

顾伟宗,陈丽娟,伯忠凯.印度洋海面温度对黄淮地区夏季降水影响的年代际变化研究[J].海洋气象学报,2020,40(4): 89-96.

GU Weizong, CHEN Lijuan, BO Zhongkai. Study on interdecadal variation of impact of Indian Ocean SST on Huanghuai summer precipitation[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(4): 89-96. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.010. (in Chinese)

印度洋海面温度对黄淮地区夏季降水影响的年代际变化研究

顾伟宗¹,陈丽娟²,伯忠凯³

(1.山东省气象局大气探测技术保障中心,山东 济南 250031; 2.国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081; 3.山东省气候中心,山东 济南 250031)

摘要: 利用1961—2016年我国400个气象台站夏季降水资料、NCEP/NCAR再分析资料和NOAA的海面温度资料,分析了黄淮地区夏季降水与同期大气环流及前期海面温度关系的年代际变化特征。结果显示,20世纪80年代之前(后),前期冬季太平洋海面温度发生厄尔尼诺时,黄淮地区夏季降水偏少(多),20世纪80年代中期之前,前期冬季印度洋海面温度全区一致型模态与黄淮地区夏季降水关系较弱,但是从20世纪80年代中期开始,正相关关系明显增强。进一步研究发现,前期印度洋海面温度一致偏高时,夏季500 hPa高度场上,副热带高压明显增强,这种相关关系20世纪80年代中期之后明显强于20世纪80年代之前,海平面气压场上,高相关区在20世纪80年代之后呈现明显的南方涛动模态,印度洋海面温度通过影响决定黄淮地区夏季降水异常的大气环流关键区域,使得其与黄淮地区夏季降水的关系随着年代际变化增强。

关键词: 黄淮地区; 夏季降水; 海面温度; 年代际

中图分类号: P462.4; P468.024 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)04-0089-08
DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.010

Study on interdecadal variation of impact of Indian Ocean SST on Huanghuai summer precipitation

GU Weizong¹, CHEN Lijuan², BO Zhongkai³

(1. Ensuring Center of Atmospheric Sounding Technology, Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China; 2. Laboratory of Climate Studies (CMA), National Climate Center, Beijing 100081, China; 3. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China)

Abstract Based on the summer precipitation data of 400 meteorological stations in China, NCEP/NCAR reanalysis data, and NOAA SST (sea surface temperature) dataset from 1961 to 2016, the interdecadal variations of the relationship between the summer precipitation in the Huanghuai region and synchronous circulation as well as that between the summer precipitation in the Huanghuai region and SST of the last year are studied. The results show before (after) the 1980s, when El Niño occurs to the Pacific SST in the last winter, the summer precipitation in the Huanghuai region is less (more); before the mid-1980s, the relationship between the Indian Ocean Basin-wide (IOBW) of the last winter and the summer precipitation in the Huanghuai region is weak, while from the 1980s, the positive correlation is

收稿日期:2020-09-18; 修订日期:2020-10-27

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB453203);国家自然科学基金项目(41275073);山东省气象局重点科研项目(2016sdqxz02)

第一作者:顾伟宗,男,博士,正高级工程师,主要从事气候异常诊断和预测方法研究, longmarch529@163.com。

通信作者:陈丽娟,女,博士,正高级工程师,主要从事气候异常诊断和预测方法研究, chenlj@cma.gov.cn。

significantly enhanced. Further study shows when the Indian Ocean SST is consistently higher in the last year, the subtropical high in the geopotential height field at 500 hPa in summer is greatly enhanced, and such correlation after the mid-1980s is obviously stronger than that before the 1980s. On the sea-level pressure field, the area of higher correlation presents obvious Southern Oscillation mode after the 1980s, and the Indian Ocean SST strengthens its relationship with the summer precipitation in the Huanghuai region with interdecadal variations by affecting the key circulation areas which determines the summer precipitation anomaly in the Huanghuai region.

Key words the Huanghuai region; summer precipitation; sea surface temperature; interdecadal

引言

中国东部夏季降水异常成因及预测研究始终是气象工作者关注的重点,随着不断深入研究,对华北雨季、江淮梅雨、华南汛期等有了较深的理解和认识,但是针对黄淮地区夏季降水异常成因研究还相对薄弱。

在实时短期气候预测业务中,黄淮区域也是预测技巧偏低的地区。中国气象局国家气候中心1978—2017年全国汛期预测评估档案(图1)显示,

汛期预测评分60分(评分方法见陈桂英和赵振国^[1]提出的短期气候预测评估方法)以下的年份有4 a(1983、1997、1999和2003年)。对比预测图和实况图,均失败在黄淮区域旱涝的预测,一种情况是空报洪涝(1997、1999年),另一种情况是漏报洪涝(1983、2003年)。即使在全国总体预报效果较好(70分以上)的一些年份,黄淮区域预测失败的概率仍然是较高的,例如2011年,预测多雨带中心在黄淮,实况是在长江下游到江南北部。业务现状说明了黄淮区域预测的难度和复杂性。

