

薛德强. 青岛汛期降水量与太平洋年代际振荡的关系[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1): 46-54.
XUE Deqiang. Study on the relationship between precipitation during flood season in Qingdao and Pacific decadal oscillation[J].
Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(1): 46-54. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.005. (in Chinese)

青岛汛期降水量与太平洋年代际振荡的关系

薛德强

(山东省气象科学研究所, 山东 济南 250031)

摘要: 基于太平洋海面温度(SST)、大气环流及青岛降水量资料, 分析并发现了青岛汛期(6—9月)降水量与太平洋年代际振荡(PDO)指数存在重要联系。当PDO处于冷位相时, 西北太平洋区SST偏高, 北美沿岸以及热带中东太平洋区SST偏低, 西太平洋副热带高压偏弱偏东, 脊线偏北, 东亚夏季风偏强, 青岛汛期降水量偏多, 反之偏少。定义了一个新的太平洋SST距平指数SSTI, 该指数包含了西北太平洋与热带中东太平洋SST距平反相变化的协同影响, 也包含了PDO与ENSO的协同影响。与PDO指数、西北太平洋及热带中东太平洋SST相比, 该指数与青岛汛期降水量相关性更好, 通常SSTI正指数对应着汛期西太平洋副热带高压脊线偏北, 面积偏小、强度偏弱, 东亚夏季风偏强, 有利于青岛汛期降水量偏多, 反之偏少。SSTI指数可作为青岛汛期降水量预测的指示因子。

关键词: PDO指数; 汛期降水量; SSTI指数; 降水预测

中图分类号: P461.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)01-0046-09

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.005

Study on the relationship between precipitation during flood season in Qingdao and Pacific decadal oscillation

XUE Deqiang

(Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031, China)

Abstract Based on the analysis of Pacific SST (sea surface temperature), atmospheric circulation, and precipitation in Qingdao, it is found that there is important relationship between the precipitation in Qingdao and the PDO (Pacific decadal oscillation) index during flood season. When the PDO is in the cold phase, the SST is higher over western North Pacific but lower over the coast of North America and tropical middle-eastern Pacific, the western Pacific subtropical high is weaker and eastward whose ridge line is northward, the East Asian summer monsoon is stronger, and the precipitation in Qingdao during flood season is more. Conversely, the precipitation is less. A new Pacific SST anomaly index, SSTI, is defined, which includes the synergistic effects of the out-of-phase changes of SST anomaly in western North Pacific and the tropical middle-eastern Pacific and also the synergistic effects of the PDO and ENSO. Compared with the PDO index and the SST over western North Pacific and the tropical middle-eastern Pacific, this index has a better correlation with the precipitation in Qingdao during flood season. Generally, the positive SSTI corresponds to the northward position of the ridge line, smaller area and weak intensity of the western Pacific subtropical high during flood season and stronger East Asian summer

收稿日期: 2018-07-16; 修订日期: 2018-09-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0605604, 2017YFC1501802)

作者简介: 薛德强, 男, 研究员级高级工程师, 主要从事气候研究工作, xuedeqiang@sina.com。

monsoon, which is favorable for more precipitation in Qingdao during flood season. Conversely, the precipitation is less. So, the SSTI can be used as an indicator for the precipitation prediction during flood season in Qingdao.

Key words PDO index; precipitation during flood season; SSTI; precipitation prediction

引言

太平洋年代际振荡(Pacific decadal oscillation, PDO)是北太平洋海面温度(sea surface temperature, SST)年代际循环的海洋现象,最早由 MANTUA et al.^[1]在 1997 年提出。通常当 PDO 暖位相时,西北太平洋异常低温,而北美洲的西海岸是显著的高温带,冷位相时则反之。PDO 指数作为北太平洋 SST 异常的 EOF 第一模态时间系数,很好地反映了太平洋年代际变化的主要特征,分别以“暖位相”(PDO 指数为正)和“冷位相”(PDO 指数为负)两种形式交替出现,每种现象持续 20~30 a。近 100 多年来,已出现了 2 个完整的周期。第一周期的“冷位相”发生于 1890—1924 年,而 1925—1946 年为“暖位相”;第二周期的“冷位相”出现于 1947—1976 年,1977—1999 年为“暖位相”,2000 年以来是第三周期的“冷位相”^[1-2]。PDO 通过海气相互作用可直接影响太平洋及周边地区气候的年代际变化,对亚洲季风及中国的天气气候变化有很大影响^[3-5]。许多研究^[6-11]指出,在 PDO 暖位相时期,华北降水整体减少,在 PDO 冷位相时期,华北降水整体偏多。

青岛位于黄淮地区,属于东部季风气候区,处于从江淮多雨区向华北少雨区的过渡地带。青岛气象站建站较早,至今已有 120 a 观测资料,那么青岛汛期降水量是否也存在类似于 PDO 指数年代际演变的规律?同时,青岛又是一个缺水城市,提前预测夏季降水量的变化对工农业生产及人们的生活具有十分重要的意义。但是,研究^[12]表明,夏季降水预测常用的外强迫因子如 ENSO、积雪、土壤湿度等在黄淮地区指示信号均偏弱,使得黄淮地区夏季旱涝预测准确率低。前期 PDO 指数及其相关联的太平洋 SST 对青岛汛期降水量的年际变化是否有指示意义?这些问题的分析有助于寻找影响青岛汛期降水量的物理因子,提高青岛汛期降水量预测的准确率。

