 年 NCEP/NCAR 全球逐月 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度) 的风场和比湿(垂直方向为 8 层)、地面气压、位势高度场、海平面气压场。对于中国气象局整编的站点资料, 我们按照华南地区的行政区划选取了广东、广西、海南、福建这 4 个省, 主要包括浦城、福州、永安、厦门、梅县、汕头、曲江、河源、广州、阳江、湛江、海口、桂林、柳州、梧州、南宁、北海、百色, 将这 18 站作为华南地区的代表站。对于 NCEP/NCAR 的资料我们选取 ($18^{\circ}\text{N}\sim 28^{\circ}\text{N}$, $104^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 作为华南区域来进行研究。

大气水汽输送的计算方法同文献(Wei et al.,

2005; Zhou and Yu, 2005; 李宏毅等, 2010), 分别计算经向和纬向的水汽通量以及水汽通量散度。

本文使用的分析方法主要为相关分析法以及合成分析法。

3 结果分析

3.1 我国华南 4、5 月份降水的年代际变化

图 1a、1b 分别为 1951~2005 年华南地区 4、5 月份降水的标准化距平序列, 折线代表降水的 9 年滑动平均。由图 1a 可知, 华南 4 月份降水具有显著的年代际变化特征, 转折点分别出现在 1970 年代初期及 1980 年代后期。从 1950 年代中期到 1970 年代初期, 降水相对偏少; 1970 年代初期到 1980 年代中期, 降水相对偏多; 1980 年代后期以后, 降水又相对偏少。Mann-Kendall 突变检验表明, 华南 4 月份降水在 1970 年代初期发生的年代际突变通过了 95% 的信度检验, 而 1980 年代后期的年代际突变则并不显著 (图 1c)。从图 1b 可知, 华南 5 月份降水在 1970 年代初期及 1990 年代初期发生显著的年代际突变。从 1950 年代后期到 1960 年代后

期, 降水相对偏少; 1970 年代初期到 1980 年代中期, 降水相对偏多; 1990 年代初期以后, 降水又相对偏少。这与图 1d 的 Mann-Kendall 突变检验是一致的, 该检验表明华南 5 月份降水在 1970 年代初期和 1990 年代初期发生年代际突变, 并且通过了 95% 的信度检验。

本文以 1951~2005 年作为气候背景, 以 1955~1971 年作为华南 4 月份降水偏少时期, 以 1973~1984 年作为 4 月份降水偏多时期; 以 1958~1966 年作为华南 5 月份降水偏少时期, 以 1971~1984 年作为 5 月份降水偏多时期。对华南 4、5 月份降水偏少和降水偏多时期所对应的东亚大气环流异常以及与海温场的关系进行分析。

3.2 东亚大气环流异常

我们对东亚大气环流做了年代际变化的合成差值图。用 4 月份降水相对偏少时期 (1955~1971 年) 的平均大气环流场减去降水偏多时期 (1973~1984 年) 的平均大气环流场, 作为 4 月份环流场年代际变化的合成差值图; 用 5 月份降水相对偏少时期 (1958~1966) 的平均大气环流场减去降水偏多时期 (1971~1984 年) 的平均大气环流场, 作为 5

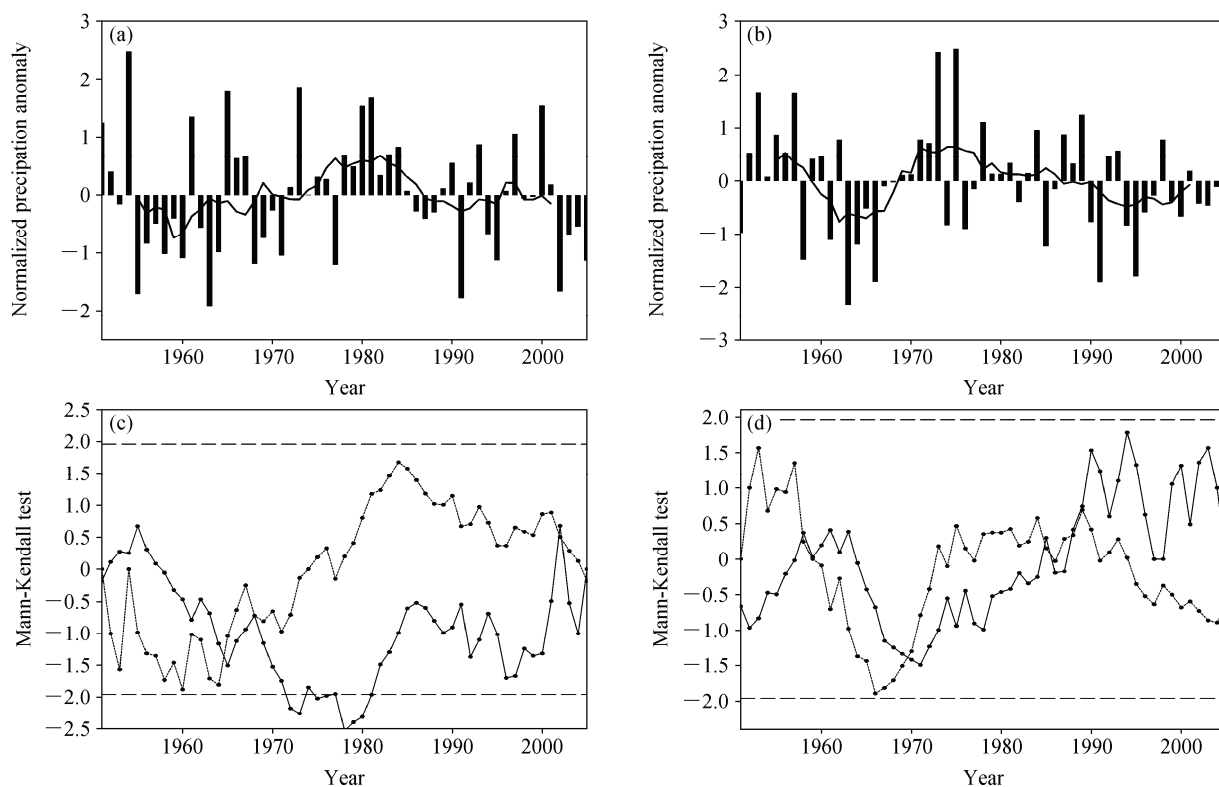


图 1 华南地区 (a、c) 4 月份、(b、d) 5 月份 1951~2005 年的 (a、b) 标准化降水 (折线代表 9 年滑动平均) 和 (c、d) 降水的 Mann-Kendall 检验序列 (虚直线代表 5% 显著性检验水平)

Fig.1 The normalized means of (a, b) precipitation and (c, d) the Mann-Kendall test of precipitation in (a, c) April and (b, d) May over South China for 1951–2005. The curved line in (a, b) indicates a 9-year running mean and the dashed beeline in (c, d) indicates the 5% significant level of the Mann-Kendall test

月份环流场年代际变化的合成差值图。

图 2a 为 4 月份海平面气压异常的合成差值场图,深、浅阴影区分别表示通过 95%和 90%的信度检验。由图可见,亚洲大陆南部及非洲大陆的海平面气压有显著的负异常,中心数值小于 -2 hPa,北太平洋海区存在海平面气压的正异常,中心数值大于 2 hPa。这说明亚洲大陆南部及非洲大陆的海平面气压在降水偏少时期(1955~1971 年)比降水偏多时期(1973~1984 年)显著偏低,北太平洋海区的海平面气压则显著偏高。这不仅表明了 4 月份北太平洋海区的热力状况发生了改变,也表明亚洲大陆南部及非洲大陆地区与北太平洋海区的热力状况对比发生了显著的年代际变化。5 月份海平面气压异常的年代际差值场与 4 月份相似,只是负异常的显著区域有所扩大,亚洲大陆南部、欧洲大陆、非洲大陆及北印度洋的海平面气压均为显著的负异常,北太平洋的海平面气压的正异常显著增强,中心数值大于 4 hPa(图 2b)。

我们用对流层大气的厚度来表示大气的热力状况,用 200 hPa 的高度场与 850 hPa 高度场之差来表示对流层的厚度,从 4 月份合成的对流层厚度异常差值场(图 3a)来看,我国大陆和欧洲南部有显著的正异常,我国大陆中心数值大于 60 m,表明我国大陆和欧洲南部对流层大气偏暖。这也说明不同年代际背景下对流层大气的热力状况的确发生了显著的年代际变化,我国大陆地区对流层大气温度从降水偏少时期的偏暖转为降水偏多时期的偏冷。5 月份的合成对流层厚度场异常差值场的正异常中心较 4 月份数值有所增大,我国大陆地区中心数值大于 80 m(图 3b)。