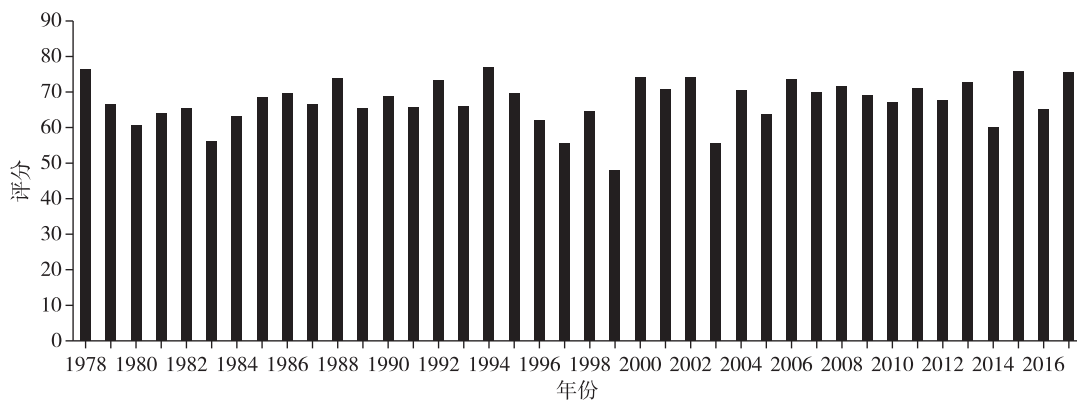


图1 1978—2017年全国汛期降水预测评分

Fig.1 Score of summer precipitation prediction in China from 1978 to 2017

利用时间较长、分布均匀的站点观测资料,对中国的气候区域进行了划分,通过客观计算,确定(30°~36.5°N, 105°~122°E)的区域为黄淮区域^[2],该区域处于我国南方雨量丰沛和北方干旱少雨的过渡地带,具有整体一致性特征。汛期(6—8月)降水量最大,集中了年降水量的45%~65%,降水的年际变化较大,最大年与最小年降水量相差悬殊,极易发生旱涝灾害,是我国气象灾害最为严重的地区之一。

已有研究成果认为江淮梅雨和淮河流域降水异常与ENSO和东亚夏季风强弱有密切关系。例如金祖辉和陶诗言^[3]、ZHANG et al.^[4]以及HUANG et al.^[5]研究发现当ENSO发展成成熟时,容易导致江淮流

域夏季降水偏多。张庆云和陶诗言^[6]研究发现东亚夏季风偏弱时,江淮流域夏季降水易偏多;并且淮河流域夏季降水的振荡特征与长江中下游夏季降水的年代际位相差异比较大^[7]。还有研究认为厄尔尼诺(拉尼娜)次年夏季,长江流域和江南北部地区降水偏多(少),而淮河流域降水偏少(多)^[8-13],可见不同的研究工作结论并不完全一致。

20世纪70年代后期,伴随着全球气候系统的年代际变化,全球海-陆-气耦合系统发生了显著的年代际变化,不同地区的海面温度特征也发生了年代际变化,中国夏季降水在20世纪90年代也经历了年代际转型,东亚夏季风减弱,南方降水增多,华

北降水减少,呈所谓的南涝北旱分布型^[14-15]。研究发现,ENSO与东亚夏季风和我国东部夏季降水的关系发生了变化^[16-17],ENSO与我国夏季降水异常对应的关系及其在预测中的指示意义有所减弱^[18],并且冬季Niño3区海面温度与中国夏季降水的关系有明显的地域特征^[19-20],可见随着年代际变化,ENSO对区域夏季降水的影响发生了变化。

近些年来印度洋海面温度对东亚区域降水的影响日趋重要,印度洋热力异常对作为第二推动力的海陆热力差异,对印度洋—太平洋海面温度配置,以及对大气环流和亚澳季风的变异均具有十分重要的作用,并且对东亚夏季风和我国夏季降水有明显影响^[21-26]。热带印度洋海面温度全区一致增暖(变冷)在厄尔尼诺(拉尼娜)衰减时发展到盛期,可以改变对流活动和沃克环流(Walker cell)异常以及激发向东传播的开尔文波(Kelvin wave),从而对大气环流和气候异常造成影响^[27-31]。印度洋海盆海面温度全区一致模态对东亚夏季气候的影响也出现显著的年代际变化,特别是对西北太平洋反气旋的影响明显增强^[32-35],对南亚高压的影响也在增强^[36]。

在气候变化的背景下,不同区域海面温度异常与黄淮地区夏季降水的年际关系是否发生了变化?不同海域影响关系的变化是否一致?这种变化的影响途径是什么?这是本文要研究的主要内容。

1 资料来源

本文所用的数据为1961年6月—2016年8月NCEP/NCAR再分析资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times$

2.5° ,NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration,美国国家海洋和大气管理局)提供的1960年12月—2016年8月全球海面温度数据,水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$;国家气象信息中心提供的中国400个气象站月平均降水资料,数据为1961年6月—2016年8月;国家气候中心最新ENSO事件特征量综合表。

