

孟祥新,王娜,商林,2017.海温异常对山东夏季降水的影响分析[J].气象,43(10):1259-1266.

海温异常对山东夏季降水的影响分析^{*}

孟祥新 王 娜 商 林

山东省气候中心,济南 250031

提 要: 讨论了前期全球海温异常对山东夏季降水不同分布型的影响,找到了对汛期降水预测有指示意义的异常信号,并将这些异常信号与 2016 年的降水分布特征进行了验证。前期恩索(ENSO)处于发展状态时,易造成全省夏季降水一致的分布形势;前期 ENSO 处于衰减状态时,山东夏季降水易出现东西反向的分布形势。太平洋十年际振荡和热带印度洋全区一致海温模态位相与鲁东南和半岛的夏季降水存在高相关,而副热带南印度洋偶极子和热带印度洋偶极子位相对山东夏季降水的高影响区位于鲁西北。这些异常信号对山东夏季降水预测具有一定的指示意义。

关键词: 海温异常,山东夏季降水,气候预测

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.10.010

Influence of the Early SST Anomaly on the Summer Precipitation in Shandong Province

MENG Xiangxin WANG Na SHANG Lin

Shandong Climate Centre, Jinan 250031

Abstract: Influence of the early SST anomaly on the summer precipitation distribution in Shandong was discussed and possible precursor for prediction was concluded, and verified by actual condition of 2016. It is easy to cause the first EOF mode when ENSO is in the stage of development before summer, and the second mode when ENSO is in the state of decay. The summer precipitation is highly correlated with the Pacific decadal oscillation and Indian Ocean basin-wide warming phase in the southeast and the peninsula of Shandong Province. Meanwhile, high impact area of Southern Indian Ocean dipole and tropical Indian Ocean dipole phase is located in the northwest of Shandong Province. These SST anomalies have certain indicative significance to the summer precipitation prediction in Shandong.

Key words: SST anomaly, Shandong summer precipitation, climate prediction

引 言

气候系统受多圈层的共同影响,具有多时间尺度的特征,对其的预测也具有很大的不确定性,目前仍为世界性难题。在短期气候预测业务中,夏季降水预测一直是全年预测的重点,政府部门也对其高度重视。海洋作为大气的主要热源和水汽源地,是

气候预测中重要的参考因子,恩索(ENSO)作为最强的年际信号,是气候预测业务中的重点参考对象。在全国气候预测业务中,将中国东部夏季雨带分为 3 种类型,ENSO 发生的季节不同,雨带分布也会不同(廖荃荪和赵振国,1992)。进一步的研究表明东部型、中部型及混合型厄尔尼诺事件可能分别导致中国雨带呈现南方型(Ⅲ类)、中间型(Ⅱ类)和北方型(Ⅰ类)的分布特点(袁媛等,2012)。印度洋的异

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306033)及山东省气象局课题(2015sdqxm06 和 2016sdqxm02)共同资助

2017 年 1 月 25 日收稿; 2017 年 8 月 2 日收修定稿

第一作者:孟祥新,主要从事气候监测与预测研究。Email:mx8544@hotmail.com

常信号对东部夏季降水也具有重要的指示意义,印度洋海温偶极子(Indian Ocean dipole, IOD)正位相使中国的北方地区少雨而南方多雨,负位相使中国的北方地区多雨而南方少雨(肖子牛等, 2002)。同时,在年代际尺度上,北太平洋十年际振荡(Pacific decadal oscillation, PDO)对中国夏季降水有重要影响。PDO 暖位相期,夏季华北地区降水异常偏少,而长江中下游、华南南部、东北和西北地区降水却异常偏多;冷位相则与之相反(朱益民和杨修群, 2003)。这些研究成果在历年的全国气候预测业务中得到应用。2014 年开始的厄尔尼诺成为有观测记录以来最强的三次厄尔尼诺之一,其峰值强度超过了 1982/1983 年和 1997/1998 年,对我国气候产生显著影响(翟盘茂等, 2016;袁媛等, 2016),我国出现了连续两年的南涝北旱的气候特征(崔童等, 2015;王朋岭等, 2015;孙林海等, 2015;王东阡等, 2016;司东等, 2016;陈丽娟等, 2016),山东省也经历了连续两年的夏旱。分析强厄尔尼诺的前期异常信号对后期气候的影响,对气候预测业务具有重要的指导意义。

