

夏季西太平洋暖池海温的年际变化特征及其影响分析

陈艳丽, 姜 慧

菏泽市气象局, 山东 菏泽

收稿日期: 2021年12月14日; 录用日期: 2022年1月13日; 发布日期: 2022年1月20日

摘 要

本文利用NCEP/NCAR再分析逐月平均资料、1951~2010年的海表温度资料 and 我国160站夏季降水等资料, 探讨研究了西太平洋暖池海温在1951~2010年夏季的年际变化及其对大气环流和我国夏季降水的影响, 进而得出西太平洋暖池影响我国夏季降水的可能原因。研究表明, 夏季西太平洋暖池海温在1951~2010年50年间发生了明显的年际变化并且具有以下特征, 其与东亚地区的海平面气压场以及500 hPa的位势高度场都有着很好的正相关关系, 在海温偏高年亚洲低压和东亚夏季风都有明显的减弱, 而西太平洋副热带高压加强使得我国长江以南地区的夏季降水明显偏多; 在海温偏低年亚洲低压和东亚夏季风会加强, 西太平洋副热带高压减弱, 使得我国长江以南地区的夏季降水明显偏少。

关键词

西太平洋暖池, 海温, 年际变化, 影响

Interannual Variation Characteristics of the Western Pacific Warm Pool SST in Summer and Its Influence Analysis

Yanli Chen, Hui Jiang

Heze Meteorological Bureau, Heze Shandong

Received: Dec. 14th, 2021; accepted: Jan. 13th, 2022; published: Jan. 20th, 2022

Abstract

Based on the NCEP/NCAR reanalysis monthly mean data, the SST data from 1951 to 2010 and the

summer precipitation data of 160 stations in China, the interannual variation characteristics of SST during 1951 to 2010 over the Western Pacific Warm pool and its influence on summer precipitation and atmospheric circulation in China are investigated. The possible reasons for the influence of the Western Pacific Warm pool on summer precipitation in China are obtained. The results show that the Western Pacific warm pool SST of summer has obvious interannual variation characteristics from 1951 to 2010. The SST of the Warm pool is positively correlated with the sea level pressure field in East Asia and 500 hPa geopotential height field. In the year of high SST, the Asian thermal low and East Asian summer monsoon will weaken, and the subtropical high of the West Pacific will strengthen, which makes the summer precipitation in the south of the Yangtze River in China obviously more. In the lower SST years, the Asian thermal low and East Asian summer monsoon will be strengthened, and the Western Pacific subtropical high will be weakened, leading to significantly less summer precipitation in the region south of the Yangtze River in China.

Keywords

The Western Pacific Warm Pool, SST, Interannual Variation, Influence

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

旱涝是我国影响最大也是最常见的气象灾害,它对人民的生命安全和财产等造成巨大威胁。随着全球气候变化越来越受到社会的普遍关注,人们认识到许多严重的气象灾害大部分是由于全球气候异常所引起的。海洋具有巨大的热容量,是大气的主要热源和水汽源,其对气候的形成和变化极其重要。已经有很多的研究表明,西太平洋暖池海水的热力异常是我国气候灾害发生的主要影响因子之一,西太平洋暖池热力状况的变化影响大气环流、短期的气候变化以及 ENSO 等的发生发展。研究还进一步表明,西太平洋暖池可能主要是通过改变大气热力状况及大气遥相关型等,进而影响我国夏季的降水。因此,进一步研究分析西太平洋暖池海温在夏季的年际变化特征及其产生影响的可能机制,对我国夏季降水预报具有十分重要的意义。

另外,全球海洋海水温度最高、能量最多、赤道附近大气加热最强的海区就是热带西太平洋地区,这里集中了全球大部分的暖海水,常年维持着 28℃ 以上的高温,其被称为西太平洋暖池(Western Pacific Warm Pool, WPWP),以下简称西太暖池。而且西太平洋暖池的海温异常影响着全球的气候变化,是大气热量主要供应地之一。研究表明,全球海-气相互作用最强区及纬向 Walker 环流的上升支都位于热带西太平洋暖池,暖池不仅提供了 Walker 环流循环的能量,还驱动局域 Hadley 环流异常,从而影响西太副高以及东亚气候异常。所以,本文主要在前人关于夏季热带西太平洋暖池海温和大气环流异常以及其与中国降水关系研究的基础上,更加深入地分析探讨暖池海温的年际变化特征及其对我国夏季降水及东亚大气环流等各方面的影响,进而得到西太平洋暖池海温影响我国夏季降水的可能机制。国内外已经有许多学者对西太平洋暖池进行了大量的研究,赵永平等[1]发现,西太平洋暖池跃变后,与跃变前相比暖池面积明显增加,夏季(6~8月)西太副高比跃变前强度明显加强,位置明显偏西偏南,后者直接影响我国东部夏季降水型。李万彪和周春平[2]分析研究了大洋暖池的特征变化和成因,得到了暖池面积等的多年气候平均变化,并且用暖池的特征指数对我国的降水进行预报,研究了其对沿海自然灾害的影响,为减灾