1 资料与方法

使用青岛 1900—2016 年历年逐月平均降水量资料,其中对 1914 年 7 月—1915 年 3 月及 1937 年

9 月—1938 年 1 月缺测资料,采用 5 a 滑动平均方法进行了插补。国家气候中心下发的 1951—2016 年 74 项环流指数。

1900—2016 年历年逐月太平洋年代际振荡指数(Pacific Decadal Oscillation Index, PDOI)数据来自 <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>。1900—2016 年逐月 SST 数据来自 NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (SST) V4 资料,空间分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。1948—2016 年大气环流要素数据来源于 NCEP/NCAR 再分析数据集,所涉及的变量有 500 hPa 位势高度、850 hPa 风场等,格点分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

采用相关分析、累积距平分析、*t* 检验及合成分析等统计方法。

2 青岛汛期降水量与 PDO 指数年代际变化的对应关系

青岛降水量的年内变化极其显著,从冬季至夏季降水量迅速增多,从夏季至冬季降水量又急剧减少。其中夏季(6—8 月)降水量在四季中最多,占全年的 57%,汛期(6—9 月)降水量占全年的 70%;这表明青岛的降水量主要集中于汛期,汛期的降水量决定着全年的降水量。因此对汛期降水量变化规律的分析显得非常重要。由 1900—2016 年汛期降水量变化曲线(图 1a)可见,117 a 平均值为 475 mm,但年际波动较大,多年平均变率达到 131 mm,相对变率为 27.6%,降水量最少年为 1981 年,仅有 162.4 mm,最多年为 1926 年,达 989.9 mm,为最少年的 6.1 倍。结合 21 a 滑动平均曲线与历年变化曲线可见,青岛在 1920 年前、1945—1976 年、2002—2013 年降水量偏多,而 1921—1944 年、1977—2001 年、2014—2016 年降水量偏少。

分析 1900—2016 年汛期 PDO 指数的逐年演变曲线(图 1b),可以看出,PDO 指数的年代际变化特征也非常显著,值得注意的是,在 20~30 a 的冷/暖位相中,存在短期的反向指数,如 1938—1939 年(暖位相中的负指数)和 1959—1961 年(冷位相中的正指数)等。结合 21 a 滑动平均曲线和历年变化曲线可见:1923 年前、1944—1975 年、2002—2013 年

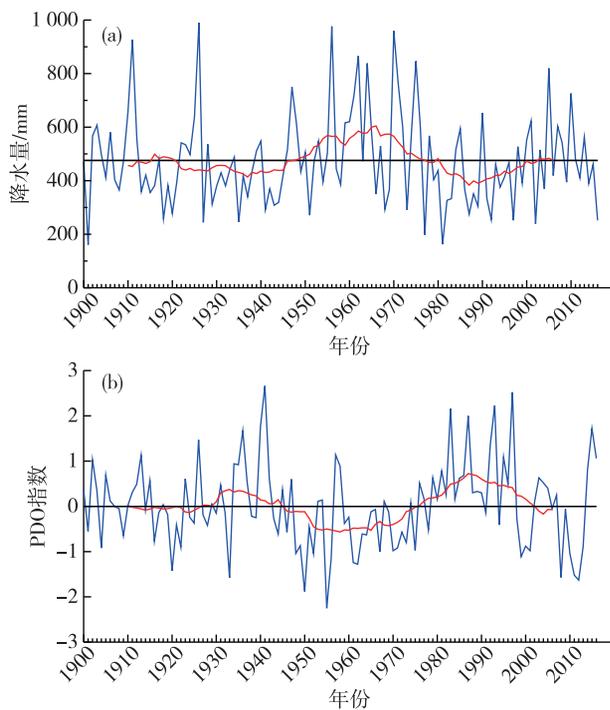


图1 1900—2016年青岛汛期降水量(a;单位:mm)和汛期PDO指数(b)变化曲线(蓝线)(黑线为历年平均线,红线为21 a滑动平均曲线)

Fig.1 Precipitation (a; units: mm) in Qingdao and variation curve of PDO index (b; blue line) during flood season from 1900 to 2016 (average line in black and 21-year moving average line in red)

PDO 指数小于 0, 表现为冷位相; 1924—1943 年、1975—2001 年、2014—2016 年 PDO 指数大于 0, 表现为暖位相。与文献[1-2]对 1900 年以来 PDO 冷暖位相时期的划分结果(1900—1924 年、1946—1976 年、2000—2013 年为冷位相时期, 1925—1945 年、1977—1999 年是暖位相时期)比较, 基本上是一致的, 将 21 a 滑动平均划分的结果与之比较, 提前或延后最多 2 a。同时 21 a 滑动平均划分出的冷位相时期 1900—1923 年、1944—1975 年、2002—2013 年分别和青岛汛期降水量偏多时期 1900—1920 年、1945—1976 年、2002—2013 年相对应, 暖位相时期 1924—1943 年、1975—2001 年分别和青岛汛期降水量偏少时期 1921—1944 年代初、1977—2001 年对应较好, 时间跨度前后最多相差 1~3 a。可见, 用 21 a 滑动平均曲线可以较好地刻画出青岛汛期降水量与 PDO 指数均存在年代际变化特征。

按照前人对冷暖位相时期划分^[1-2], 再分段统计青岛汛期降水量与 PDO 指数多年平均值的特征, 可以看出, 3 段冷位相时期青岛汛期降水量分别为 462 mm、572 mm 和 518 mm(表 1), 用每段冷位相时