2 不同区域海面温度事件与黄淮地区夏季降水关系的不稳定性特征

以黄淮地区($30^{\circ} \sim 36.5^{\circ} \text{N}$, $105^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$)夏季降水为研究对象^[1],根据国家气候中心最新ENSO事件特征量综合表,统计了前期冬季为厄尔尼诺状态时,次年黄淮地区夏季降水情况。

2.1 厄尔尼诺事件与黄淮地区夏季降水的关系变化

表1为前期冬季发生海面温度异常时,次年夏季黄淮区域降水距平百分率,可以发现前期冬季发生厄尔尼诺时的17a中,黄淮地区次年夏季降水有7a偏少,10a偏多;总体来看,前冬ENSO暖位相和黄淮夏季降水的关系没有显著性特征,但是进一步分析可以发现,在20世纪80年代以前,当前期冬季发生厄尔尼诺的6a中,次年黄淮地区夏季降水均偏少;在80年代以后,前期冬季发生厄尔尼诺的11a中,次年黄淮地区夏季降水9a偏多,2a偏少,这种现象显示厄尔尼诺与黄淮地区夏季降水的关系在80年代前后发生了变化,由80年代以前的厄尔尼诺年偏少变成了80年代以后的偏多为主。但是,当前期发生拉尼娜现象时,相关关系没有发生明显的变化。

表1 不同前期海面温度背景下黄淮地区夏季降水情况

Table 1 Summer precipitation in the Huanghuai region under the background of El Niño and La Niña in the last year

前期海面温度背景	黄淮地区夏季降水距平百分率(事件次年)/%
厄尔尼诺(1963、1965、1968、1972、1976、1977、1979、1982、1986、1991、1994、1997、2002、2004、2006、2009、2015年)	-5.9(1964年)、-33.6(1966年)、-9.3(1969年)、-8.7(1973年)、-13.2(1977年)、-27.9(1978年)、23.4(1980年)、6.2(1983年)、5.4(1987年)、-22(1992年)、-1.4(1995年)、18.4(1998年)、21.5(2003年)、46.4(2005年)、21.8(2007年)、3.3(2010年)、7.9(2016年)
拉尼娜(1964、1970、1973、1975、1984、1988、1995、1999、2000、2007、2010、2011年)	8.14(1965年)、2.2(1971年)、-9.7(1974年)、-20.9(1976年)、-24.6(1985年)、10.0(1989年)、13.8(1996年)、15.7(2000年)、-19.8(2001年)、9.8(2008年)、5.1(2011年)、-11.8(2012年)

由表1中的个例普查可以发现,前期厄尔尼诺与后期黄淮地区夏季降水的关系在20世纪80年代发生了明显的变化,文中计算了Niño3.4指数与黄淮地区夏季降水的11a滑动相关(图2),从表1和图2中可以看到,两者的相关关系在1972年(1967—1977年资料计算所得)由负相关转为显著

的正相关,即20世纪80年代之前Niño3.4为正指数(暖位相)时有利于黄淮地区降水偏少。随着年代际的推进,20世纪80年代之后这种相关关系发生了反位相的变化,这显示了太平洋海面温度对黄淮地区夏季降水影响的不稳定性。



图2 前期冬季 Niño3.4 海面温度指数与黄淮地区夏季降水 11 a 滑动相关

Fig.2 Correlation between Niño3.4 SST Index of the last winter and 11-year moving average of summer precipitation in the Huanghuai region

2.2 印度洋全区一致型海面温度指数与黄淮地区夏季降水的关系

由上面的分析可以看出,从 20 世纪 80 年代中期开始,太平洋海面温度与黄淮地区夏季降水的关系逐渐变得不稳定,那么从 20 世纪 80 年代开始影响黄淮地区夏季降水的主导因子是什么?为了深入研究,以 21 a 作为窗口长度,计算前冬印度洋全区一致型海面温度模态 (IOBW) 指数和黄淮地区夏季降水的相关 (图 3)。印度洋全区一致模态在 20 世纪 80 年代中期以前与黄淮地区夏季降水呈非常弱的正相关,但是从 80 年代中期开始,正相关呈现显著的增加趋势,进入 21 世纪,相关性通过 0.05 信度检验。研究表明印度洋海面温度呈明显的升温趋势^[26],这种相关性的显著增加是否是由于印度洋海面温度的线性增暖造成的呢?文中去除了 IOBW 指数和降水的长期变化趋势,再次计算两者的 21 a 滑动相关系数 (图 3),可见相关增强的显著性依然存在 (图略)。说明二者的年代际关系在 20 世纪 80 年代之后确实有明显增强,这种增强是通过什么途径来影响黄淮地区夏季降水的呢?