防灾事业服务。可见, 西太平洋暖池对我国气候变化具有十分重要的影响。

许多的学者还用表现海洋不同热状况的量对我国的降水进行研究。Nitta [3], Kurihara [4]等发现东亚夏季大气环流及气候异常受热带西太平洋海温异常的直接对中国降水进行了分析。李忠贤等[5]研究了中国夏季降水的年代际变化特征与太平洋的湍流热通量等的异常关系, 得到太平洋的湍流热通量异常偏多(少)时, 华北的夏季降水偏多(少)。金祖辉等[6] [7] [8] [9]发现了南海、孟加拉湾以及阿拉伯海等区的海温异常和江淮梅雨有着明显的正相关关系。综合上述的研究结果, 中国夏季降水与许多海域的热力状况都有着密切的关系。本研究主要针对 1951~2010 年 50 年间夏季西太平洋的暖池海温的年际变化及其对我国夏季降水及大气环流影响进行研究分析, 得出西太平洋暖池对我国夏季降水产生影响的可能原因。本文选取了暖池的范围, 通过对夏季西太平洋暖池海温冷暖异常年的海平面气压场、高度场、西太平洋副热带高压指数以及风场等进行合成分析, 且用暖池的平均海温与我国夏季降水进行求相关, 分析得出其影响我国夏季降水的可能原因, 旨在为我国夏季降水的预报提供一定的参考。

2. 资料和方法

本文用到的资料: 1) 1951~2010 年美国 NCEP/NCAR 逐月的再分析平均资料中的高度场、风场和海平面气压场, 其水平分辨率是 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; 2) Met Office Hadley Center 的 1951~2010 年夏季的逐月海温资料(HadISST), 其分辨率是 $1^\circ \times 1^\circ$; 3) 中国气象局提供的 1951~2010 年 160 站夏季降水资料。

本研究主要用到的方法为相关分析和合成分析方法。线性相关分析是用来描述两个时间序列之间相互关系的一种方法, 主要用相关系数 r 来表示, r 的绝对值越大, 表示两者的关系越密切。两者间相关是否显著需要经过检验。假设两个时间序列分别是 x 和 y , 其样本长度为 n , 相关系数 r 的计算公式为:

$$r(x, y) = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}}$$

3. 西太平洋暖池区域的选取

大洋暖池主要包括热带西太平洋和东印度洋暖池, 多年平均海温在 28°C 以上, 其约占全球海洋总面积的 11.7%, 深度约在 60~100 m 之间, 南北伸展约 35 个纬度, 东西跨越 150 个经度, 大洋暖池的热力状况和上空的对流活动对夏季热带纬圈环流及北半球经向上的大气环流都有影响。西太平洋暖池是全球海气相互作用非常敏感的区域, 但目前暖池区范围还没有统一的选取标准。

金祖辉等[6] [7] [8] [9]定义 $115^\circ\text{E} \sim 150^\circ\text{E}$, $0^\circ \sim 18^\circ\text{N}$ 为暖池范围, 他们发现西太平洋的上空在暖池区, 暖异常年会生成一个强的偏差环流, 对东南亚的热带和副热带西南季风的发展产生影响。李崇银等[10]选取暖池区域为 $140^\circ \sim 180^\circ\text{E}$, $10^\circ\text{S} \sim 15^\circ\text{N}$, 发现暖池区 SSTA 正(负)距平对应着强(弱)东亚夏季风年。黄荣辉等[11] [12] [13] [14]则选取热带西太平洋暖池区域为 $125^\circ \sim 145^\circ\text{E}$, $0^\circ \sim 15^\circ\text{N}$, 研究中准定常波在传播时, 在西太平洋热源强迫下产生了菲律宾到北美的遥相关型。研究的结果由于研究选取的区域不同也不相同, 说明西太平洋暖池海温的变化可能存在区域性差异, 因此有必要对暖池海温做进一步地研究。图 1 给出了 1951~2010 年全球的夏季(6~8 月)平均海表温度分布。图 1 中明显看出夏季全球海温的分布状况, 全球海洋中的海表温度最高的区域是赤道地区, 而从低纬地区到高纬地区海表的温度却逐渐降低, 极地地区海表温度减为最低。从图中还可以看出, 全球海洋最暖的区域位于热带西太平洋、中国南海以及印度洋东部地区, 多年的平均海表温度(SST)大于 28°C , 其中菲律宾以东的周围地区是暖