同样,从合成的纬向平均温度异常差值场(图 4a)来看,中国东部地区对流层中上层大气中存在大范围显著的正异常分布,中心数值大于 2°C ,说明我国东部对流层中上层大气的确发生了显著的年代际变化,从降水偏少时期的显著偏暖转变为降水偏多时期的显著偏冷。5 月份的合成纬向平均温

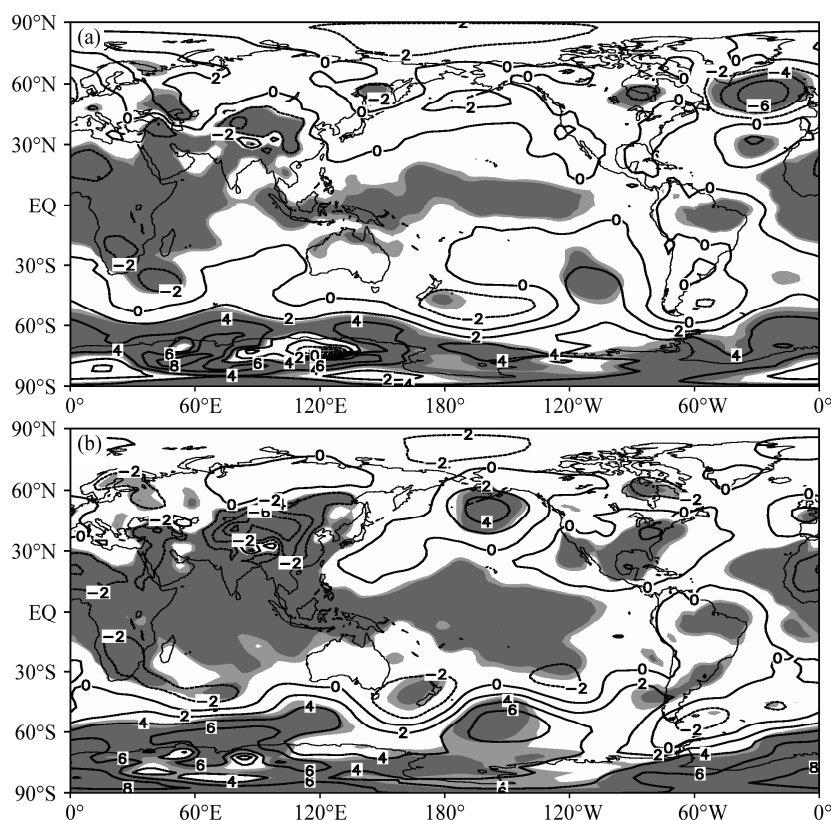


图 2 海平面气压异常的年代际差值场(单位: hPa): (a) 4 月份降水偏少期(1955~1971 年)平均减去降水偏多期(1973~1984 年)平均; (b) 5 月份降水偏少期(1958~1966 年)平均减去降水偏多期(1971~1984 年)平均。深、浅阴影区分别表示通过 95%和 90%信度检验的区域

Fig.2 Interdecadal difference of the sea level pressure anomalies (hPa) in (a) April between the dry period of 1955-1971 and wet period of 1973-1984, and (b) May between the dry period of 1958-1966 and wet period of 1971-1984. The heavy and light shadings indicate statistical confidence at the 95% and 90% levels, respectively

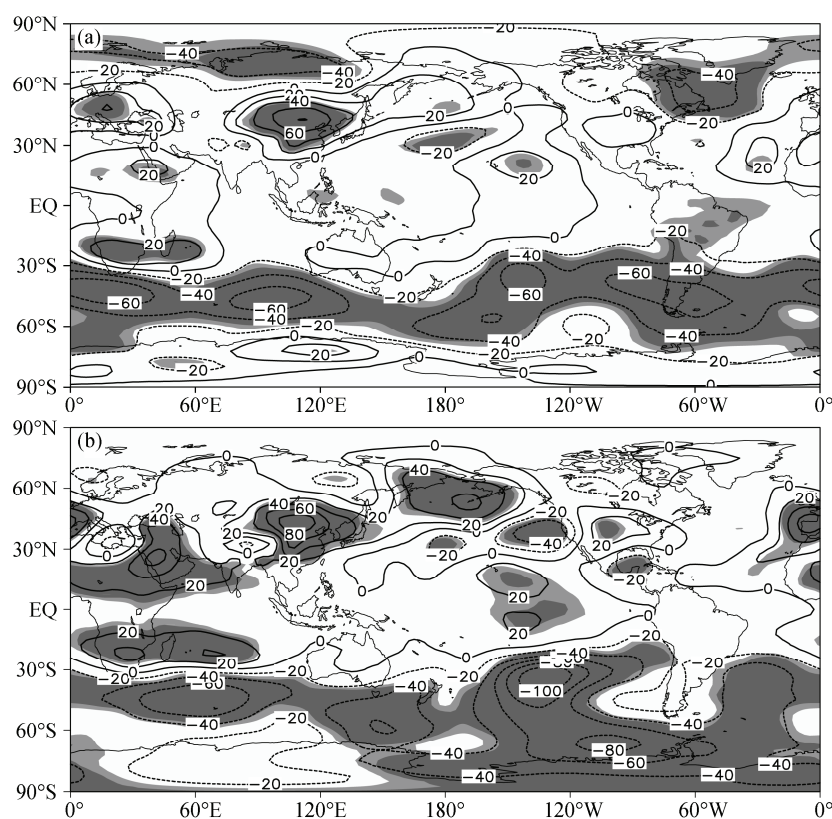


图3 同图2, 但为 200~850 hPa 厚度场异常的年代际差值图(单位: m)
Fig.3 Same as Fig.2, but for the thickness anomalies fields (m) of 200-850 hPa

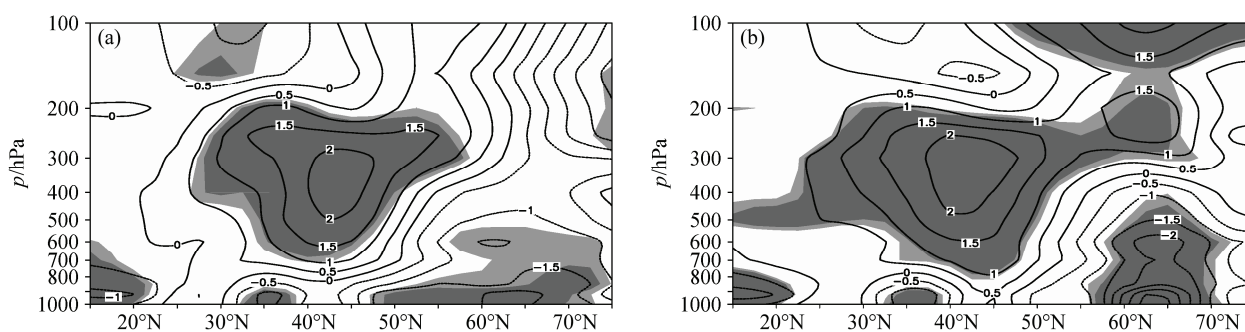


图4 同图2, 但为纬向平均(110°E~125°E)温度场异常差值图(单位: °C)
Fig.4 Same as Fig.2, but for the air temperature anomalies (°C) averaged over 110°E-125°E

度异常的年代际差值的正异常范围较 4 月份有所扩大(图 4b)。

东亚副热带西风急流是影响东亚气候的重要系统之一, 它的强度和南北位置与我国东部各区雨带的开始和结束密切相关。夏季东亚高空急流的平均位置在 40°N 附近, 急流位置异常偏南, 东亚夏季风环流偏弱, 长江中下游及江南、华南降水偏多, 急流位置异常偏北, 则情况相反(Liang and Liu, 1994; 孙安健, 1994; Liang and Wang, 1998; 廖清海等, 2004)。陆日宇(2003)研究表明, 夏季

东亚高空西风急流也表现出显著的年代际变化, 其位置在 1970 年代末期之前偏北, 之后偏南。李宏毅等(2010)研究表明, 在华南 3 月份降水偏少以及偏多时期, 东亚西风急流的南北位置发生了显著的变化, 降水偏少时期急流偏弱、位置偏北, 降水偏多时期急流偏强、位置偏南。在此我们来分析一下 4 月份的西风急流与华南 4 月份降水年代际变化的可能关系, 4 月份西风急流的平均位置位于 45°N 附近(图略)。从合成的 200 hPa 纬向风场异常差值场中来看(图 5a), 在东亚区域 120°E 附近, 45°N