山东夏季雨型与全国雨型之间有一定的联系,但不密切,山东夏季雨型有自己的特点,全国雨型不能完全反映山东夏季降水的分布情况(胡桂芳, 2011)。以往的研究表明,弱厄尔尼诺年和次年,山东涝多于旱,持续性厄尔尼诺的当年山东出现旱灾的几率大(奚秀芬和郑世芳, 1988)。山东夏季降水与赤道东太平洋和北太平洋流区海温相关性好(张苏平等, 1997),与当年 5 月西北太平洋亲潮区海面温度(sea surface temperature, SST)关系密切(费艳琴等, 2006),冬季北太平洋 SST 对山东夏季旱涝趋势预测具有重要的指示意义(顾润源和汤子东, 2004)。热带印度洋的海气相互作用与山东夏季降水存在显著相关,热带印度洋海温偏高时山东夏季降水偏少(张苏平等, 2000)。影响山东夏季降水的热带强迫源区主要位于热带印度洋和南海—西太平洋(王庆等, 2005)。

过去的研究主要针对山东总体的旱涝形势,所用的代表站点较少,而汛期降水的空间分布形势所对应的前期异常信号少有涉及。本文从海温演变特征出发,探讨前期海温异常演变对山东夏季降水分布形势的影响,并结合 2016 年的降水特征,讨论异

常信号所起的作用。

1 资料与方法

本文所用资料包括降水实况资料、大气环流资料、海温资料和海温指数。降水资料来自山东 1961—2015 年 122 个气象站逐年夏季降水数据,剔除缺测和数据不连续的站点,文中共选取了 92 个站点。大气环流资料为美国 NCEP 逐月再分析格点资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al, 1996)。海温资料为美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)气候诊断中心提供的逐月 SST 扩展重建资料(NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature V3b),水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。PDO 指数来自华盛顿大学大气和海洋研究院提供的 1900 年以来的逐月 PDO 指数资料(Zhang et al, 1997) (<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest.txt>)。印度洋海温指数资料来自国家气候中心海洋指数监测资料,包括热带印度洋全区一致海温模态(Indian Ocean basin-wide warming, IOBW)、热带印度洋海温偶极子(tropical Indian Ocean dipole, TIOD)和副热带南印度洋偶极子(Southern Indian Ocean dipole, SIOD)逐月指数资料。气候平均值均采用 1981—2010 年平均。文中主要采用了经验正交函数分解(empirical orthogonal function, EOF)和相关分析方法。

2 山东夏季降水分布特征

2.1 山东夏季降水的主要模态

对山东省 1961 年以来的夏季降水距平百分率进行 EOF 分解,计算得到全省夏季降水的主要分布形势,前三个模态的方差贡献率分别为 45.6%、12.9%和 6.8%(图 1)。第一模态为全省一致的降水分布型,这是山东主要的降水分布形势,表现为全省一致的旱涝分布。第二模态为东西反向分布型,降水异常中心分别位于鲁西北和半岛地区。第三模态为南北反向,降水分布呈现东北—西南向的变化。这三种雨型基本反映了山东夏季降水的分布形势。

20 世纪 60—80 年代,夏季山东省一致分布

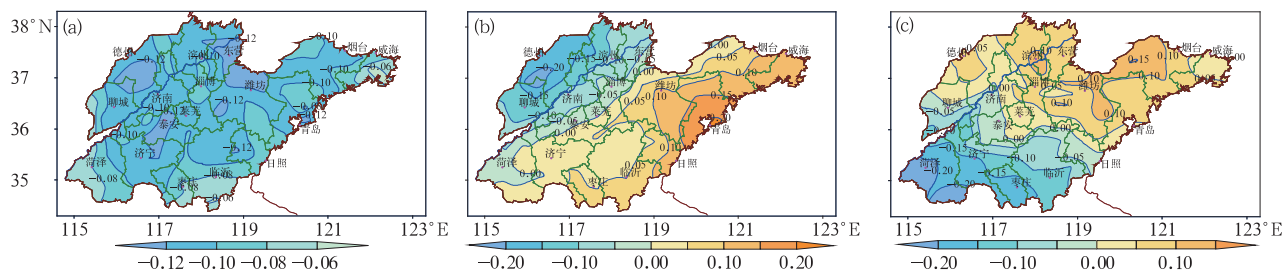


图 1 1961—2015 年山东夏季降水 EOF 分解特征向量场

(a)第一模态,(b)第二模态,(c)第三模态

Fig. 1 The first three characteristic vectors of Shandong summer precipitation in 1961—2015