中心区。为了更为深入研究西太平洋暖池海温变化的区域性差异, 本文定义所选区域内海表温度的平均值为西太平洋暖池的海温指数。另外, 本研究参考了黄荣辉等[11] [12] [13] [14]选取 125°~145°E, 0°~15°N 的范围(图 1 中的小矩形框区域), 作为热带西太平洋暖池的区域, 该区域基本上位于热带西太平洋多年平均海表温度大于 28°C 的暖水区。

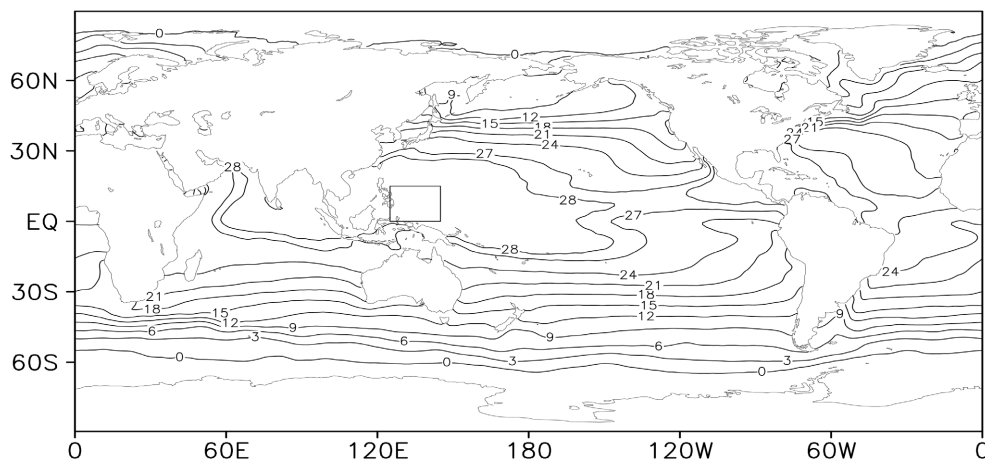


Figure 1. Distribution of summer mean SST (°C) from 1951 to 2010

图 1. 1951~2010 年夏季平均海表温度(°C)分布

4. 夏季西太平洋暖池海温的年际变化

为了更好地看出夏季西太平洋暖池在各个年份海温的分布情况, 图 2 给出了 1951~2010 年夏季(6~8 月)西太平洋暖池海温标准化距平的时间序列。图 2 中可以看出, 在西太平洋暖池的平均海温标准化距平时间序列表现出的年际变化的特征十分明显。暖池区域平均海温的标准化距平值大于 1.0 的年份选取为暖池海温偏高年, 即暖池海温暖异常年, 可以看出标准化距平值大于 1.0 的共有 11 年, 包括 1968 年、1988 年、1989 年、1995 年、1996 年、1998 年、2001 年、2003 年、2007 年、2009 年、2010 年, 其中 1998 和 2010 这两年的区域平均海温标准化距平值都在 2.0 以上, 为明显的海温暖异常年; 夏季暖池区域平均海温标准化距平值小于 -1.0 的年份定为西太平洋暖池海温偏低年, 即西太平洋暖池海温冷异常年, 从图中也可以看出, 一共有 12 年的标准化的距平值小于 -1.0, 包括 1951 年、1953 年、1956 年、1958 年、1961 年、1963 年、1965 年、1967 年、1971 年、1972 年、1976 年、1982 年, 其中 1965 这一年的区域平均海温标准化距平值在 -2.0 以下, 为明显的海温冷异常年; 另外, 区域平均海温标准化距平值在 -1.0~1.0 之间的年份为西太平洋海温正常年份。从下面海温标准化距平时间序列图中还可以看出, 1951~2010 年间海温正常年份较多, 且时间分布也比较均匀, 而海温冷、暖异常年的时间分布却有较大差异, 西太平洋暖池海温暖异常年主要分布在 1968 年以后, 而西太平洋暖池海温冷异常年主要分布在 1951~1982 年间, 分析表明夏季暖池区域海温异常的年际、年代际变化特征相当明显, 可以为研究夏季暖池海表温度异常及对我国夏季降水的影响提供十分重要的参考依据, 进而更容易得到西太暖池异常影响我国夏季降水的原因。

另外, 西太平洋暖池在海温暖异常年份贮存了较多的热量, 在海温冷异常年份贮存了较少的热量, 而且张学洪[15]的研究也指出了海表湍流通量与海温异常总是相互联系的, 海洋向大气所释放的潜热感热通量与海温的异常有显著的正相关关系。所以, 夏季西太暖池海温冷、暖异常对大气环流必然会产生重要影响, 进而对我国夏季气候产生影响。