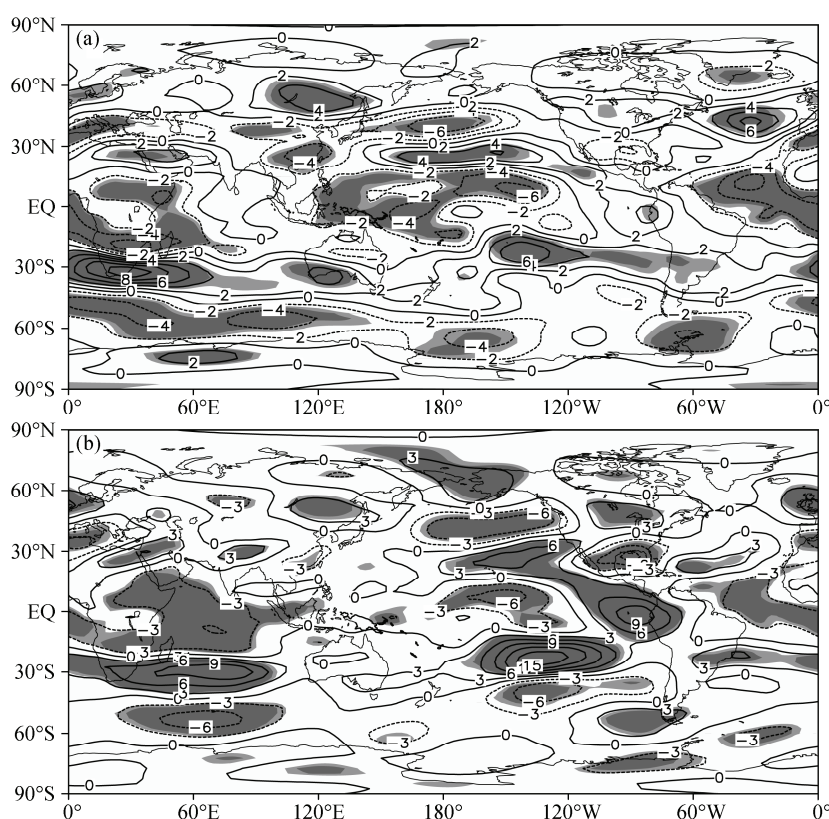


图5 同图2, 但为200 hPa 纬向风异常差值图(单位: m/s)

Fig.5 Same as Fig.2, but for the zonal wind anomalies fields (m/s) at 200 hPa

以南为显著负异常, 以北为显著正异常, 表明急流轴以南为东风距平, 以北为西风距平, 说明东亚高空急流异常显著偏北。这就意味着在华南4月份降水偏少以及偏多时期, 东亚西风急流的南北位置发生了显著的年代际变化, 从之前的偏弱偏北转为偏强偏南。5月份合成的200 hPa纬向风场异常差值场在东亚地区具有和4月份相似的特征(图5b)。

西太平洋副热带高压(简称副高)是另一个影响东亚气候的重要系统, 它的强度和位置的变化在很大程度上影响着我国东部夏季雨带的分布。一般而言, 夏季副热带高压位置偏南时, 长江中下游地区多雨而华北地区少雨, 副高偏北时华北地区多雨, 长江中下游地区少雨。针对西太平洋副热带高压的研究表明, 副高的强度和位置在1970年代中期左右发生了显著的年代际变化, 这种大气环流的年代际变化造成了1970年代中期以后中国华北地区干旱少雨, 长江中下游地区降水偏多的情况(Gong and Ho, 2002)。李宏毅等(2010)的研究表明, 华南3月份降水发生年代际变化时, 副高的东西向位置也发生了显著的年代际变化, 副高从降水偏少时期的位置偏东转变为降水偏多时期的位

置偏西。我们用4月份850 hPa高度场的1530 m线来表示副高的位置, 由图6a可见, 850 hPa高度场上高压脊线在1955~1971年偏东(长虚线), 在1973~1984年偏西(实线), 阴影表示气候态位置。表明在降水偏少时期, 副高偏东, 在降水偏多时期, 副高偏西。可见在华南4月份降水发生年代际变化的同时, 副高的东西向位置也发生了显著的年代际变化。5月份的850 hPa高度场上高压脊线在1958~1966年偏东(长虚线), 在1971~1984年偏西(实线), 脊线位置较4月份均偏西, 气候态范围也有所扩大和西伸。表明在降水偏少时期, 副高偏东, 在降水偏多时期, 副高偏西。可见华南5月份降水发生年代际变化的同时, 副高的东西向位置也发生了显著的年代际变化。与4月份相比, 5月份的副热带高压范围有所扩大, 副高位置西伸至我国南海地区(图6b)。

图7a为4月份合成的850 hPa风场异常差值图, 方框为华南区域。降水偏少时期与降水偏多时期相比, 在华南地区上空存在一个反气旋性环流异常, 这种异常的反气旋性环流可以引起华南地区水汽的异常辐散, 从而造成华南地区降水的偏少。另

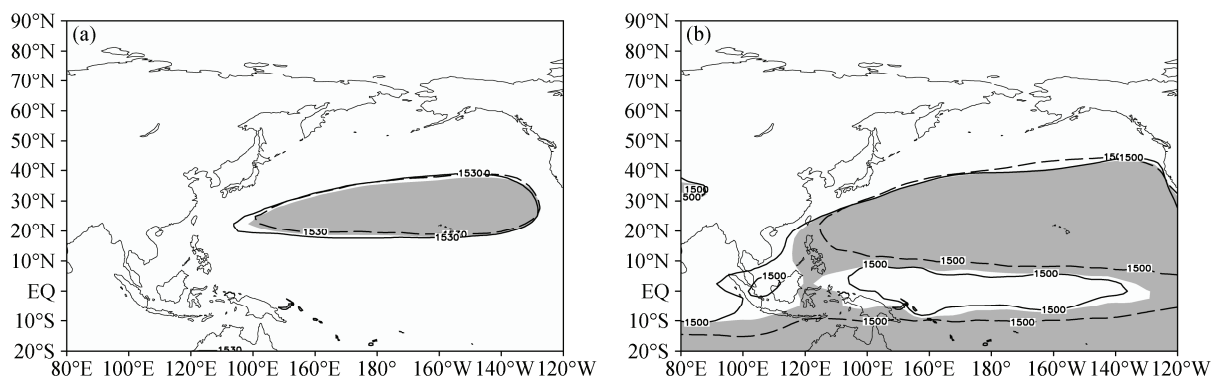


图 6 850 hPa 高度场上高压脊线的年代际变化 (单位: m): (a) 4 月份, 1955~1971 年平均 (长虚线)、1973~1984 年平均 (实线); (b) 5 月份, 1958~1966 年平均 (长虚线)、1971~1984 年平均 (实线)。阴影为气候态位置

Fig.6 The high ridge of western Pacific subtropical high at 850 hPa (units: m) in (a) April for the periods of 1955-1971 (long dashed line) and 1973-1984 (solid line), and (b) May for the periods of 1958-1966 (long dashed line) and 1971-1984 (solid line), shadings indicate the position of climate states

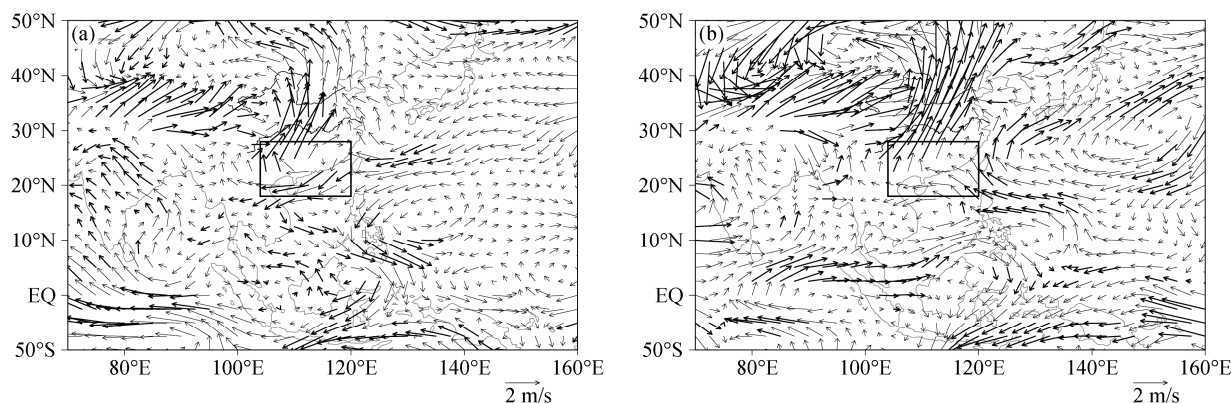


图 7 同图 2, 但为 850 hPa 风场异常差值图。粗箭头表示通过 90% 的信度检验, 方框区域为华南区域

Fig.7 Same as Fig.2, but for the wind vector anomalies at 850 hPa. Thick arrows indicate statistical confidence at 90% level, the rectangle indicates South China