3 黄淮地区夏季降水与大气环流年际关系的年代际变化

上面分析表明,黄淮地区夏季降水与前期太平洋海面温度和印度洋海面温度年际关系发生了明显的年代际变化,与前期太平洋海面温度的关系在 20 世纪 80 年代发生了反位相的转换,与印度洋海面温度的关系从 80 年代开始明显增强。大气环流

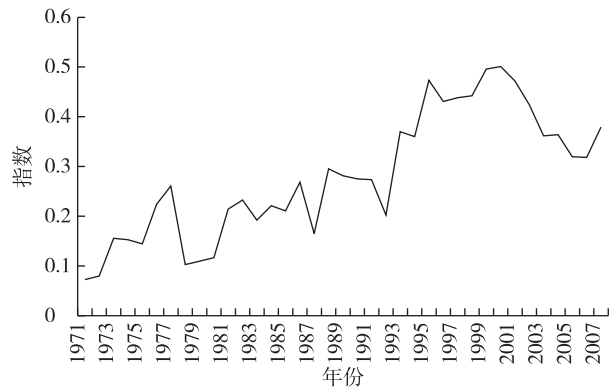


图3 热带印度洋前期冬季全区一致海面温度模态指数与黄淮地区夏季降水的 21 a 滑动相关

Fig.3 Correlation between the tropical Indian Ocean Basin-wide (IOBW) index of the last winter and 21-year moving average of summer precipitation in the Huanghuai region

异常是导致降水异常的直接原因,那么黄淮地区夏季降水与大气环流的关系是否随着全球变化的趋势发生了变化呢?为此,文中计算了不同时间段黄淮地区夏季降水与同期 500 hPa 位势高度场和海平面气压场的关系。

1961—1980 年,同期北半球 500 hPa 位势高度场影响黄淮地区夏季降水的主要区域是副热带西北太平洋区域 ($22^{\circ} \sim 32^{\circ} \text{N}$, $115^{\circ} \sim 135^{\circ} \text{E}$) 上空 (图 4a),黄淮地区夏季降水与该区域内位势高度均呈正相关关系;1981—2014 年期间的北半球高影响区域除了副热带西北太平洋区域 ($22^{\circ} \sim 32^{\circ} \text{N}$, $115^{\circ} \sim 135^{\circ} \text{E}$) 上空外,还有中高纬乌拉尔山地区 ($58^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$, $60^{\circ} \sim 68^{\circ} \text{E}$) 上空 (图 4b),表明不论在哪个年代际阶段,当阻塞高压和副热带高压 (以下简称“副高”) 偏强时,对应黄淮地区夏季降水往往偏多,尤其是西太平洋副高偏强,有利于引导副高边缘水汽输送加强,这样中高纬冷空气与副高边缘的暖湿气流易于在黄淮上空交绥,导致降水异常偏多,所以副高的强弱是导致该地区降水异常的主要原因。

在海平面气压场上,1961—1980 年期间,一个高相关区在热带西太平洋上空,通过 0.05 以上信度检验的区域位于菲律宾群岛东北向海域。当该区域海平面气压偏高时,底层气流辐合异常减弱,高层副高增强,黄淮地区降水偏多,该区域的相关性在 1981—2014 年期间与 1961—1980 年期间的相关性保持一致,也呈明显的正相关关系,并且通过 0.05 信度检验。另一个高相关区在澳大利亚以北上空,即南方涛动 (southern oscillation, SO) 达尔文站

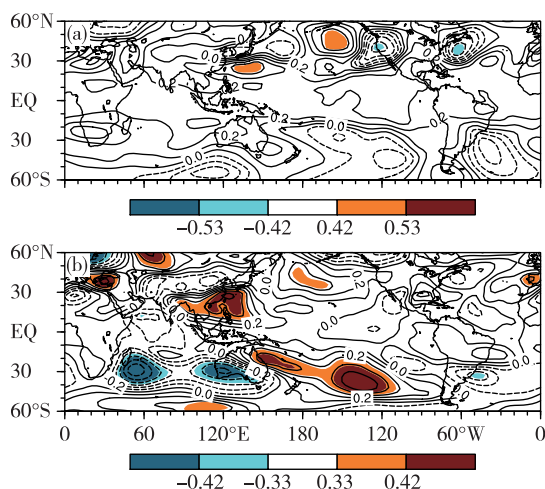


图4 黄淮地区夏季降水与同期500 hPa位势高度场的相关关系(a. 1961—1980年, b. 1981—2014年;彩色填充区为通过0.05和0.01信度检验区域)

Fig.4 Correlation between summer precipitation in the Huanghuai region and synchronous geopotential height at 500 hPa (a. from 1961 to 1980, b. from 1981 to 2014; colored area denotes passing the significant test at 0.05 and 0.01 level)