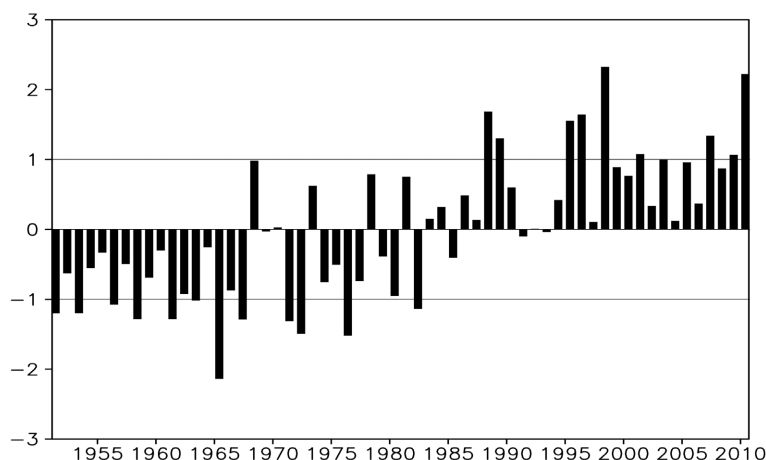


Figure 2. Time series of normalized SST anomalies over the WPWP in summer from 1951 to 2010
图 2. 1951~2010 年夏季暖池区域平均海温标准化的距平时间序列

为了更加明显地看出夏季西太平洋暖池海温在冷、暖异常年份的分布情况, 图 3 给出了西太平洋暖池海温冷、暖异常年合成的海温分布。从图中可以看出, 海温偏高年份在 $90^{\circ}\text{E}\sim 170^{\circ}\text{W}$, $10^{\circ}\text{S}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间有大片区域的海温都在 29°C 以上, 其中西太平洋地区的大部分海域海温都超过了 29°C , 我们选取的西太平洋暖池区域海温也超过了 29°C , 与海温偏低年相比高出 1°C 左右; 西太平洋地区在海温偏低年超过 29°C 的海洋区域面积与海温偏高年相比较小, 只有零星不连续的海域海温在 29°C 以上, 且海洋直接供应驱动大气运动的能量, 其具有巨大的质量与热容量, 因此, 海表温度的冷、暖异常会对大气运动产生十分重要的影响。在海温偏高年份海洋可以提供更多的热量和水汽, 能量供给更为充足, 更容易引起强对流性天气, 有时甚至会引发大的自然灾害, 例如 1998 年为显著的海温暖异常年, 整个热带西太平洋暖池海域的夏季海温都偏高, 中国南方地区普降罕见暴雨, 雨带一直稳定维持在长江流域, 致使长江流域发生特大洪涝; 而在海温偏低年份热量和水汽的供给较少, 能量相对不足, 对强对流性天气的发生发展不利。表明了夏季西太平洋暖池的海表温度对全球的气候异常起着极其关键的作用, 在大面积海温异常的情况下将会导致大气环流的异常, 进而可以影响中国夏季降水型, 甚至会造成全球的气候变化。

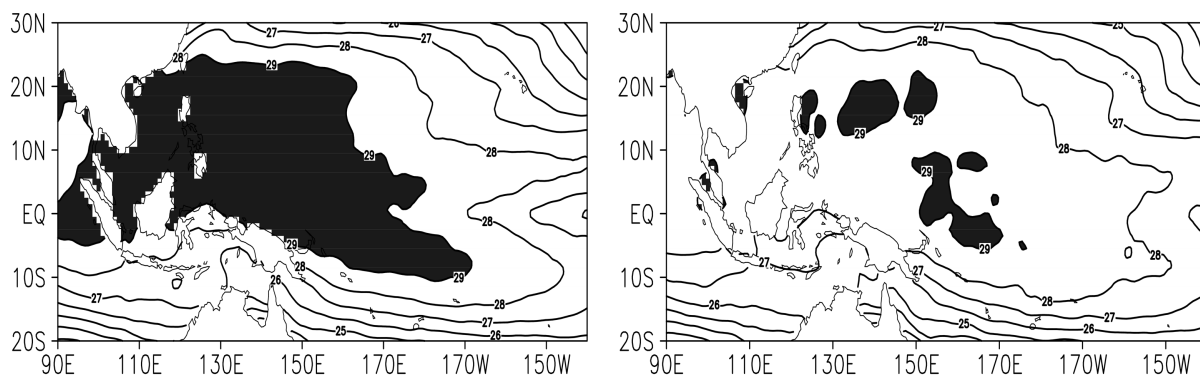


Figure 3. Composite diagram of SST distribution in summer WPWP years with high SST (left) and low SST (right) (unit: $^{\circ}\text{C}$)
图 3. 夏季西太暖池海温暖异常年(左)和海温冷异常年(右)海温分布合成图(单位: $^{\circ}\text{C}$)