外, 副热带高压异常环流是气旋性环流, 说明副热带高压偏弱, 因此从副热带高压西南侧向华南地区输送的水汽异常偏少, 这也是造成华南 4 月份降水偏少的重要原因。从 5 月份 850 hPa 风场异常的差值图来看 (图 7b), 在华南地区北边界有显著的南风距平, 造成华南北边界有大量的水汽输出, 在华南地区南边界有北风距平, 因此从华南地区的南边界向华南地区的水汽输送减弱, 从而在华南地区形成水汽的异常辐散, 造成华南地区 5 月份降水的异常偏少。

图 8a 为 4 月份合成的整层积分的大气水汽输送通量及其散度距平差值图, 方框地区为华南区域。华南降水偏少时期与降水偏多时期相比, 华南地区的水汽通量散度距平为正值, 数值大于 1.0, 表明该地区水汽为异常辐散的。水汽通量矢量场与 850 hPa 风场有很好的 consistency, 华南区域上空有一个异常的反气旋性的水汽通量环流, 南边界的水汽

通量矢量距平向南, 西边界通量矢量距平向西, 表明在南边界和西边界向华南输入的水汽较少, 北边界通量矢量距平向北, 表明在北边界输出的水汽较多, 引起华南地区水汽的异常辐散, 进而导致华南地区降水的减少。从 5 月份的水汽输送通量及其散度距平的年代际差值场来看 (图 8b), 华南地区的水汽通量散度距平为正值, 数值大于 2.0, 数值较 4 月份偏大, 表明该地区水汽异常辐散较 4 月份偏强。5 月份的水汽通量矢量距平在华南北边界为显著偏北的, 表明在华南北边界有大量的水汽输出, 因此华南地区水汽异常辐散, 导致该地区降水减少。

Hadley 环流作为低纬大气中主要的大尺度环流因子之一, 联系着全球大气环流变化。有研究表明东亚夏季风环流以及降水在 1970 年代中后期的年代际突变与 Hadley 环流的增强有着密切的关系 (Hu, 1997; Xue, 2001)。李宏毅等 (2010) 研究表明 3 月份降水的年代际变化可能也与 3 月份东亚

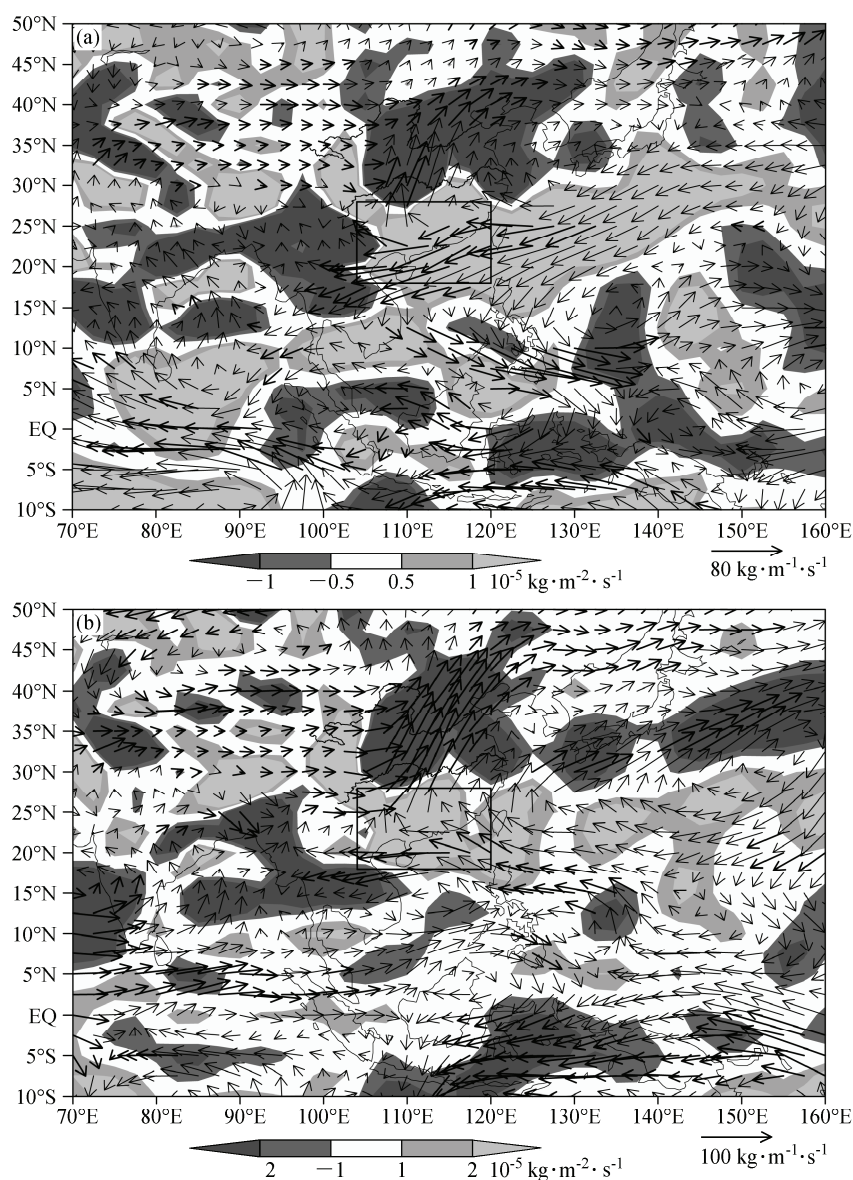


图 8 同图 2, 但为整层积分的水汽通量异常差值图 (矢量箭头, 深色箭头表示通过了 90% 的信度检验) 以及水汽通量散度 (阴影), 方框区域为华南区域

Fig.8 Same as Fig.2, but for the anomalies of vertically integrated water vapor flux (arrows, dark arrows: 90% confidence level) and the flux divergence (shaded), the rectangle indicates South China

Hadley 环流的年代际转变有着密切的关系。在此我们来研究一下 4 月份东亚 Hadley 环流与华南 4 月份降水的关系。本文利用曾刚等 (2007) 定义的东亚 Hadley 环流指数: 500 hPa 高度上 ($5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 和 ($35^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 区域的垂直速度差值并进行标准化, 正 (负) 指数表示弱 (强) 东亚 Hadley 环流。由图 9a 可知, 4 月份的东亚 Hadley 环流指数在 1970 年代初期发生年代际转变, 由之前弱的东亚 Hadley 环流转变为强的东亚 Hadley 环流。前面图 1a 分析已得, 华南 4

月份降水也在 1970 年代初期发生显著的年代际转变, 由之前的降水偏少转变为降水偏多。由此可见, 4 月份降水在 1970 年代初期的这次年代际转变可能与 4 月份东亚 Hadley 环流的年代际转变有着密切的关系。同样, 5 月份的东亚 Hadley 环流指数也具有显著的年代际变化特征, 由 1970 年代初期之前弱的东亚 Hadley 环流转变为之后强的东亚 Hadley 环流 (图 9b)。前面图 1b 分析出, 5 月份降水也在 1970 年代初期由之前的降水偏少转变为之后的降水偏多, 这可能也与 5 月份的东亚 Hadley 环流指数在

1970 年代初期的这次显著的年代际转变有关。

从 4 月份合成的纬向平均垂直风场距平差值图可以看出, 东亚地区存在一个反 Hadley 环流圈, 表明降水偏少时期与降水偏多时期相比, 东亚 Hadley 环流显著偏弱, 20°N 附近的南海区域的气流异常辐

散下沉, 在低层有一支气流向北运动, 致使中国东部出现偏南风异常, 从而我国华南地区的北边界出现异常偏南风(图 10a), 导致华南北边界有大量的异常水汽输出, 在低层向南运动的那一支气流使得华南地区的南边界出现偏北风异常, 使得从海上向