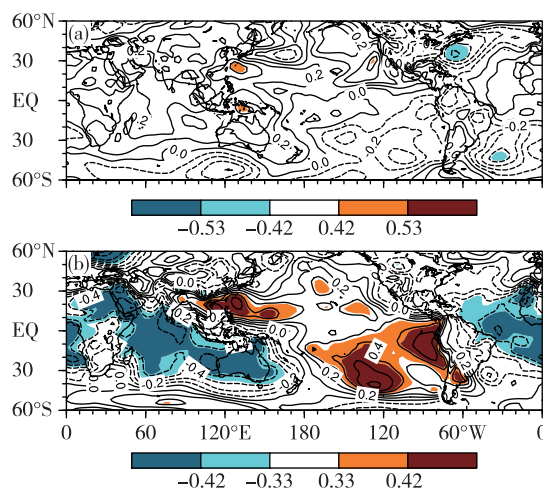


图5 黄淮地区夏季降水与同期海平面气压场的相关关系(a. 1961—1980年, b. 1981—2014年;彩色填充区为通过0.05和0.01信度检验区域)

Fig.5 Correlation between summer precipitation in the Huanghuai region and synchronous sea-level pressure (a. from 1961 to 1980, b. from 1981 to 2014; colored area denotes passing the significant test at 0.05 and 0.01 level)

附近的海平面,为正相关,当该区域海平面气压偏高时,底层气流辐合异常减弱,南方涛动减弱,黄淮地区降水偏多,这与前面的统计关系相符。但是在1981—2014年期间,该区域乃至整个印度洋上空海平面气压与黄淮地区夏季降水的相关关系发生了明显的年代际变化,呈明显的负相关,与东南太平洋上空海平面气压呈明显的正相关关系(图5),这种模式呈现南方涛动的模式,当南方涛动偏强时,黄淮地区降水偏多,当南方涛动偏弱时,黄淮地区降水偏少。这一转变与降水和海面温度关系的变化相符,在1981—2014年当ENSO发生时,黄淮地区夏季降水往往偏多。

4 前冬印度洋海面温度与夏季东亚大气环流耦合关系的年代际变化

由上面的分析可以看出,黄淮地区夏季降水与前期印度洋海面温度之间的关系逐渐增强,大气环流作为连接海面温度等外强迫因子与降水之间的纽带,通过分析前期海面温度与夏季大气环流之间的耦合关系,可以揭示海面温度与降水之间的关系发生年代际变化的可能原因。为此文中利用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的方法分析了不同时间段印度洋(30°S~20°N, 45°E~120°E)海面温度与北半球500 hPa高度场和海平面气压场

之间的耦合关系,从而进一步探索印度洋海面温度与黄淮地区夏季降水年际关系年代际变化增强的可能原因。

由冬季印度洋海面温度与夏季北半球500 hPa位势高度场的SVD分析的第一模态左异性相关分布(图6a)来看,热带印度洋海面温度呈整体一致的分布模式,中心达到-0.6以上,这一模式是印度洋海面温度异常的一个主要模式。对照右异性相关图(图6b)看,北半球500 hPa位势高度场热带地区基本一致,热带西北太平洋副高所处的位置,中心达到-0.6以上。可见,当前期印度洋海面温度整体偏高(低)时,夏季副高将偏强(弱),这种相关关系在1981—2014年表现得更加显著(图6c、d),500 hPa位势高度场上副高所处的位置-0.6以上的中心明显扩大,由此可见前期印度洋海面温度对夏季副高的影响呈正相关,并且这种相关性随着年代际的变化逐渐增强。

由1961—1980年冬季印度洋海面温度与夏季热带海平面气压场的SVD分析的第一模态左异性相关分布(图7a)来看,热带印度洋海面温度呈整体一致的分布模式,中心达到-0.6以上;对照右异性相关图(图7b)看,该阶段与印度洋海面温度整体一致偏高的模式匹配的海平面气压场,通过信度检验的区域很少。但是,在1981—2014年期间,当印度