5. 夏季西太暖池海温对我国夏季降水和大气环流的影响

图 4 是 1951~2010 年夏季西太暖池海温距平序列与我国夏季降水场相关系数的分布, 可以对夏季暖

池海温与我国夏季降水的关系更好地进行说明, 从图中看出, WPWP 海温异常对中国各个地区夏季降水的影响不同, 其中图中的阴影部分是通过显著性检验的区域, 即夏季降水与 WPWP 暖池海温异常有一定相关关系的地区。由图可以看出, 这些地区大部分分布在长江流域, 少部分分布在中国新疆西藏地区, 其中, 显著正相关区分布在我国长江以南的地区, 最大正相关系数超过 0.2, 通过了 0.05 的信度检验, 这可以说明我国长江以南地区的夏季降水与西太暖池海温异常有十分密切的关系, 在我国新疆和西藏地区的夏季降水与暖池海温异常有一定的关系; 从图中还可以看出, 我国其他地区的夏季降水与夏季西太平洋海温异常的相关性较弱, 相关系数未能通过显著性检验, 说明我国其他地区的夏季降水与夏季西太平洋海温异常的关系不大。以上分析表明, 中国长江以南地区夏季降水与夏季西太平洋暖池海温的关系最为密切, 这不仅可以做好长江地区降水预报工作, 也可以为我国夏季降水过程的短期气候预测提供有力的参考依据。

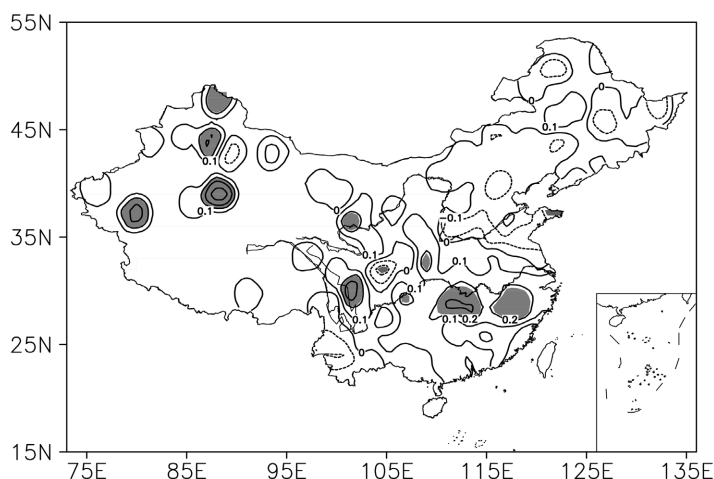


Figure 4. Correlation coefficient distribution between summer precipitation field in China and summer SST anomaly series in the WPWP from 1951 to 2010 (shaded area indicates passing 0.05 reliability test)

图 4. 1951~2010 年中国夏季降水场与夏季暖池海温标准化的距平序列的相关系数(阴影区通过了 0.05 信度检验)

下面这张图给出了夏季西太平洋暖池海温冷、暖异常年份合成的同期中国降水距平的情况, 在图 5 中, 西太暖池海温暖异常年, 夏季中国东部大部分地区降水距平是正的, 只在东北小部分地区夏季降水距平为负, 这说明在海温暖异常年中国东部大部分地区的夏季降水都会增多, 夏季降水距平大值区主要位于长江以南的地区, 距平最大达 40, 这说明在海温暖异常年中国长江中下游地区的夏季降水会明显偏多, 最多可以比海温正常年份多出 40 mm 左右。而在西太平洋暖池海温偏低年, 在夏季我国东部大部分地区降水为负的距平, 只在华北小部分地区夏季降水距平为正, 这说明在海温冷异常年中国东部大部分地区的夏季降水都会减少, 大值区也主要位于长江以南地区中心值达 100, 这说明在海温冷异常年中国长江中下游地区的夏季降水会明显偏少, 最多可以比正常年份少 100 mm 左右, 整体上偏低年的夏季降水距平值比海温偏高年的距平值大很多。以上分析得出夏季热带西太平洋暖池海温异常对中国长江以南地区夏季降水影响很大, 暖池海温暖异常年中国长江以南地区的夏季降水会明显偏多, 冷异常年其夏季降水则明显偏少, 且在暖池海温冷异常年, WPWP 暖池海温异常对中国长江以南地区夏季降水的影响更加显著。

另外, 西太平洋暖池海温与东亚大气环流、副热带高压和夏季风等系统有着十分密切的关系[16] [17] [18]。下面我们看看西太平洋暖池海温异常偏高偏低对大气环流等产生的影响, 寻找西太平洋暖池海温影响我国夏季降水的可能原因。