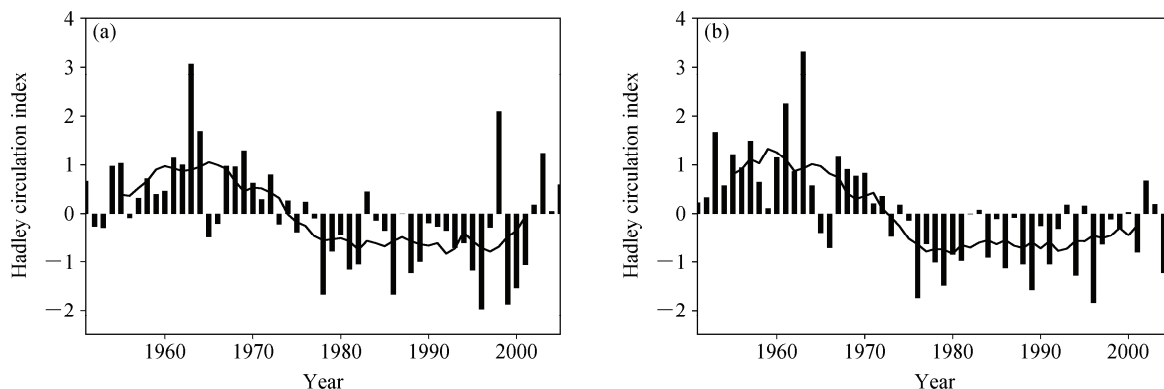


图 9 1951~2005 年 (a) 4 月份和 (b) 5 月份东亚 Hadley 环流指数的标准化距平序列, 折线代表 9 年滑动平均

Fig.9 The normalized anomaly of Hadley circulation index in (a) April and (b) May over East Asia for 1951–2005. The curved line indicates a 9-year running mean

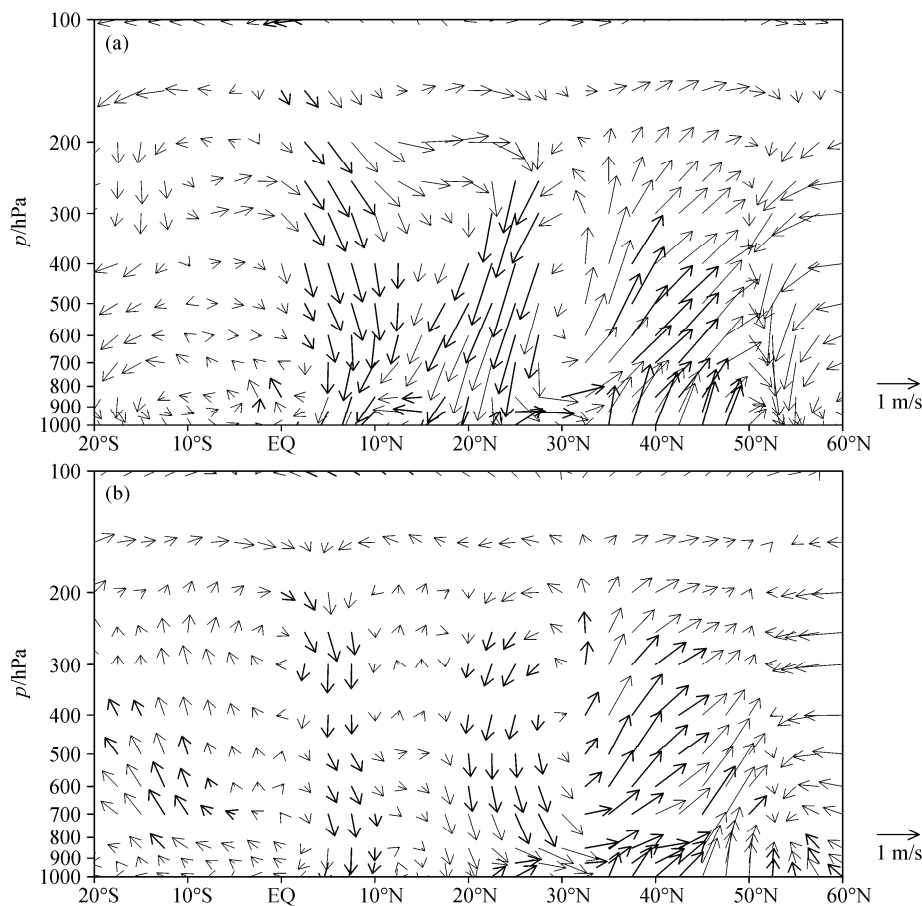


图 10 (a) 4 月份和 (b) 5 月份纬向平均 ($100^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 垂直风场距平差值图 (深色箭头表示通过了 90% 的信度检验)

Fig.10 The zonal averaged ($110^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$) vertical wind field in (a) April and (b) May (dark arrows: 90% confidence level)

华南地区的水汽输送减弱,因而最终导致华南地区 4 月份降水的异常偏少。5 月份合成的纬向平均垂直风场距平差值图具有与 4 月份相似的环流特征(图 10b)。

总的来说,在 1955~1971 年华南 4 月份降水偏少时期,亚洲大陆南部及非洲大陆的海平面气压显著偏低,北太平洋海区的海平面气压偏高。我国华南地区存在反气旋性环流异常,在华南地区北边界存在显著的南风距平(图 7a),因此造成我国华南地区北边界有异常的水汽输出,同期我国大陆地区对流层大气显著偏暖,东亚高空急流显著偏北,副高偏东,从副高西南侧向华南地区的水汽输送显著减少,从而形成华南地区水汽的异常辐散(图 8a),最终导致华南地区 4 月份降水的显著偏少。相反在 1973~1984 年,华南地区降水偏多时期,环流形势则完全相反。同样,华南 5 月份降水偏少和偏多时期的东亚环流形势具有和 4 月份相似的特征,只是 5 月份显著异常的大气环流场的范围有所增大,强度有所增强。

3.3 中西太平洋海温与我国华南 4、5 月份降水的可能关系

分别用华南 4、5 月份降水与前期及同期的全球海温求相关(图略),由图分析可得,华南 4 月份降水与前一年 7~11 月份的中西太平洋海温、华南 5 月份降水与当年 2~5 月份的中西太平洋海温有显著的负相关关系,但影响降水异常的海温关键区及敏感时段有所不同。下面只给出了华南 4 月份降水与前一年 8 月份全球海温(图 11a)、华南 5 月份降水与当年 3 月份全球海温(图 11b)的相关图,由图可见,华南 4 月份降水与中西太平洋(5°N~20°N, 140°E~210°E)有着显著的负相关关系,中心数值小于-0.3,华南 5 月份降水与中西太平洋(5°N~20°N, 150°E~230°E)也具有显著的负相关,中心数值小于-0.3,相关系数均通过了 95% 的信度检验。为方便起见,简称中西太平洋区域(5°N~20°N, 140°E~210°E)为关键区 A,称区域(5°N~20°N, 150°E~230°E)为关键区 B,因此关键区 A 和关键区 B 分别为影响华南 4、5 月份

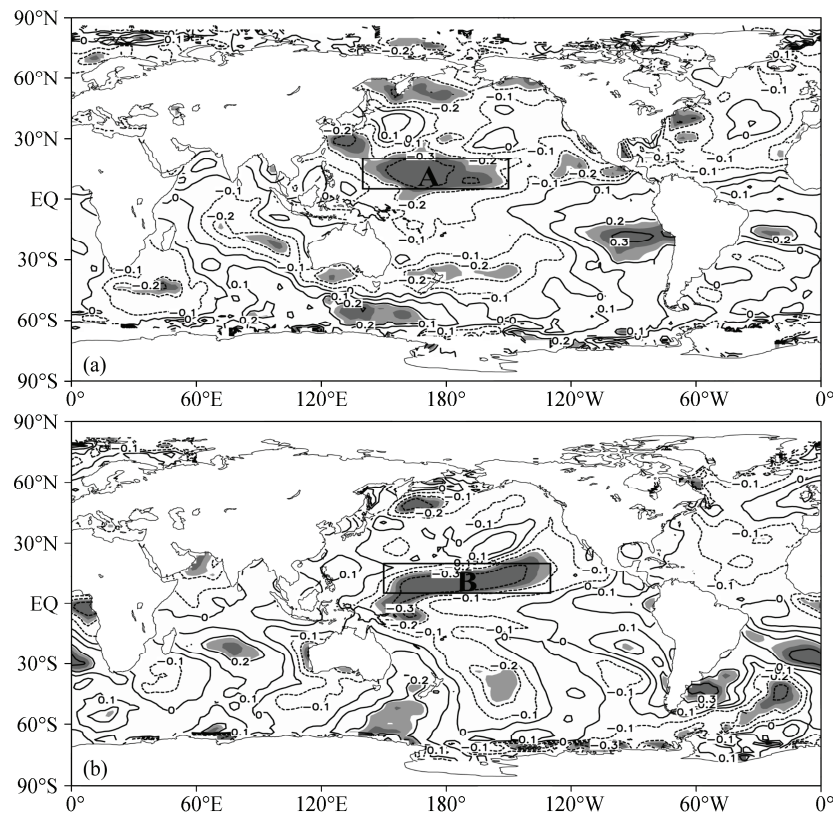


图 11 (a) 华南 4 月份降水与前一年 8 月份全球海温的相关(方框区域为关键区 A), (b) 华南 5 月份降水与当年 3 月份全球海温的相关(方框区域为关键区 B), 深、浅阴影区分别表示通过 95% 和 90% 信度检验的区域