期青岛汛期降水量分别乘以年数然后相加除以冷位相时期总年数, 得到平均值为 513 mm; 而 3 段暖位相时期青岛汛期降水量分别是 431 mm、390 mm 和 368 mm, 同样, 用每段暖位相时期青岛汛期降水量分别乘以年数后相加再除以暖位相时期总年数, 得到平均值为 407 mm。暖位相时期比冷位相时期降水量平均每年少 104 mm。分析逐年资料发现, 不同冷暖位相时期青岛汛期降水量与 PDO 指数相对应关系的显著性也不同, 如 1900—1924 年虽是冷位相时期, 但汛期 PDO 指数多年平均仅为 -0.02, 年间汛期 PDO 指数波动比较大, 相反变化的对应关系并不好, 以至于 PDO 正(负)指数年, 青岛汛期降水量偏多(少)年反而更明显, 同号率为 64%; 1925—1945 年二者相反对应关系也不好, 可能和这 2 段时期资料的可靠性有关。1946 年以后 4 段冷暖位相时期青岛汛期降水量与 PDO 指数相反对应关系较明显, 即 PDO 负指数年, 青岛汛期降水量一般偏多, 反之偏少。

表 1 不同冷暖位相时期青岛汛期降水量与 PDO 指数

Table 1 Precipitation and PDO index during flood season in Qingdao in cold and warm phases

年代	汛期降水量/mm	汛期 PDO 指数	异号率/%
1900—1924	462	-0.02	36
1925—1945	431	0.35	52
1946—1976	572	-0.46	71
1977—1999	390	0.60	74
2000—2013	518	-0.48	57
2014—2016	368	1.20	100

进一步计算 1900—2016 年、1951—2016 年青岛汛期降水量与汛期 PDO 指数的相关系数, 分别得到结果为 -0.26、-0.47, 均通过了 0.01 的显著性水平检验, 相对而言, 1951—2016 年两者相关更好。特别是 1900—2016 年 21 a 滑动平均后青岛汛期降水量与汛期 PDO 指数的相关系数高达 -0.90, 显著通过了 0.01 的显著性水平检验, 这些计算结果验证了上述的分析结论。

综上所述, 青岛汛期降水量具有明显的年代际变化特征, 同时也与 PDO 这一具有显著年代际振荡周期的气候变化现象存在较好的负相关联系。

3 PDO 影响青岛汛期降水量年代际变化的成因分析

众所周知, 季风的强(弱)是造成季风气候区汛

期降水量偏多(少)的主要原因,而海陆热力差异是季风的第一推动力,所以海洋的热力特征决定了其在气候变化中扮演极其重要的角色。本节通过分析 PDO 冷暖位相时期,太平洋 SST 场及大气环流场的不同配置特征,试图寻找影响季风强弱及青岛汛期降水量多少的原因。考虑到 NCEP/NCAR 再分析资料始于 1948 年,而 1938 年前青岛降水量资料存在着部分年份缺测的现实以及 1951—2016 年青岛汛期降水量与 PDO 指数相关更好的情况,以下的分析均基于 1951—2016 年青岛降水量、PDO 指数、海表面温度、风场及环流场资料。

3.1 太平洋 SST 场特征

首先计算了 1951—2016 年青岛汛期降水量与同期太平洋 SST 的相关分布,由图 2 看出,有 2 个大范围的高相关区域,其中西北太平洋的区域为正相关,最大正相关区域位于 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{W}$ 范围内,通过了 0.05 的显著性水平检验,中心区域通过了 0.01 的显著性水平检验,而热带中东太平洋地区呈现大范围显著的负相关,似呈赤道南北对称的特征,通过了 0.01 的显著性水平检验, $15^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{S}$, $170^{\circ}\text{E}\sim 170^{\circ}\text{W}$ 西南太平洋为正相关,而北美沿岸、阿留申群岛以北太平洋是负相关区,从南至北呈现“+--+”的相关分布。特别是青岛汛期降水量与赤道中东太平洋 SST 呈显著负相关,表明其与 ENSO 事件有关,即 El Niño 年青岛降水偏少, La Niña 年则相反。上述结论与费艳琴等^[13] 研究结果“5 月北太平洋 $160^{\circ}\text{E}\sim 175^{\circ}\text{W}$, 36°N 以北 SST 与青岛夏季降水量呈正相关关系”、郭飞燕等^[14] 研究结果“厄尔尼诺年夏季,青岛降水往往偏少”、高晓梅等^[15] 和李辑等^[16] 研究结果“西风漂流带 SST 偏高时,赤道中东太平洋地区 SST 偏低,北上台风及影响山东的台风个数偏多,青岛汛期降水偏多”比较一致。

计算发现,汛期 PDO 负指数年数有 33 a、正指数年数也有 33 a,进一步对汛期 PDO 负指数年、汛期 PDO 正指数年分别做 SST 距平合成分析,探究是否存在图 2 的分布形态。由图 3a 可见, PDO 负指数年时西北太平洋区域为大范围正距平,距平中心大于 0.5°C ,而热带中东太平洋地区呈现大范围显著的负距平,距平中心小于 -0.5°C , $15^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{S}$, $170^{\circ}\text{E}\sim 170^{\circ}\text{W}$ 西南太平洋为正距平,而阿留申群岛以北太平洋及北美西岸也是负距平。由图 3b 可见, PDO 正指数年,西北太平洋区域为大范围负距平,而热带中东太平洋地区呈现大范围的正距平,

$0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{S}$, $150^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 西南太平洋为负距平,而阿留申群岛以北太平洋及北美西岸也是正距平,与图 3a 呈现相反的距平分布,并且与图 2 分布形态也极为相似。