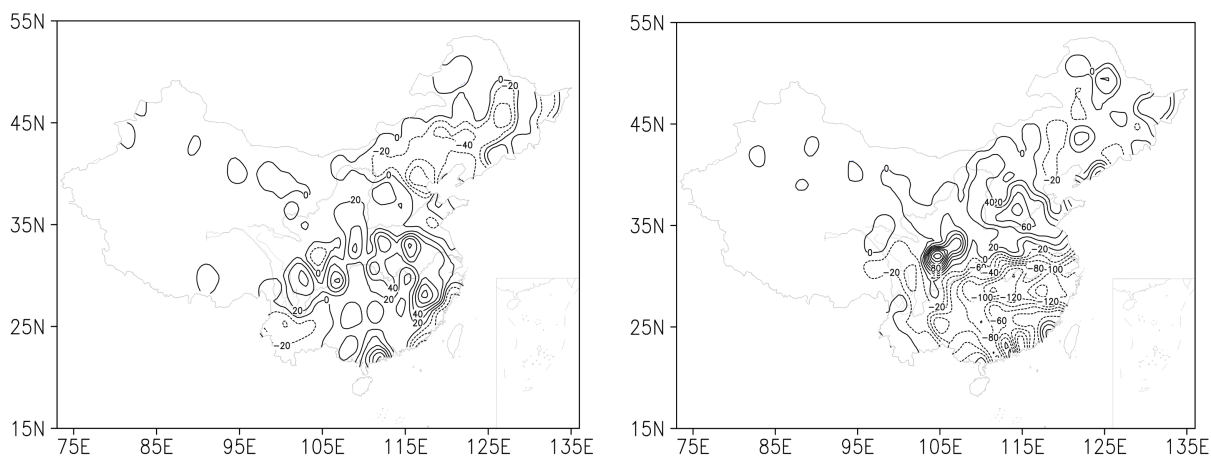


Figure 5. Composite diagram of Summer Precipitation Anomalies in China (unit: mm) in years with high SST and low SST in the WPWP

图 5. 中国夏季降水距平在西太暖池海温异常年(左)和海温冷异常年(右)合成图(单位: mm)

从图 6 东亚海平面气压与夏季西太平洋暖池海温异常的相关系数分布可以明显看出, 位于 $60^{\circ}\text{E}\sim 135^{\circ}\text{W}$, $20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 之间的大部分地区东亚海平面气压与夏季西太平洋暖池海温异常的相关系数都大于 0.5, 东亚海平面气压与东亚大陆夏季西太平洋暖池海温异常为显著的正相关关系, 贝加尔湖以东的地区是正相关大值区(深色阴影区), 数值超过了 0.6, 图 6 阴影区都通过了 0.001 的检验。东亚海平面气压与夏季 WPWP 暖池海温异常有一个很好的正相关关系, 特别是贝加尔湖以东的地区是最为显著地正相关区, 相关系数最大, 亚洲低压与 WPWP 海温异常在夏季存在着很大关系, 且在贝加尔湖以东的地区两者关系最为密切。暖池海温暖异常年, 海平面气压在东亚大陆地区有正距平分布, 相反在海温冷异常年, 东亚大陆地区海平面气压是负距平, 得到夏季 WPWP 海温偏高年夏季亚洲低压减弱, 海温偏低年夏季亚洲低压增强。

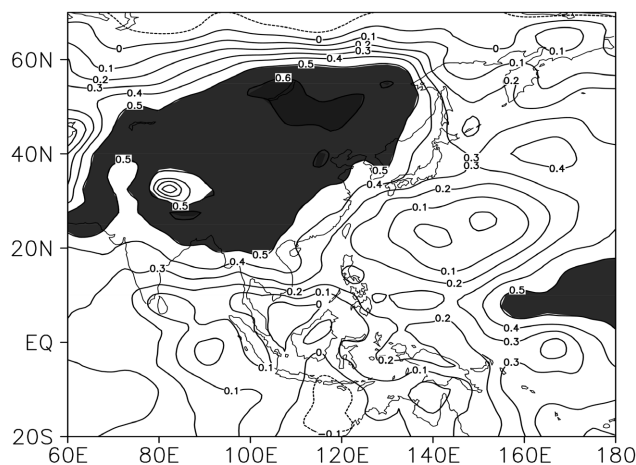


Figure 6. Correlation coefficient distribution between East Asian sea level pressure field and summer SST anomalies in the WPWP

图 6. 东亚海平面气压场与夏季西太暖池海温异常的相关系数图

同理, 我们做了东亚地区 500 hPa 位势高度场与夏季西太平洋暖池海温异常的相关系数分布, 如图 7 所示, 看出在 $60^{\circ}\text{E}\sim 135^{\circ}\text{W}$, $20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 之间的大部分地区夏季东亚地区 500 hPa 位势高度场与 WPWP 暖池海温异常的相关系数大于了 0.5, 中低纬度以及贝加尔湖以东地区为它们显著正相关的分布区, 其中正相关