(a) the 1st mode, (b) the 2nd mode, (c) the 3rd mode

的降水形势出现的次数较多,而 90 年代以来第二、三模态出现的年份开始增多。2014 年开始发展的厄尔尼诺事件对山东气候产生了重要影响,2014 和 2015 年夏季,山东省经历了连续两年的夏旱,出现了全省一致偏少的第一模态分布形势,夏季降水量分别较常年偏少 34.4% 和 19.1%,这在 90 年代以来是比较少见的,特别是 2014 年为近 10 年夏季降水最少的 1 年。

2.2 2016 年夏季降水实况

随着厄尔尼诺的衰减并于 2016 年 5 月结束,我国东部夏季降水呈南、北两条多雨带(袁媛等, 2017),山东的降水也出现了与前两年明显的不同,呈现西多东少的第二模态分布型(图 2),少雨区主要位于鲁东南和半岛。下文主要从前期海温异常的背景分析对山东夏季降水有指示意义的因子,并与 2016 年夏季降水进行验证,分析这些因子在 2016 年夏季降水预测中的指示意义。

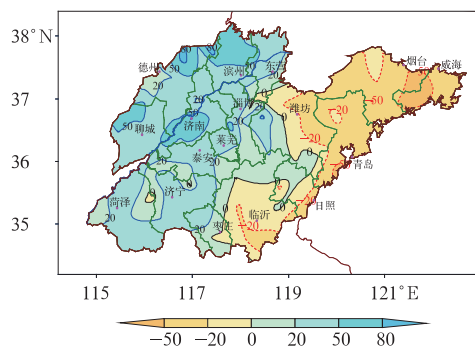


图 2 2016 年山东省夏季降水距平百分率分布(单位:%)

Fig. 2 Distribution of Shandong precipitation anomaly percentage in the 2016 summer (unit: %)

3 夏季降水异常的前兆信号

3.1 PDO 年代际信号的影响

山东夏季降水具有明显的年代际变化特征。20 世纪 60—70 年代,山东夏季降水处于偏多的阶段,80 年代则转为少雨干旱期,90 年代开始,山东夏季降水开始增多,特别是 2003 年以来进入多雨期(图略)。这种变化与全国夏季主雨带经历从北到南又从南到北的演变基本一致(陈丽娟等, 2013;柯宗建等, 2014)。这种年代际变化与 PDO 的冷暖位相的转变有很好的对应关系, PDO 冷位相的 60—70 年代对应山东夏季多雨期,暖位相的 80—90 年代对应山东夏季少雨干旱,20 世纪末, PDO 再次转为冷位相,山东夏季降水又进入偏多阶段。2014 年开始, PDO 出现暖位相特征, 2014—2015 年山东夏季出现连续两年的少雨干旱。

计算前期(春季)和同期(夏季)的 PDO 指数与山东夏季降水的相关系数,得到不同区域对 PDO 的年代际变化具有不同的响应特征(图 3, 图中 ± 0.22 、 ± 0.26 、 ± 0.34 和 ± 0.43 等值线包围区域分别代表相关系数通过 0.1、0.05、0.01 和 0.001 的显著性水平检验,下同)。春季 PDO 指数与鲁东南和半岛地区的夏季降水存在显著的负相关,当 PDO 明显的暖位相维持到夏季时,相关显著区域明显扩大。这说明在 PDO 暖位相背景下,全省降水主要以偏少为主,当前期春季 PDO 处于暖位相背景时,鲁东南和半岛夏季降水易偏少。在夏季降水预测时,这种年代际信号对全省降水,特别是鲁东南和半岛

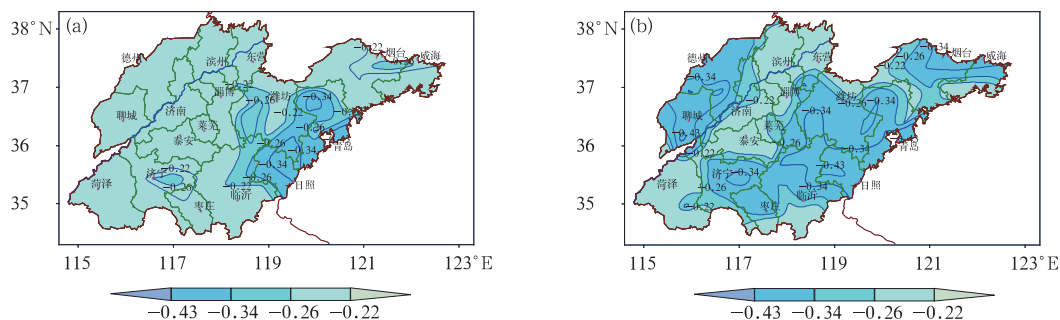


图 3 1961—2015 年春季(a)和夏季(b)PDO 指数与山东夏季降水的相关系数分布

Fig. 3 Distribution of correlation coefficients between Shandong summer precipitation and PDO index of spring (a) and summer (b) in 1961—2015