Fig.11 (a) The correlation between precipitation in April over South China and global SST in August in the last year (the rectangle is key area A), (b) and the correlation between precipitation in May over South China and global SST in March at the same year (the rectangle is key area B), the heavy and light shadings indicate statistical significance at the 5% and 10% levels, respectively

降水异常的海温关键区。分别对区域平均的关键区 A 海温和关键区 B 海温进行标准化处理, 得到影响华南 4 月份降水异常的关键区 A 海温异常指数 (简称 SSTA 指数) 和影响华南 5 月份降水异常的关键区 B 海温异常 SSTA 指数。

图 12a 和 12b 为逐月的关键区 A 和关键区 B SSTA 指数分别与华南 4、5 月份降水的超前滞后相关图, 点线和短虚线分别代表通过 95% 和 99% 的信度检验, 其中 6~12 月表示前一年的关键区逐月 SSTA 指数与降水的相关。分析得到, 前一年 7~11 月份的中西太平洋海温 (关键区 A) SSTA 指数与华南 4 月份降水有显著的负相关关系, 相关系数均通过 95% 的信度检验, 其中 8 月份和 11 月份的相

关系数通过了 99% 的信度检验, 相关系数分别为 -0.368 和 -0.351 。前期 2~4 月份的中西太平洋海温 (关键区 B) SSTA 指数与华南 5 月份降水有显著的负相关关系, 相关系数均通过 99% 的信度检验, 相关系数分别为 -0.347 、 -0.408 以及 -0.372 , 同期 5 月份关键区海温与华南 5 月份降水的相关系数通过了 95% 的信度检验。

我们做了 1951~2005 年前一年 7~11 月份平均的关键区 A 海温异常 SSTA 指数 (图 13a) 以及同一年 2~5 月份平均的关键区 B 海温异常 SSTA 指数 (图 13b) 的标准化距平序列。由图 13a 可得, 前一年 7~11 月份平均的关键区 A 海温异常 SSTA 指数存在显著的年代际变化, 在 1971 年左右发生

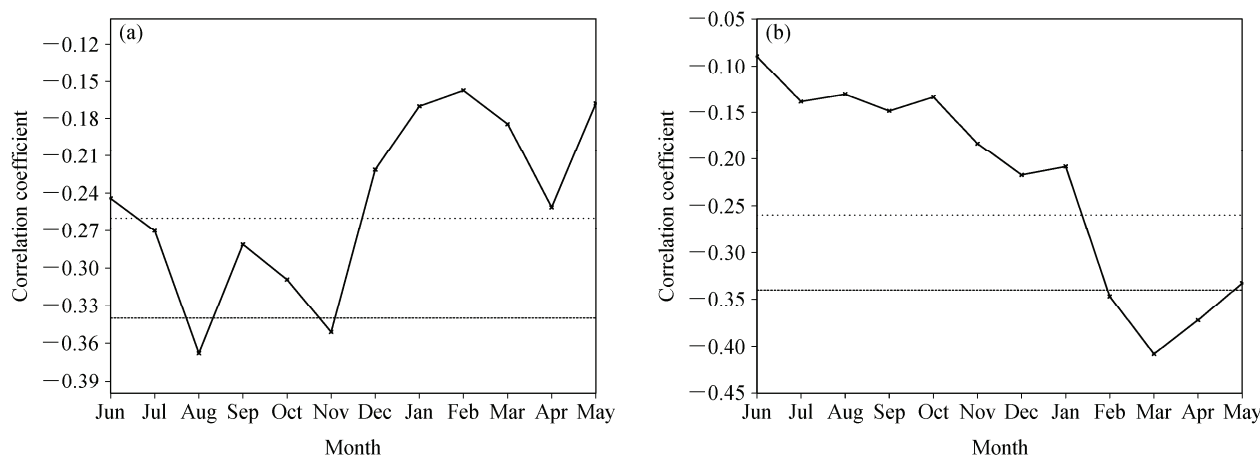


图 12 逐月中西太平洋海温 (a) 关键区 A 和 (b) 关键区 B 海温异常指数 (SSTA 指数) 分别与华南 (a) 4 月份和 (b) 5 月份降水的相关, 图中点线和短虚线分别代表通过 95% 和 99% 的信度检验

Fig.12 (a) The correlation between the monthly sea surface temperature anomaly (SSTA) index over mid-West Pacific ocean in key area A and precipitation in April over South China, and (b) the correlation between SSTA index in key area B and precipitation in May over South China, the dotted line and short dashed line represent the 95% and 99% confidence level test

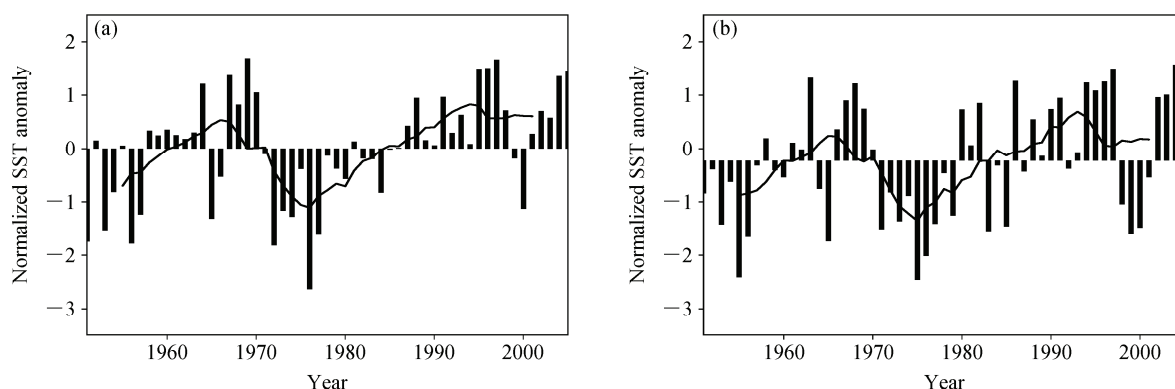


图 13 1951~2005 年 (a) 前一年 7~11 月份平均的中西太平洋 ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\text{E}\sim 210^{\circ}\text{E}$) 海温以及 (b) 同一年 2~5 月份平均的中西太平洋 ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{E}\sim 230^{\circ}\text{E}$) 海温的标准化距平序列, 折线代表 9 年滑动平均

Fig.13 The normalized anomaly time series of SST (a) averaged from July to November over mid-West Pacific ocean ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\text{E}\sim 210^{\circ}\text{E}$) in the last year and (b) averaged from February to May over mid-West Pacific ocean ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{E}\sim 230^{\circ}\text{E}$) in the same year for 1951-2005. The curved lines indicate a 9-year running mean