大值区位于贝加尔湖以东的地区(图7中的深色阴影区)超过了0.6, 阴影区通过了0.001的显著性检验。在东亚500 hPa位势高度场与夏季WPWP暖池海温异常有一个很好的正相关关系, 特别是贝加尔湖以东的地区是最为显著地正相关区, 西太平洋副热带高压的变化与WPWP海温异常有着关系十分密切。在东亚大陆WPWP海温暖异常年500 hPa位势高度是正距平, 西太海温暖异常年东亚500 hPa位势高度是升高的, 即海温暖异常年西太平洋副热带高压强度加强, 相反, 暖池冷异常年时, 东亚大陆500 hPa位势高度值都是降低的, 即海温冷异常年西太平洋副热带高压强度减弱。

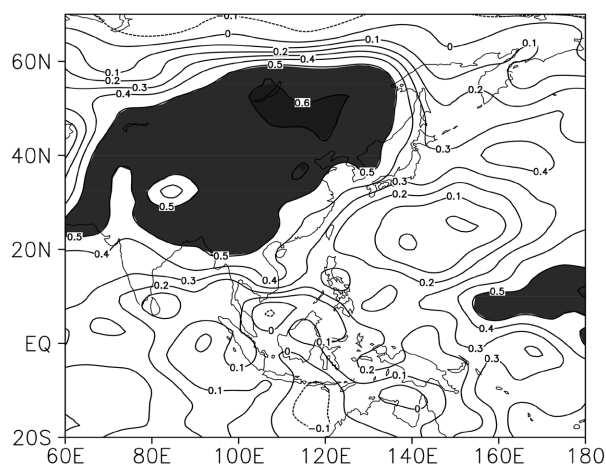


Figure 7. Correlation coefficient distribution between the geopotential height field of 500 hPa over East Asia and the SST anomaly of the WPWP in summer

图7. 东亚地区500 hPa位势高度场与夏季西太暖池海温异常的相关系数图

东亚夏季风异常是大气环流的重要特征之一, 西太暖池区海温异常变化是引起东亚夏季风年际变化的重要原因。不同分布型的暖池海温异常对东亚大气环流产生不同的影响, 夏季暖池的热力活动不仅可以维持经圈环流, 还在夏季对经向上北半球大气环流影响很大。图8是夏季西太暖池海温冷暖异常年合成的东亚地区850 hPa风场距平, 我国东部地区在WPWP暖池海温偏高年主要为偏北风距平, 说明在海温暖异常年份东亚夏季风会减弱, 偏北风距平不利于来自南方低纬地区的暖湿气流向北边推进, 中国长江以南地区将可以获得充足的水汽供应, 致使这地区的降水偏多; 夏季WPWP海温偏低年主要为偏南风距平, 在海温冷异常年份东亚夏季风会增强, 偏南风距平有利于来自南方低纬地区的暖湿气流向北边推进, 中国长江以南地区不能获得足够的水汽供应, 致使长江以南地区的降水偏少。

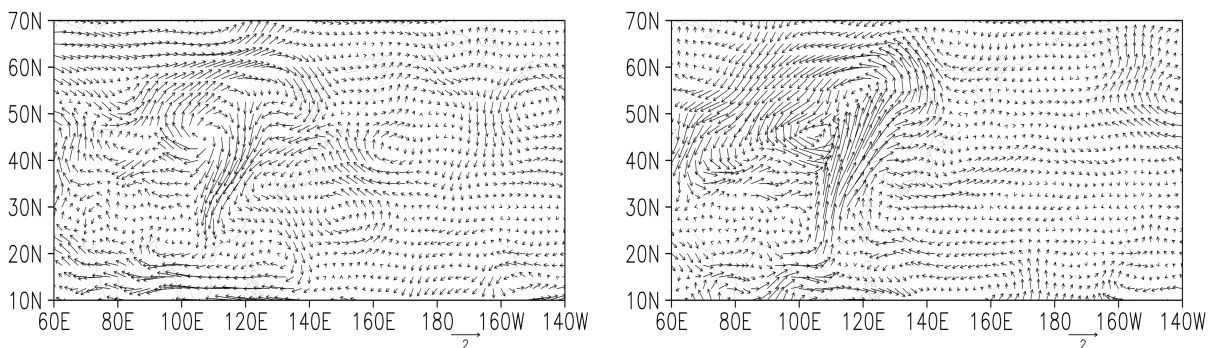


Figure 8. Composition of 850 hPa wind field anomaly over East Asia in summer SST year of the WPWP (left) and SST year of the WPWP (right)