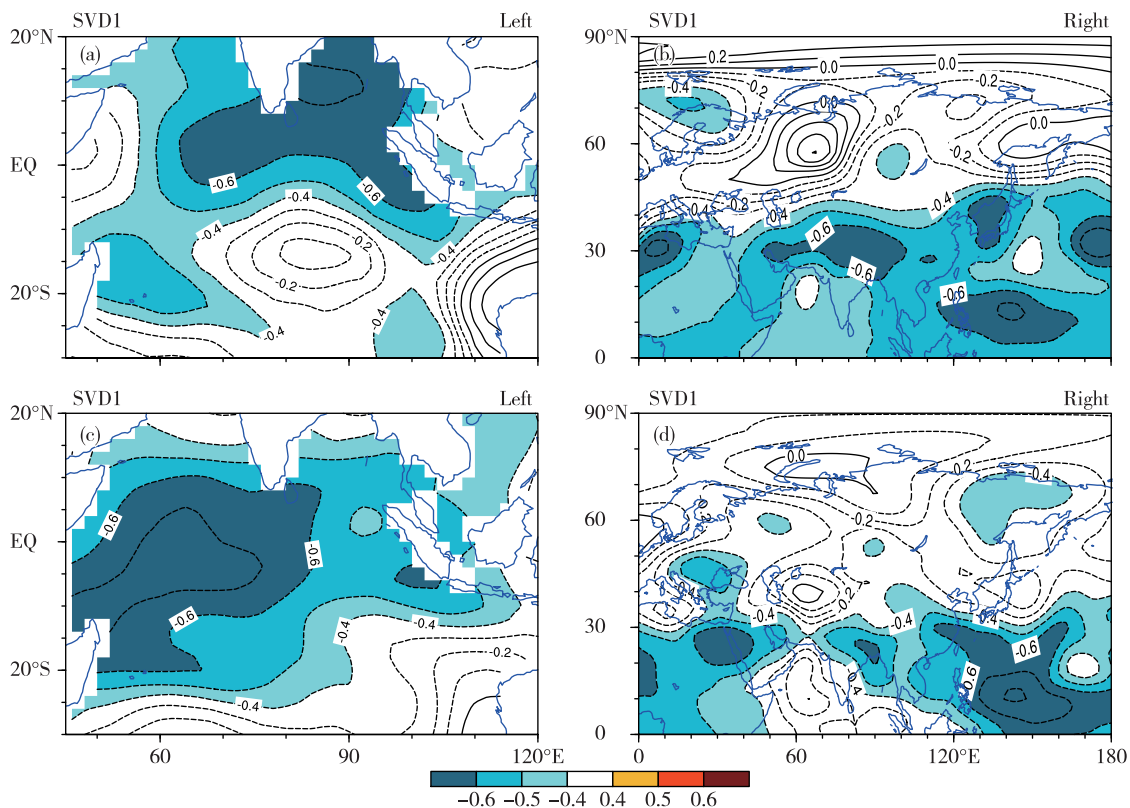


图 6 前期冬季印度洋海面温度与后期夏季 500 hPa 高度场 SVD 分解第一模态 (a. 1961—1980 年异性相关分析, 左场; b. 1961—1980 年异性相关分析, 右场; c. 1981—2014 年异性相关分析, 左场; d. 1981—2014 年异性相关分析, 右场)

Fig.6 The first mode of SVD (singular value decomposition) between Indian Ocean SST of the last winter and geopotential height at 500 hPa in summer (a. heterogeneous correlation analysis from 1961 to 1980, left; b. heterogeneous correlation analysis from 1961 to 1980, right; c. heterogeneous correlation analysis from 1981 to 2014, left; d. heterogeneous correlation analysis from 1981 to 2014, right)

洋海面温度呈一致偏低(高)时,印度洋上空海平面气压场偏高(低)(图 7c, d),前面的研究结果显示,在 1981—2014 年期间黄淮地区夏季降水与印度洋上空的海平面气压呈明显的负相关,这说明随着印度洋海面温度的持续增暖,印度洋通过影响海平面气压场影响黄淮地区夏季降水的关键区,而使其与黄淮地区夏季降水的关系逐渐增强。

由上面不同时期不同区域海面温度与大气的耦合关系来看,前期印度洋海面温度与影响黄淮地区夏季降水 500 hPa 高度场关键区域的相关关系随着年代际的变化逐渐增强,与海平面气压场上副高所处位置关键区域的关系逐渐增强,并且随着年代际的变化海平面气压场上的关键区域呈现南方涛动的分布模态。随着年代际的变化,前期太平洋海面温度与影响黄淮地区夏季降水 500 hPa 高度场上的关键区域的相关性明显减弱(图略),但是对海平面气压场上关键区域的影响与印度洋一致,明显地表现出了南方涛动的分布模态。由此可见,印度洋

海面温度异常通过影响海平面气压场和 500 hPa 高度场,使其与黄淮地区夏季降水的关系更加密切,在黄淮地区夏季降水的年代际变化中起到重要的调制作用。

5 讨论与结论

本文分析了黄淮地区夏季降水与前期海面温度以及同期大气环流关系的年代际变化特征,在 20 世纪 80 年代之前(1961—1980),前期发生 ENSO 发生时,次年夏季黄淮地区降水往往偏少,80 年代之后,前期发生 ENSO 时,次年夏季黄淮地区夏季降水往往偏多。前期印度洋海面温度与黄淮地区夏季降水的关系也在 20 世纪 80 年代发生了变化,特别是印度洋海面温度对黄淮地区夏季降水的预测指示意义越来越强,前期印度洋海面温度对黄淮地区夏季降水的指示意义越来越明确。但是 Niño3.4 区海面温度指数对黄淮地区夏季降水的指示意义在 20 世纪 80 年代中期之后却出现了不稳定性。分析