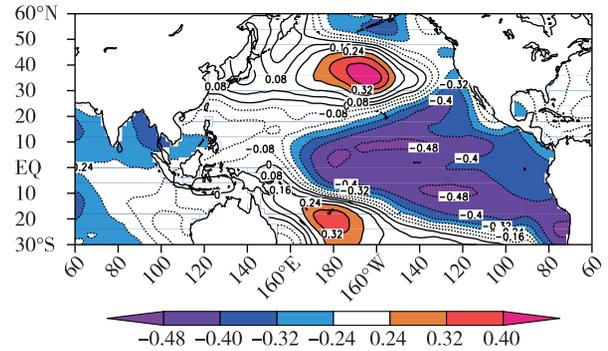


图 2 1951—2016 年青岛汛期降水与同期太平洋 SST 的相关分布(通过 0.05 的显著性水平检验标准为 ± 0.24 ,通过 0.01 的显著性水平检验标准为 ± 0.32 ;填色为通过显著性水平检验区域)

Fig. 2 Correlation between the precipitation in Qingdao and the SST over the Pacific Ocean during flood season from 1951 to 2016 (± 0.24 is the standard for passing the significance test at 0.05 level and ± 0.32 is for 0.01 level; colored areas denote passing the significance test)

再详细看不同 PDO 冷暖位相时期汛期太平洋 SST 距平场分布特征。冷位相时期 1951—1976 年(图 3c)、2000—2013 年(图 3e)太平洋 SST 距平场分布特征与 PDO 负指数年相似(图 3a);暖位相时期,1977—1999 年(图 3d),太平洋 SST 距平场分布特征与 PDO 正指数年一致(图 3b),2014—2016 年(图 3f)与 PDO 正指数年分布结构虽然相似,但西北太平洋区负距平范围与数值均较小,热带中东太平洋地区 SST 正距平范围与数值均较大,可能与样本数只有 3 a,代表性不够有关。

综上所述,汛期 PDO 正(负)指数年、PDO 冷(暖)位相年所对应的太平洋 SST 距平场分布特征几乎是相反的。青岛汛期降水量的年代际变化与西北太平洋区域及热带中东太平洋地区 SST 距平的年代际变化有密切联系。

3.2 大气环流特征

西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)对中国夏季降水有重要影响^[17],山东汛期降水与副高关系密切,副高北抬西伸,西南季风向山东发展是雨季开始的主要特征之一^[18]。因此有必要探究青岛汛期降水量与西太平洋副高的关系。首先分别计算了 1951—2016 年青岛汛期降水量、PDO 指数与