图8. 东亚地区850 hPa风场距平在夏季西太暖池海温暖异常年(左)和海温冷异常年(右)合成图

6. 结论

采用美国 NCEP/NCAR 逐月的再分析平均资料, 逐月海温 HadISST 资料以及 160 站夏季降水等资料, 分析研究了 1951~2010 年西太平洋暖池海温夏季的年际变化及其对大气环流和我国夏季降水的影响, 得出西太暖池影响我国夏季降水的可能原因。结论如下:

1) 1951~2010 年 50 年间夏季西太平洋暖池海温发生了明显的年际变化且具有以下特征, 与中国长江以南地区夏季降水有显著的正相关关系, 暖池海温暖异常年长江以南地区降水偏多, 冷异常年长江以南降水偏少。

2) 西太暖池海温与东亚地区海平面气压场和 500 hPa 位势高度场都存在很好的正相关关系。在海温偏高年亚洲低压和东亚夏季风会减弱, 西太副高加强, 使得我国长江以南夏季降水明显偏多, 在海温偏低年亚洲低压和东亚夏季风会加强, 西太副高减弱使得我国长江以南夏季降水明显偏少。

本文初步给出了西太平洋暖池影响我国夏季降水的可能原因, 但其中的物理机制还有待进一步研究。此外, 目前关于暖池范围的选取还没有统一标准, 因而与中国夏季降水的关系可能会存在稍许偏差, 选取的西太平洋暖池区域不同, 研究的结果也不尽相同, 说明暖池区海温的变化可能存在区域性差异, 因而有必要对暖池区海温做进一步探讨。

参考文献

- [1] 赵永平, 吴爱明, 等. 西太平洋暖池的跃变及其气候效应[J]. 热带气象学报, 2002, 18(4): 317-326.
- [2] 李万彪, 周春平. 热带西太平洋暖池对中国降水和沿海自然灾害的影响[J]. 北京大学学报, 1999, 35(5): 674-681.
- [3] Nitta, T. (1987) Convective Activities in the Tropical Western Pacific and Their Impact on the Northern Hemisphere Summer Circulation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **65**, 373-390. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.65.3_373
- [4] Kurihara, K. and Kawahara, M. (1986) Extremes of East Asian weather during the Past ENSO Years of 1983/84: Severe Cold Winter and Hot Dry Summer. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **64**, 493-503. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.64.4_493
- [5] 李忠贤, 陈建萍, 倪东鸿, 等. 太平洋湍流热通量异常与中国夏季降水年代际变化[J]. 气象与减灾研究, 2007, 30(2): 6-11.
- [6] 金祖辉, 陈隽. 西太平洋暖池区海表水温异常对东亚夏季风影响的研究[J]. 大气科学, 2002, 26(1): 57-68.
- [7] 罗绍华, 金祖辉. 南海 SST 变化与初夏西太平洋副高活动及长江中、下游汛期降水关系的分析[J]. 大气科学, 1986, 10(4): 409-417.
- [8] 金祖辉, 罗绍华. 长江中下游梅雨期旱涝与南海 SST 异常关系的初步分析[J]. 气象学报, 1986, 44(3): 360-372.
- [9] 金祖辉, 罗绍华, 陈烈庭, 等. 印度洋和南海海温与长江中下游夏季降水的相关分析[J]. 大气科学, 1985, 9(3): 314-320.
- [10] Li, C.Y., Mu, M.Q. and Zhou, G.Q. (1999) The Variation of Warm Pool in the Equatorial Western Pacific and Its Impacts on Climate. *Advances in Atmospheric Sciences*, **16**, 378-394. <https://doi.org/10.1007/s00376-999-0017-0>
- [11] Huang, R.H. and Lu, L. (1989) Numerical Simulation of the Relationship between the Anomaly of the Subtropical High over East Asia and the Convective Activities in the Western Tropical Pacific. *Advances in Atmospheric Sciences*, **6**, 202-214. <https://doi.org/10.1007/BF02658016>
- [12] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池上空对流活动对东亚夏季风季节内变化的影响[J]. 大气科学, 1994, 18(4): 456-465.
- [13] 黄荣辉, 李维京. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制[J]. 大气科学(特刊), 1988, 12(特刊): 95-107.
- [14] 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[J]. 大气科学, 1994, 18(2): 140-151.
- [15] 张学洪. 冬季北太平洋海表热通量异常和海气相互作用——基于一个全球海气耦合模式长期积分的分析[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 511-521.

- [16] 缪启龙, 吴燕. 长江中下游 6-7 月降水异常与 500hPa 大气环流的关系[J]. 气象与减灾研究, 2009, 32(4): 18-24.
- [17] 张立峰, 何金海, 等. 西太平洋暖池海温异常年夏季东亚大气环流特征[J]. 东海海洋, 2005, 23(1): 1-12.
- [18] 张增信, 刘宣飞, 等. 西太平洋暖池海温分布型及其与东亚大气环流的关系[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(6): 746-754.