年代际转折, 从 1971 年之前的正位相转变为负位相, 1987 年之后又转变为正位相。图 14a 为 1951~2005 年华南 4 月份降水与前一年 7~11 月份平均的关键区 A 海温异常 SSTA 指数的年代际变化, 由图可见, 1951~2005 年华南 4 月份降水有着显著的“负—正—负”的年代际变化, 关键区 A 海温异常 SSTA 指数则对应着显著的“正—负—正”的年代际转变, 可见华南 4 月份降水的年代际变化与前一年 7~11 月份关键区 A 海温异常 SSTA 指数的年代际变化有着显著的负相关关系。从图 13b 可得, 同一年 2~5 月份平均的中西太平洋海温 SSTA 指数也存在着显著的年代际变化, 在 1971 年左右发生年代际转折, 从 1971 年之前的正位相转变为负位相, 1986 年之后又转变为正位相。图 14b 为 1951~2005 年华南 5 月份降水与同一年 2~5 月份平均的关键区 B 海温异常 SSTA 指数的年代际变化, 由图可见, 1951~2005 年华南 5 月份降水有着显著的“负—正—负”的年代际变化, 关键区 B 海温异常 SSTA 指数则对应着显著的“正—负—正”的年代际转变, 可见华南 5 月份降水的年代际变化与同一年 2~5 月份关键区 B 海温异常 SSTA 指数的年代际变化有着显著的负相关关系。

综上所述, 从华南 4 月份降水与中西太平洋海温的相关分析可得, 4 月份降水与中西太平洋海温有着显著的负相关, 4 月份降水的年代际变化与前一年 7~11 月份中西太平洋海温的年代际变化有着较好的一致性。华南 4 月份降水在 1971 年左右从

降水相对偏少转变为降水相对偏多, 与前一年 7~11 月份中西太平洋海温从 1971 年左右从海温偏高转变为海温偏低有着密切的关系。从华南地区 5 月份降水与中西太平洋海温的相关分析可得, 5 月份降水与中西太平洋海温有着显著的负相关, 5 月份降水的年代际变化与当年 2~5 月份中西太平洋海温的年代际变化有着很好的一致性。华南 5 月份降水在 1971 年左右从降水相对偏少转为降水相对偏多, 与同一年 2~5 月份中西太平洋海温从 1971 年左右从海温偏暖转变为海温偏冷有着密切的关系。

3.4 中西太平洋海温对华南 4、5 月份降水的可能影响途径

我国华南 4 月份降水的年代际转变与前期中西太平洋海温的年代际转变有着密切的关系。当前一年 7~11 月份的中西太平洋海温偏高时, 我国华南 4 月份降水相对偏少, 当前一年 7~11 月份的中西太平洋海温偏低时, 我国华南 4 月份降水相对偏多。

中西太平洋海温对华南 4 月份降水的影响, 可能是通过影响西太平洋副热带高压来实现的。可能的影响机理是: 当中西太平洋海温偏暖时, 会导致该海区的海平面气压偏低, 菲律宾以东洋面出现气旋性环流异常, 副高偏弱、位置偏东, 南海海面上的偏南风偏弱, 向华南地区的水汽输送减弱, 造成华南 4 月份降水的异常偏少。反之, 当中西太平洋海温偏冷, 该海区的海平面气压就会偏高, 菲律宾以东洋面被反气旋性环流异常所控制, 副高偏强、位置偏西, 南海海面上的偏南风偏强, 向华南地区的

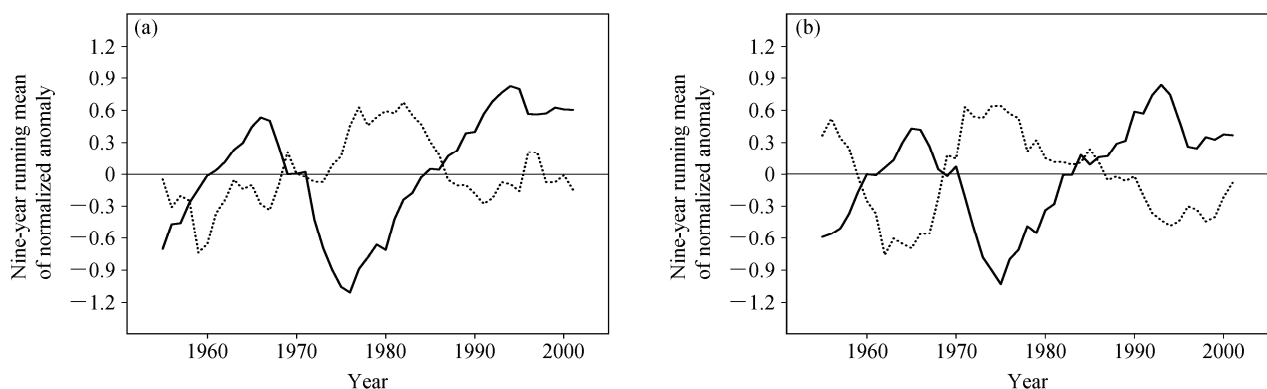


图 14 1951~2005 年华南 (a) 4 月份降水 (点线) 与前一年 7~11 月份平均的中西太平洋 ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\text{E}\sim 210^{\circ}\text{E}$) 海温 (实线) 以及 (b) 5 月份降水 (点线) 与同一年 2~5 月份平均的中西太平洋 ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{E}\sim 230^{\circ}\text{E}$) 海温 (实线) 的年代际变化, 原始数据标准化距平序列的 9 年滑动平均代表年代际变化

Fig.14 The interdecadal variability of (a) precipitation in April (dotted line) and SST averaged from July to November over mid-West Pacific ocean (solid line) ($140^{\circ}\text{E}\sim 210^{\circ}\text{E}$, $5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$) in the last year, and (b) precipitation in May (dotted line) and SST averaged from February to May over mid-West Pacific ocean (solid line) ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{E}\sim 230^{\circ}\text{E}$) in the same year for 1951~2005. The interdecadal variability refers to a 9-year running mean of the normalized anomaly time series of the original data

水汽输送增强,造成华南 4 月份降水的异常偏多。

前面我们已经分析过了,在降水偏少时期,华南地区北边界有异常的偏南风,在降水偏多时,华南北边界有异常的偏北风,这主要取决于亚欧大陆以及北太平洋的大气热力状况对比。而华南地区南边界南风的增强则可能取决于中西太平洋海温的热力状况。另外,东亚高空西风急流也对华南 4 月份降水有着重要的影响,当东亚高空西风急流偏北时,华南降水偏少,当高空西风急流偏南时,华南降水偏多。

华南 5 月份降水年代际转变与前期中西太平洋海温的年代际转变有着密切的关系。当同一年 2~5 月份中西太平洋海温偏暖时,我国华南 5 月份降水相对偏少,相反当同一年 2~5 月份的中西太平洋海温偏冷时,我国华南 5 月份降水相对偏多。同样,对于 5 月份来说,中西太平洋海温对华南 5 月份降水的影响,是通过影响西太平洋副高来实现的,和 4 月份有着相似的影响过程和机制,在这里不做重复。

4 总结和讨论

本文利用华南 4、5 月份降水资料、NOAA 海温资料以及 NECP 再分析资料,对华南地区 4、5 月份降水的年代际变化特征及其对应的环流背景,以及可能的影响机制进行了研究。研究表明,华南地区 4、5 月份降水均具有较为显著的年代际变化特征,4 月份降水在 1970 年代初期以及 1980 年代后期发生年代际转折,从降水偏少转为降水偏多,之后又转为降水偏少,5 月份降水在 1970 年代初期以及 1990 年代初期发生年代际转折,从降水偏少转为降水偏多,又转为降水偏少。

在华南 4、5 月份年代际降水偏少时期,前期中西太平洋海温显著偏高,同期亚洲大陆南部及非洲大陆海平面气压显著偏低,北太平洋海区海平面气压偏高。我国华南上空存在反气旋性环流异常,华南地区北边界存在显著的偏南风异常,造成我国华南地区北边界有异常的水汽输出。同时,我国大陆对流层中上层大气显著偏暖,东亚高空急流显著偏北,副高偏弱、位置偏东,从副高西南侧向华南地区的水汽输送减少,从而在华南地区形成异常的水汽辐散,最终导致华南 4、5 月份降水减少。反之,情况相反。

华南 4 月份降水与前一年 7~11 月份的中西太平洋海温、华南 5 月份降水与同一年 2~5 月份的

中西太平洋海温有显著的负相关。华南 4 月份降水在 1971 年左右发生了年代际转变,从降水相对偏少转变为降水相对偏多,这与前一年 7~11 月份中西太平洋海温在 1971 年左右从海温相对偏高转变为海温相对偏低有着密切的关系。华南 5 月份降水在 1971 年左右从降水相对偏少转为降水相对偏多,与当年 2~5 月份中西太平洋海温在 1971 年左右从海温偏暖转变为海温偏冷有着密切的关系。