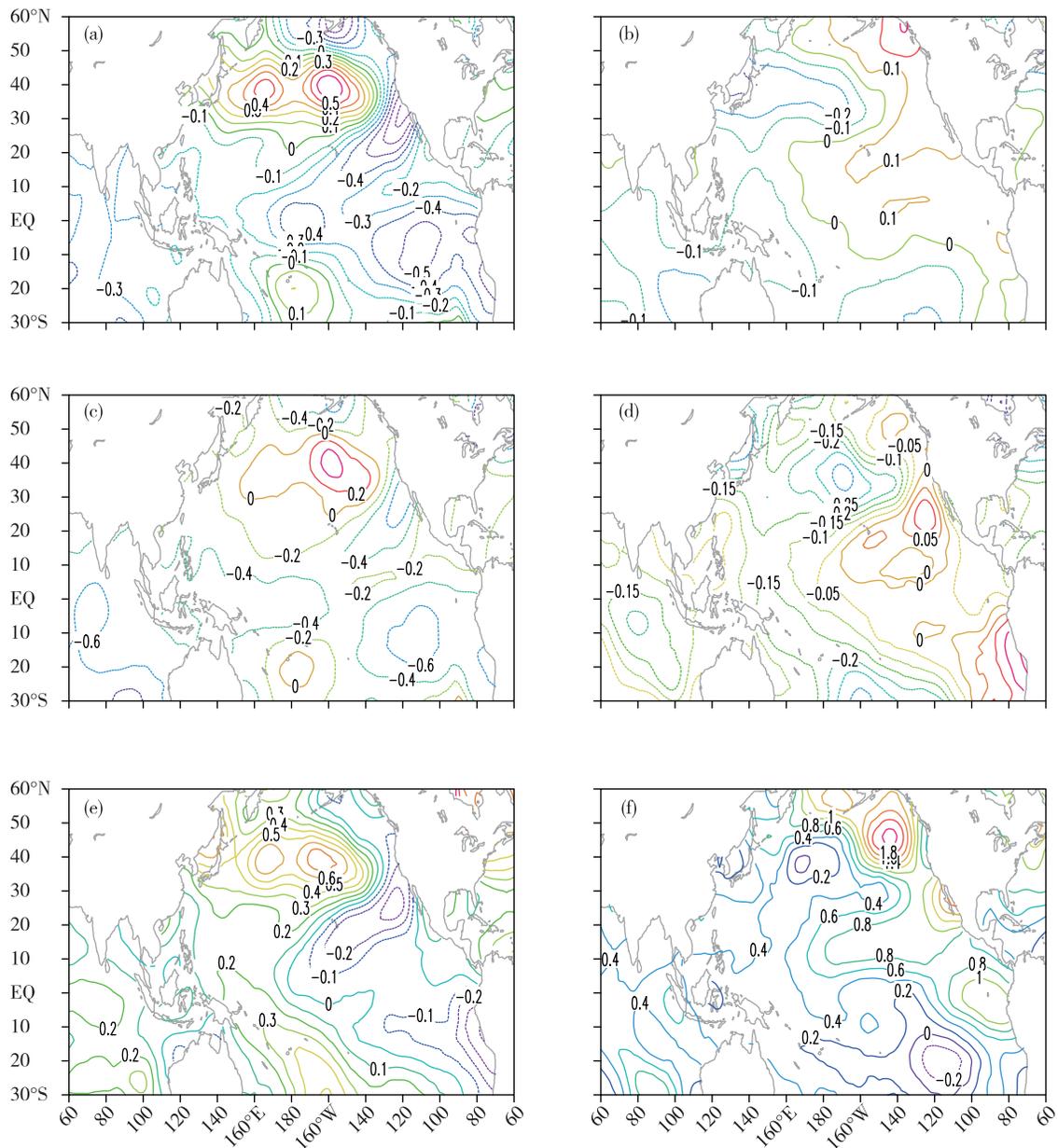


图3 汛期多年平均的太平洋 SST 距平(平均值为 1981—2010 年,单位:°C;a. PDO 负指数合成,b. PDO 正指数合成, c.1951—1976 年,d.1977—1999 年,e. 2000—2013 年,f.2014—2016 年)

Fig.3 Average Pacific SST anomaly during flood season over the years (the average value is calculated from 1981 to 2010, units: °C; a. negative index synthesis of PDO, b. positive index synthesis of PDO, c. from 1951 to 1976, d. from 1977 to 1999, e. from 2000 to 2013, f. from 2014 to 2016)

西太平洋副高脊线位置、西伸脊点、面积、强度 4 项指数的相关系数(表 2),由相关系数数值可以得出: PDO 负指数年副高脊线偏北,面积偏小,强度偏弱; PDO 正指数年,特征相反。而副高脊线与青岛汛期降水量呈显著的正相关,相关系数为 0.46,通过了 0.01 的显著性水平检验,即副高脊线偏北时,青岛汛期降水量偏多,反之偏少。

既然西太平洋副高脊线与青岛汛期降水量是显著正相关关系,而青岛汛期降水量存在年代际变

化,那么西太平洋副高脊线长期变化特征如何? 计算 1951—2016 年每年 6—9 月西太平洋副高脊线纬度和,由 6—9 月西太平洋副高脊线纬度和距平累积曲线(图 4)可发现,1951—1976 年距平累积波浪式增加,说明此段时期西太平洋副高脊线总体位置偏北,而 1977—1998 年距平累积波浪式减少,说明西太平洋副高脊线总体位置偏南,1999—2016 年距平累积波浪式增加,西太平洋副高脊线位置又趋向偏北。1977 年是转折点,这与 PDO 从冷位相向暖位

表 2 青岛汛期降水量、PDO 指数与西太平洋副热带高压指数间的相关关系

Table 2 Correlation between precipitation/the PDO index and the western Pacific subtropical high index during flood season in Qingdao

副高指数	降水量与副高指数间的相关系数	PDO 指数与副高指数间的相关系数
面积指数	-0.10	0.29*
强度指数	-0.15	0.27*
脊线位置	0.46**	-0.49**
西伸脊点	-0.06	-0.22

注: * 为通过了 0.05 的显著性水平检验, ** 为通过了 0.01 的显著性水平检验。

相转换的时间一致,另一个转折年 1999 年,比 PDO 暖位相向冷位相转换时间早 1 a。上述分析说明了 PDO 造成西太平洋副高脊线及青岛汛期降水量均发生了年代际变化。

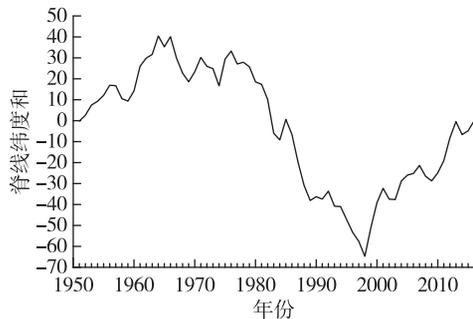


图 4 1951—2016 年西太平洋副高 6—9 月脊线纬度和的距平累积曲线

Fig.4 Accumulated anomaly curve of the ridges' latitude summation of western Pacific subtropical high from June to September from 1951 to 2016

大气环流的配置特征有助于理解汛期降水量多少的物理成因。因此进行了 PDO 冷暖位相时期, 850 hPa 风场、500 hPa 位势高度场合成分析, 由图 5a 可见, 1951—1976 年汛期副高脊线偏北, 西伸脊点偏东, 面积偏小, 通过对流层低层 850 hPa 风场距平可见, 东亚中高纬地区是显著的气旋性环流, 我国东部从南到北均是异常的偏南风, 来自副高外围的西南暖湿气流与北方冷空气在山东半岛交汇产生降水, 使得青岛汛期降水量偏多。而 1977—1998 年汛期副高西伸(图 5b), 脊线偏南, 面积增加, 控制华南地区, 对流层低层 850 hPa 风场距平可见, 我国东部长江以北是偏北风异常, 暖湿气流沿副高边缘北上在长江中下游地区凝结形成降水, 造成长江中下游地区夏季降水偏多, 青岛降水量偏少。2000—2013 年汛期(图 5c), 副高脊线偏北, 面积减少, 有利于东亚夏季风增强, 由对流层低层 850 hPa 风场距平可见, 我国东部呈现偏南风异常, 使得东部地