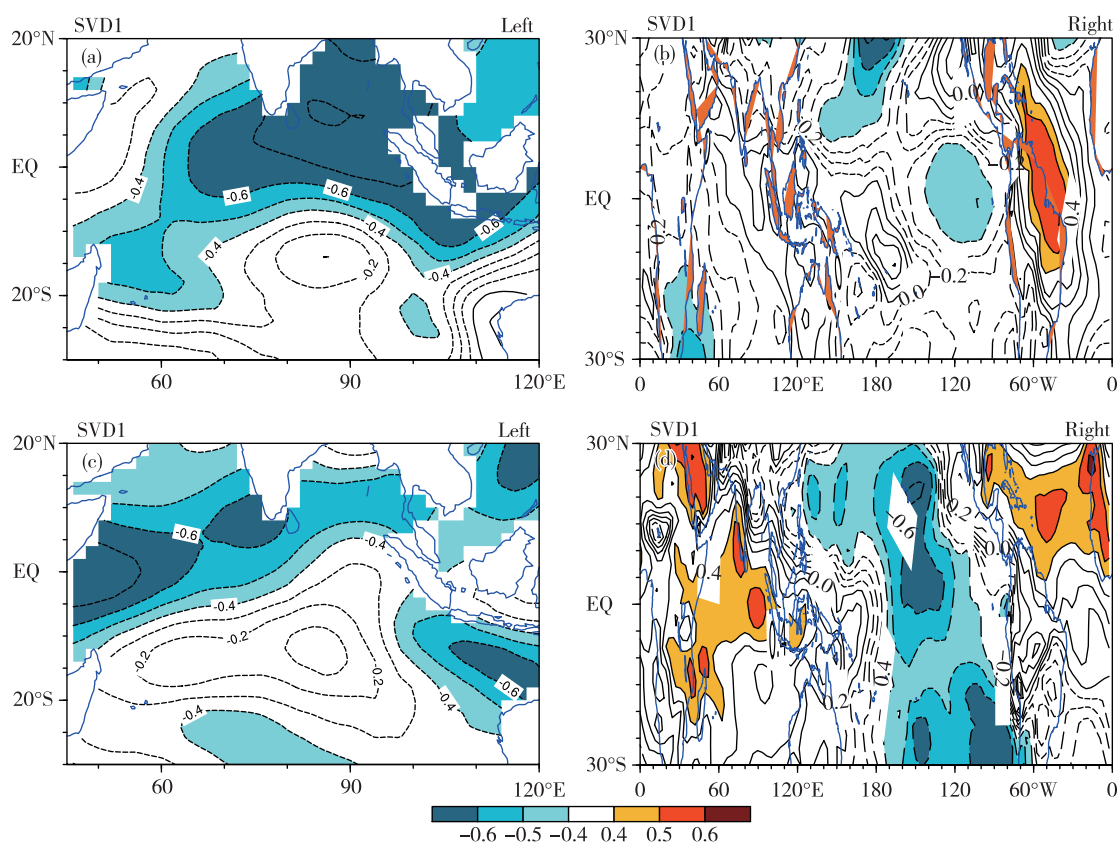


图7 前期冬季印度洋海面温度与后期夏季海平面气压场 SVD 分解第一模态 (a. 1961—1980 年异性相关分析, 左场; b. 1961—1980 年异性相关分析, 右场; c. 1981—2014 年异性相关分析, 左场; d. 1981—2014 年异性相关分析, 右场)

Fig.7 The first mode of SVD between Indian Ocean SST of the last winter and sea-level pressure in summer (a. heterogeneous correlation analysis from 1961 to 1980, left; b. heterogeneous correlation analysis from 1961 to 1980, right; c. heterogeneous correlation analysis from 1981 to 2014, left; d. heterogeneous correlation analysis from 1981 to 2014, right)

不同时期黄淮地区夏季降水与大气环流的关系,发现黄淮地区夏季降水与副热带高压位置附近 500 hPa 位势高度场和海平面气压场均呈明显的正相关,这种关系在 20 世纪 80 年代前后没有发生变化,但是海平面气压场上,在印度洋上空及南方涛动位置,相关关系发生了转换,80 年代前与印度洋和澳大利亚上空海平面气压呈弱的正相关,80 年代后呈显著负相关,东南太平洋上空海平面气压为显著正相关,呈现出南方涛动模态。进一步通过 SVD 分解发现,前期印度洋海面温度与影响黄淮地区夏季降水 500 hPa 高度场、海平面气压场上关键区域的相关关系随着年代际的变化逐渐增强,使得印度洋海面温度对黄淮地区夏季降水的指示意义越来越明确。

本文只是利用统计方法分析了黄淮地区夏季降水前期海面温度和同期大气环流关系的年代际变化特征,揭示了一些初步的变化现象,这对明确黄淮地区夏季降水短期气候预测的因子有一定的

指示意义,但是这些关系发生年代际变化的原因还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈桂英,赵振国.短期气候预测评估方法和业务初估[J].应用气象学报,1998,9(2):178-185.
- [2] CHEN L J, CHEN D L, WANG H J, et al. Regionalization of precipitation regimes in China [J]. Atmos Ocean Sci Lett,2009,5(2):301-307.
- [3] 金祖辉,陶诗言. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究 [J]. 大气科学, 1999, 23 (6): 664-672.
- [4] ZHANG R H, SUMI A, KIMOTO M. A diagnostic study of the impact of El Niño on precipitation in China [J]. Adv Atmos Sci,1999,16(2):229-241.
- [5] HUANG R H, ZHANG R H, ZHANG Q Y. The 1997/98 ENSO cycle and its impact on summer climate anomalies in East Asia [J]. Adv Atmos Sci,2000,17(3):348-362.
- [6] 张庆云,陶诗言.夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征 [J]. 大气科学,2003,27(3):369-380.