中西太平洋海温对华南 4、5 月份降水的影响可能是通过影响中西太平洋副热带高压来实现的。其可能的影响机理是:当中西太平洋海温偏暖(冷)时,会导致该海区的气压偏低(高),进而造成副热带高压偏弱(强)、位置偏东(西),菲律宾以东洋面出现气旋(反气旋)性环流异常,南海海面上的偏南风偏弱(强),因此向华南地区的水汽输送减弱(增强),最终造成华南地区降水的减少(增多)。

值得指出的是,本文只是从海温及环流场的角度分析了华南 4、5 月份降水年代际变化的可能影响机制。诸多研究表明,华南汛期降水还与前期冬季青藏高原积雪等有着密切的关系(陈烈庭和阎志新,1979;蔡学湛,2001;Wu and Kirtman,2007)。因此从陆面过程的角度探讨我国华南 4、5 月份降水年代际变化的机理,也是将来需要进一步开展的工作之一。另外,前期及同期中西太平洋海温异常通过影响后期大气环流异常,从而影响华南 4、5 月份降水异常的可能机制只是在诊断分析的基础上得出来的,其中更细致的影响机理应有数值模拟方法予以揭露。

参考文献 (References)

- 蔡学湛. 2001. 青藏高原雪盖与东亚季风异常对华南前汛期降水的影响[J]. 应用气象学报, 12 (3): 358-367. Cai Xuezhao. 2001. The influence of abnormal snow cover over Qinghai-Xizang plateau and east Asian monsoon on early rainy season rainfall over South China[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (3): 358-367.
- 陈烈庭, 阎志新. 1979. 青藏高原冬春季积雪对大气环流和我国南方汛期降水的影响[C]// 中长期水温气象预报文集 (第一集). 北京: 水电出版社, 195-194. Chen Lieting, Yan Zhixing. 1979. Influences of snow cover over the Tibetan Plateau during winter and spring on atmospheric circulation and on rainfall over the southern China in pre-monsoon period[C]// Collected Papers on Long-term Hydrologic and Meteorological Forecasts (1) (in Chinese). Beijing: Water Conservancy and Power Press, 185-194.
- 邓立平, 王谦谦. 2002. 华南前汛期 (4-6 月) 降水异常特征及其与我国近海海温的关系[J]. 热带气象学报, 18 (1): 46-55. Deng Liping, Wang

- Qianqian. 2002. On the relationship between precipitation anomalies in the first raining season (April–June) in Southern China and SST over offshore waters in China[J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 18 (1): 46–55.
- Gong Daoyi, Ho Changhai. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29(10): 1436, doi: 10.1029/2001GL014523.
- 高绍凤, 夏骏峰, 何玉冰. 1994. 华南夏季大气环流的变异及其与季风降水的关系[J]. *中山大学学报论丛*, (5): 1–6. Gao Shaofeng, Xia Junfeng, He Yubing. 1994. Anomalous of general circulation and relation between it and monsoon precipitation over South China in summer[J]. *Supplement to the Journal of Sun Yatsen University* (in Chinese), (5): 1–6.
- Hu Z. Z. 1997. Interdecadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500 hPa height and global sea surface temperature[J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D1): 19403–19412.
- 李春晖, 梁建茵, 吴尚森. 2004. 近百年广州汛期降水变化特征及其影响因子[J]. *热带气象学报*, 20 (4): 365–374. Li Chunhui, Liang Jianyin, Wu Shangsen. 2004. The characteristics of precipitation in the raining season in Guangzhou and its affecting factors over the past 100 years[J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 20 (4): 365–374.
- Li Hongyi, Lin Zhaohui, Chen Hong. 2009. Interdecadal variability of spring precipitation over South China and its associated atmospheric water vapor transport[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 20 (2): 113–118.
- 李宏毅, 林朝晖, 陈红. 2010. 我国华南 3 月份降水年代际变化的特征[J]. *气候与环境研究*, 15 (3): 311–321. Li Hongyi, Lin Zhaohui, Chen Hong. 2010. Interdecadal variability of precipitation in March over South China[J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15 (3): 311–321.
- 梁建茵. 1994. 6 月西太平洋副高脊线的年际变化及其对华南降水的影响[J]. *热带气象学报*, 10 (3): 274–279. Liang Jianyin. 1994. The interannual variations of the subtropic high ridge position over western pacific in June and its influence on precipitation in south of China[J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 10 (3): 274–279.
- Liang Pingde, Liu Aixia. 1994. Winter Asia jetstream and seasonal precipitation in East China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 11 (3): 311–318.
- Liang Xinzong, Wang Weichyung. 1998. Associations between China monsoon rainfall and tropospheric jets[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124 (552): 2597–2623.
- 廖清海, 高守亭, 王会军, 等. 2004. 北半球夏季副热带西风急流变异及其对东亚夏季风气候异常的影响[J]. *地球物理学报*, 47 (1): 10–18. Liao Qinghai, Gao Shouting, Wang Huijun, et al. 2004. Anomalies of the extratropical westerly jet in the North Hemisphere and their impacts on East Asian summer monsoon climate anomalies[J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 47 (1): 10–18.
- 林爱兰, 吴尚森. 1996. 近 40 年华南汛期旱涝变化及趋势预测[J]. *热带气象学报*, 12 (2): 160–166. Lin Ailan, Wu Shangsen. 1996. Variations and trend prediction of rainfall of rainy season in South China in 1951–1991[J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 12 (2): 160–166.
- 陆日宇. 2003. 华北汛期降水量年代际和年际变化之间的线性关系[J]. *科学通报*, 48 (7): 718–722. Lu Riyu. 2003. Linear relationship between the interdecadal and interannual variabilities of North China rainfall in rainy season[J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 48 (10): 1040–1044.
- 孙安健. 1994. 江淮旱涝年份准定常行星波分布于平均纬向风速的差异[J]. *应用气象学报*, 5 (1): 68–76. Sun Anjian. 1994. The differences in the zonal winds and quasi-stationary waves between the floods/droughts in Jianghuai Region[J]. *Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 5 (1): 68–76.
- Wei Jie, Lin Zhaohui, Xia Jim, et al. 2005. Interannual and interdecadal variability of atmospheric water vapor transport in the Haihe River Basin[J]. *Pedosphere*, 15: 585–594.
- Wu Renguang, Kirtman B P. 2007. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow[J]. *J. Climate*, 20: 1285–1303.
- 吴尚森, 黄成昌, 薛惠娴. 1990. 华南后汛期降水的年际变化[J]. *热带气象学报*, 6 (4): 348–355. Wu Shangsen, Huang Chengchang, Xue Huixian. 1990. On interannual variation of precipitation during the second rainy season in South China[J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 6 (4): 348–355.
- 吴尚森, 梁建茵. 1992. 华南前汛期旱涝时空分布特征[J]. *热带气象学报*, 8 (1): 87–92. Wu Shangsen, Liang Jianyin. 1992. Temporal and spatial characteristics of the drought and flood during the rainy season in South China[J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 8 (1): 87–92.
- 吴尚森, 梁建茵, 黄增明. 1998. 厄尔尼诺事件及其对华南天气气候的影响[J]. *广东气象*, (1): 8–10. Wu Shangsen, Liang Jianyin, Huang Zengming. 1998. El Niño event and its impact on weather and climate over South China[J]. *Guangdong Meteorology* (in Chinese), (1): 8–10.
- Xin Xiaoge, Yu Rucong, Zhou Tianjun, et al. 2006. Drought in late spring of South China in recent decades[J]. *J. Climate*, 19: 3197–3206.
- 徐海明. 1997. 华南夏季降水与全球海温的关系[J]. *南京气象学院学报*, 20 (3): 392–399. Xu Haiming. 1997. Relationship between South China summer precipitation and global SST[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 20 (3): 392–399.
- Xue Feng. 2001. Interannual to interdecadal variation of East Asian summer monsoon and its association with the global atmospheric circulation and sea surface temperature[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18: 567–575.
- Yang Fanglin, Lau K M. 2004. Trend and variability of China precipitation in spring and summer: linkage to sea-surface temperatures[J]. *International Journal of Climatology*, 24: 1625–1644.
- 曾刚, 孙照渤, 王维强, 等. 2007. 东亚夏季风年代际变化——基于全球观测海表温度驱动 NCAR Cam3 的模拟分析[J]. *气候与环境研究*, 12 (2): 211–224. Zeng Gang, Sun Zhaobo, Wang Weiqiang, et al. 2007. Interdecadal variation of East Asian summer—Monsoon simulated by NCAR Cam3 driven by global SSTs[J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (2): 211–224.
- Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in china[J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D08104.