区夏季雨带进一步向北推进, 青岛降水量偏多。2014—2016 年汛期(图 5d), 副高脊线偏南, 西伸, 面积增大, 对流层低层 850 hPa 风场距平可见, 我国东部呈现偏北风异常, 东亚夏季风减弱, 使得东部地区夏季雨带偏南, 青岛降水量偏少。

以上分析表明, 青岛汛期降水的年代际转型与 PDO 的年代际位相转换存在紧密联系。PDO 位于冷位相, 西北太平洋 SST 偏暖, 北美沿岸以及热带中东太平洋 SST 偏冷, 副高偏弱偏东, 脊线偏北, 东亚夏季风偏强, 青岛汛期降水偏多; PDO 位于暖位相, 西北太平洋 SST 偏冷, 北美沿岸以及热带中东太平洋 SST 偏暖, 副高偏强偏西, 脊线偏南, 东亚夏季风偏弱, 青岛汛期降水偏少。

4 春季 PDO 指数及其相关联的太平洋 SST 分布对青岛汛期降水量影响

研究发现, PDO 指数具有较好的持续性, 马柱国和邵丽娟^[11]分析了华北区域平均年湿润指数和年 PDO 指数的时间滞后关系, 发现滞后时间在 0~10 a 的范围内, 相关系数都能通过 0.01 的显著性水平检验, 前期的 PDO 指数可作为华北年代际干湿变化预测的一个重要指标。前文分析得出, 汛期 PDO 指数与青岛汛期降水量有较好的负相关关系, 那么春季 PDO 指数与青岛汛期降水量相关如何?

计算发现, 3—5 月 PDO 指数与青岛汛期降水量的相关系数为 -0.35, 通过了 0.01 的显著性水平检验, 说明春季到夏季 PDO 指数与青岛汛期降水量存在持续的负相关关系。由于 PDO 指数反映北太平洋 SST 异常的 EOF 第一模态时间系数, 下面再来分析春季太平洋 SST 场与青岛汛期降水量的关系。图 6 给出了青岛汛期降水与春季太平洋 SST 的相关关系分布图。可以看出, 青岛汛期降水与春季西北太平洋 SST 有显著的正相关关系, 与热带中东太平洋的 SST 有显著的负相关关系。图 6 与图 2 分布非常相似, 说明青岛汛期降水与春、夏季太平洋 SST 有

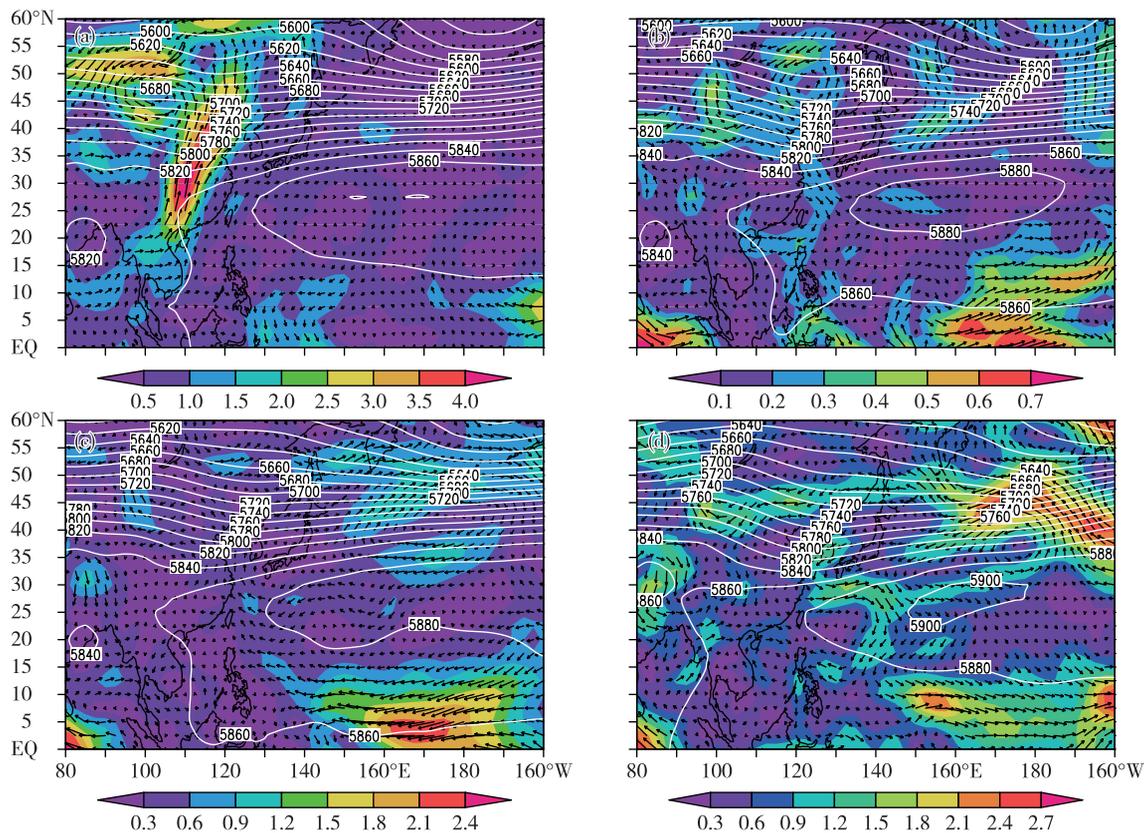


图5 多年平均汛期850 hPa风场距平(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,多年平均基准为1981—2010年,色标为风速距平数值)及500 hPa位势高度场(单位:gpm)(a. 1951—1976年,b. 1977—1999年,c. 2000—2013年,d. 2014—2016年)