- [7] 魏凤英,张婷.淮河流域夏季降水的振荡特征及其与气候背景的联系[J].中国科学D辑:地球科学,2009,39(10):1360-1374.
- [8] 刘颖,倪允琪. ENSO对亚洲夏季风环流和中国夏季降水影响的诊断研究[J].气象学报,1998,56(6):681-691.
- [9] 赵亮,邹力,王成林,等. ENSO年东亚夏季风异常对中国江、淮流域夏季降水的影响[J].热带气象学报,2006,22(4):360-366.
- [10] 陶诗言,张庆云. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应[J].大气科学,1998,22(4):399-407.
- [11] 陈烈庭.热带印度洋-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,1988(增刊):142-148.
- [12] 顾伟宗,陈丽娟.山东夏季降水异常的环流特征及降尺度解释应用预测方法研究[J].海洋气象学报,2019,39(4):83-89.
- [13] 顾伟宗,伯忠凯,杨成芳,等.2017年山东夏季降水特征及预测初探[J].海洋气象学报,2018,38(3):112-118.
- [14] WANG Y J, CHEN X Y, YAN F. Spatial and temporal variations of annual precipitation during 1960-2010 in China[J]. Quatern Int,2015,380/381:5-13.
- [15] 吴志伟,李建平,何金海,等.大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转[J].科学通报,2006,51(14):1717-1724.
- [16] KINTER J L, MIYAKODA K, YANG S. Recent change in the connection from the Asian Monsoon to ENSO[J]. J Climate,2002,15(10):1203-1215.
- [17] 林婷婷,李春. ENSO与南海 SST关系的年代际变化[J].海洋气象学报,2019,39(2):68-75.
- [18] 高辉,王永光. ENSO对中国夏季降水可预测性变化的研究[J].气象学报,2007,65(1):131-137.
- [19] 宗海锋,陈烈庭,张庆云. ENSO与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征[J].大气科学,2010,34(1):184-192.
- [20] FENG J, LI J P. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over south China[J]. J Geophys Res: Atmos, 2011,116(D13):D1302.
- [21] 肖子牛,晏红明,李崇银.印度洋地区异常海温的偶极振荡与中国降水及温度的关系[J].热带气象学报,2002,18(4):335-344.
- [22] 唐卫亚,孙照渤.印度洋海表温度偶极振荡与中国降水及温度的关系[J].南京气象学院学报,2005,28(3):316-322.
- [23] 钱玮,管兆勇.中国南方夏季降水与热带印度洋偶极型海面温度异常的联系[J].南京气象学院学报,2007,30(1):9-16.
- [24] 唐红玉,吴遥,董新宁,等.赤道印度洋偶极子对重庆夏季降水的影响分析[J].海洋气象学报,2020,40(2):52-61.
- [25] 胡桂芳,伯忠凯,杨晓霞,等.2019年山东夏季降水异常特征及成因分析[J].海洋气象学报,2020,40(2):125-130.
- [26] 林子伦,郭丽娜,郭飞燕,等.山东半岛夏季降水异常的环流型及影响因子分析[J].海洋气象学报,2019,39(1):55-67.
- [27] WU R G, KIRTMAN B P. Understanding the impacts of the Indian Ocean on ENSO variability in a coupled GCM[J]. J Climate,2004,17(20):4019-4031.
- [28] ANNAMALAI H, XIE S P, McCREARY J P, et al. Impact of Indian Ocean sea surface temperature on developing El Niño[J]. J Climate,2005,18(2):302-319.
- [29] YANG J L, LIU Q Y, XIE S P, et al. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon[J]. Geophys Res Lett,2007,34(2):L02708.
- [30] YUAN Y, ZHOU W, CHAN J C L, et al. Impacts of the basin-wide Indian Ocean SSTA on the South China Sea summer monsoon onset[J]. Int J Climatol, 2008, 28(12):1579-1587.
- [31] XIE S P, HU K M, HAFNER J, et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño[J]. J Climate, 2009, 22(3):730-747.
- [32] CHOU C. Establishment of the low-level wind anomalies over the western North Pacific during ENSO development[J]. J Climate,2004,17(11):2195-2212.
- [33] CHEN J M, LI T, SHIH C F. Fall persistence barrier of sea surface temperature in the South China Sea associated with ENSO[J]. J Climate,2007,20(2):158-172.
- [34] HUANG G, HU K M, XIE S P. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the Northwest Pacific since the mid-1970s: An atmospheric GCM study[J]. J Climate,2010,23(19):5294-5304.
- [35] XIE S P, DU Y, HUANG G, et al. Decadal shift in El Niño influences on Indo-Western Pacific and East Asian climate in the 1970s[J]. J Climate, 2010, 23(12):3352-3368.
- [36] QU X, HUANG G. Impacts of tropical Indian Ocean SST on the meridional displacement of East Asian jet in boreal summer[J]. Int J Climatol,2012,32(13):2073-2080.