Fig.5 Average wind field anomaly (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, the perennial average value is calculated from 1981 to 2010, the colorbar is the wind speed anomaly) at 850 hPa during flood season and geopotential height field (units: gpm) at 500 hPa (a. from 1951 to 1976, b. from 1977 to 1999, c. from 2000 to 2013, d. from 2014 to 2016)

稳定且显著的相关分布。

众所周知,气候变化受到许多物理因子的协同影响。西北太平洋是影响年代际气候变化的重要区域,热带中东太平洋又是 ENSO 发生发展的指示海区,影响年际气候变化。选择春季西北太平洋 SST 正相关关系最明显的 $30^{\circ} \sim 34^{\circ} \text{N}$, $164^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{W}$ 区域,以及热带中东太平洋 SST 负相关关系最显著的 $10^{\circ} \sim 16^{\circ} \text{N}$, $160^{\circ} \sim 146^{\circ} \text{W}$ 与 $20^{\circ} \sim 26^{\circ} \text{N}$, $130^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{W}$ 区域,所选3个区域内每个格点相关系数均通过 0.05 以上显著性水平检验,将每个格点 SST 标准化后分别进行西北太平洋与热带中东太平洋区域平均,将两者之差定义为一个新的 SST 指数 SSTI, SSTI 指数反映了西北太平洋与热带中东太平洋 SST 距平异常的反相变化的协同特征。下面来分析 SSTI 与青岛汛期降水量及大气环流的关系,计算春季 SSTI 指数与青岛汛期降水量的相关系数为 0.47,通过 0.01 的显著性水平检验,明显比春季 PDO 指数与青岛汛期降水量相关性更好,同时也比

图6中太平洋任一格点上 SST 与青岛汛期降水量的相关性更好。

由青岛汛期降水量和 SSTI 指数时间演变曲线(图7)可知,1951—2016年共66a中,青岛汛期降水量距平符号与 SSTI 正负指数同号率为68%。1951—1976年,正的 SSTI 指数基本上对应着汛期降水量正距平,也就是说,当春季西北太平洋 SST 偏暖、热带中东太平洋 SST 偏冷时,对应着青岛汛期降水量偏多。如1956、1962、1964、1970、1971、1975年青岛汛期降水量偏多较多的年份对应着春季大的 SSTI 指数;而1977—1999年期间,负的 SSTI 指数基本上对应着青岛汛期降水量负距平,一般降水量偏少较多年对应着小的 SSTI 指数,如1981、1992、1997、2002、2016年。当然,也有些年份,如1977年偏少较多、2005年偏多较多和2010年偏多较多的事实并不能被太平洋 SSTI 指数所解释,说明虽然太平洋 SSTI 指数是影响青岛汛期降水量的一个重要因素,但降水量还受其他外强迫因子的协同影响。

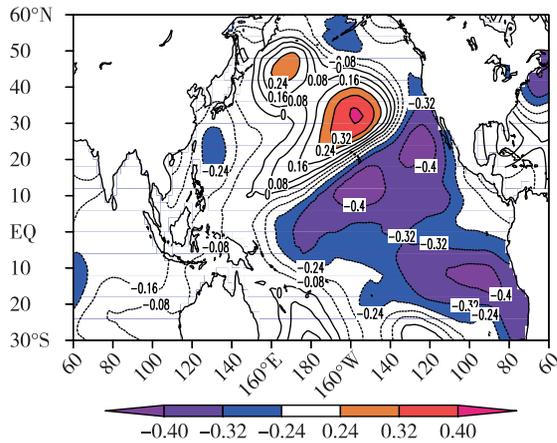


图 6 1951—2016 年青岛汛期降水量与春季太平洋 SST 的相关分布(通过 0.05 的显著性水平检验标准为 ± 0.24 , 通过 0.01 的显著性水平检验标准为 ± 0.32 ; 填色为通过显著性水平检验区域)

Fig. 6 Correlation between the precipitation during flood season in Qingdao and the spring SST over the Pacific Ocean from 1951 to 2016 (± 0.24 is the standard for passing the significance test at 0.05 level and ± 0.32 is for 0.01 level; colored areas denote passing the significance test)

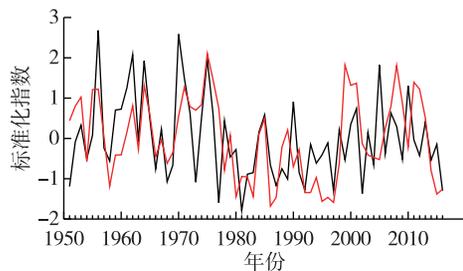


图 7 1951—2016 年青岛汛期降水量标准化变化曲线(黑色)和 SSTI 指数标准化曲线(红色)

Fig. 7 Variation of standardized precipitation (black) during flood season in Qingdao and SSTI (red) from 1951 to 2016

前文指出青岛汛期降水量受西太平洋副高影响较大,所以分别计算了 SSTI 指数与夏季西太平洋副高面积指数、强度指数、脊线位置、西伸脊点 4 个指数的相关系数,分别为 -0.44 、 -0.43 、 0.54 和 0.30 ,前 3 个指数均通过 0.01 的显著性水平检验,其中与脊线位置的正相关最明显,与西伸脊点的相关也通过 0.05 的显著性水平检验。可见,一般 SSTI 正指数对应汛期西太平洋副高脊线偏北、面积偏小、强度偏弱,有利于青岛汛期降水量偏多,反之偏少。

正如文献[12]所说,黄淮地区汛期降水与前期物理意义明确的因子如 ENSO、积雪、土壤湿度等相

关性不明显。计算发现青岛汛期降水量与前期 AO 指数等相关性也不太明显,相对而言,SSTI 指数与夏季西太平洋副高、青岛汛期降水相关性都很好,可作为青岛汛期降水预测的指示因子。

5 结论

1) 青岛汛期降水量具有显著的年际、年代际变化特征,同时也与 PDO 这一具有显著年代际振荡周期的气候变化现象存在重要联系。1900—2016 年青岛汛期降水量与汛期 PDO 指数存在负相关关系,特别是 1951 年以来负相关关系更明显。一般 PDO 冷位相,青岛汛期降水量偏多,PDO 暖位相,青岛汛期降水量偏少。

2) PDO 冷、暖位相时,太平洋 SST 距平场对应 2 种相反分布形态,同时西太平洋副高的位置、强度、面积也有明显不同。PDO 位于冷位相,西北太平洋区 SST 偏暖,北美沿岸以及热带中东太平洋 SST 偏冷,副热带高压偏弱偏东,脊线偏北,东亚夏季风偏强,青岛汛期降水量偏多,反之偏少。

3) PDO 指数具有多季节持续性特征,春、夏季 PDO 指数与青岛汛期降水有稳定且显著的相关关系。青岛汛期降水与春季西北太平洋 SST 有显著的正相关关系,与热带中东太平洋 SST 有明显的负相关关系。

4) 定义了一个新的 SST 距平指数。该指数包含了西北太平洋与热带中东太平洋 SST 距平反相变化的协同影响,由于西北太平洋 SST 影响着 PDO 冷暖位相,而热带中东太平洋 SST 的正负距平大小是 ENSO 生消的指示海区,因此从某种程度来讲,SSTI 指数包含了 PDO 与 ENSO 的协同影响。与 PDO 指数或西北太平洋、热带中东太平洋 SST 和青岛汛期降水量相关性比较,SSTI 指数与青岛汛期降水量相关更好,SSTI 正指数对应汛期西太平洋副高脊线偏北、面积偏小、强度偏弱,东亚夏季风偏强,青岛汛期降水量偏多。

5) 东亚季风区气候异常受到青藏高原、海洋、季风、中高纬度环流系统等诸多因素的影响,气候异常的成因极其复杂^[19]。青岛汛期降水量与前期物理意义明确的因子如 ENSO、积雪、土壤湿度、AO 指数等相关性不太明显,气候预测的难度很大。鉴于 SSTI 指数有较明确的物理意义,可作为青岛汛期降水预测的指示因子。

参考文献:

[1] MANTUA N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific

- interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1997, 78(6): 1069-1079.
- [2] 程乘,朱益民,丁黄兴,等.中国东部地区夏季降水和环流的年代际转型及其与PDO的联系[J].气象科学, 2017, 37(4): 450-457.
- [3] 唐民,吕俊梅.东亚夏季风降水年代际变异模态及其与太平洋年代际振荡的关系[J].气象, 2007, 33(10): 88-95.
- [4] 卢楚翰,管兆勇,李永华,等.太平洋年代际振荡与南北半球际大气质量振荡及东亚季风的联系[J].地球物理学报, 2013, 56(4): 1084-1094.
- [5] 朱益民,杨修群.太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J].气象学报, 2013, 61(6): 641-654.
- [6] 吕俊梅,祝从文,据建华,等.近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因[J].大气科学, 2014, 38(4): 782-794.
- [7] 邓伟涛,孙照渤,曾刚,等.中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系[J].大气科学, 2009, 33(4): 835-846.
- [8] 马柱国.华北干旱化趋势及转折性变化与太平洋年代际振荡的关系[J].科学通报, 2007, 52(10): 1199-1206.
- [9] 任永建,宋连春,肖莺.1880—2010年中国东部夏季降水年代际变化特征[J].大气科学学报, 2016, 39(4): 445-454.
- [10] 杨修群,谢倩,朱益民,等.华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型[J].地球物理学报, 2005, 48(4): 789-797.
- [11] 马柱国,邵丽娟.中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系[J].大气科学, 2006, 30(3): 464-474.
- [12] 陈丽娟,顾伟宗,伯忠凯,等.黄淮地区夏季降水的统计降尺度预测[J].应用气象学报, 2017, 28(2): 129-141.
- [13] 费艳琴,孙即霖,郑美琴,等.山东夏季降水与太平洋海温异常及东亚大气环流的关系[J].山东气象, 2006, 26(2): 1-4.
- [14] 郭飞燕,毕玮,郭飞龙,等.山东气候年际变化特征及其与ENSO的关系[J].海洋与湖沼, 2017, 48(3): 465-474.
- [15] 高晓梅,江静,袁俊鹏,等.影响山东热带气旋的频数与太平洋海温的关系[J].山东气象, 2009, 29(2): 8-14.
- [16] 李辑,李菲,林蓉,等.东亚盛夏北上转向台风年代际变化及其与PDO的关系[J].热带气象学报, 2011, 27(5): 731-737.
- [17] 张庆云,陶诗言,陈烈庭.东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流[J].气象学报, 2003, 61(4): 559-568.
- [18] 黎清才,邹树峰,张少林,等.山东省雨季开始标准的研究[J].山东气象, 2003, 23(1): 17-19.
- [19] 贾小龙,陈丽娟,高辉,等.我国短期气候预测技术进展[J].应用气象学报, 2013, 24(6): 641-655.