的降水趋势具有一定的指示意义。

3.2 ENSO 年际信号的影响

厄尔尼诺和拉尼娜是年际尺度上最强的气候异常信号,也是气候预测中重点参考的指标。过去厄尔尼诺对山东降水的影响分析多集中于整体的旱涝形势的分析,本研究从 ENSO 发展演变与山东夏季降水分布型关系的角度分析前期 ENSO 异常信号对夏季降水的指示意义。

分别计算夏季降水前三个 EOF 模态的时间系数与前期 1—5 月的全球海温相关系数,讨论前期海温的演变对后期降水的影响(图 4 和图 5)。对于山东省夏季降水一致分布的模态,前期冬季中东太平洋没有显著的相关区。春季开始,赤道中东太平洋的海温对第一模态的降水分布形势的影响逐渐显

现,显著相关区逐渐扩大,并由赤道东太平洋向西伸展,在 5 月已经扩大到整个赤道中东太平洋,即春季赤道中东太平洋海温偏高有利于山东夏季降水一致偏少,而海温偏低易造成全省降水一致偏多(图 4)。如果计算海温逐月的增量与第一模态时间系数的相关得到的分布形势(图略),结果与图 4 相似,这说明春季赤道中东太平洋海温开始逐渐升高,到春末形成厄尔尼诺事件,山东降水容易出现全省一致性偏少的分布。历史上这样的年份有 1965 年(偏多 10.6%)、1972 年(偏少 16.6%)、1982 年(偏少 7.6%)、1991 年(偏少 3.0%)、1997 年(偏少 30.5%)、2002 年(偏少 48.5%),除 1965 和 1991 年出现 EOF 第二模态外,其他几年均为全省一致偏少。2014 和 2015 年春季都处在厄尔尼诺的发展阶段,山东同样出现了全省夏季降水一致偏少的特征。

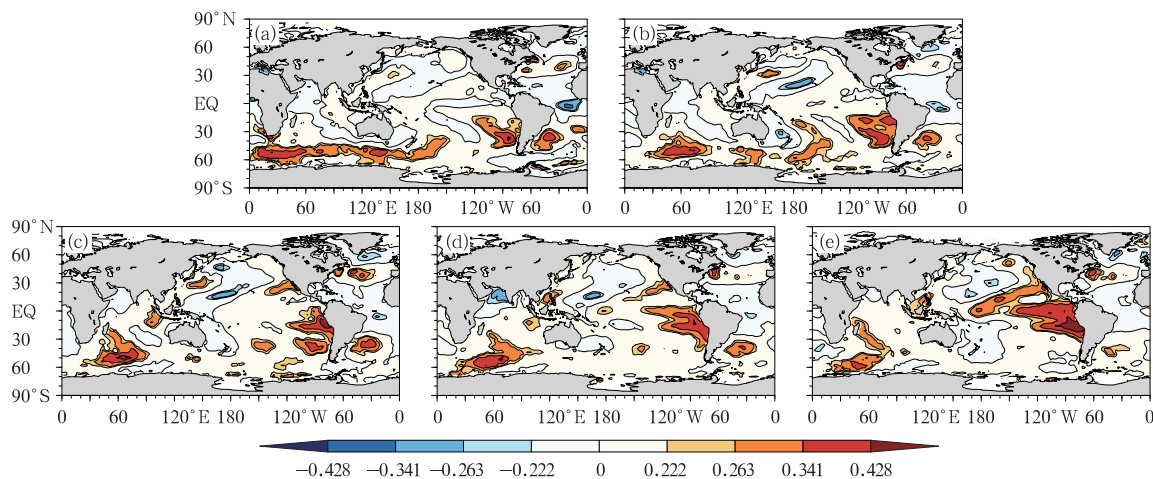


图 4 1961—2015 年 EOF 第一模态时间系数与前期 1—5 月逐月海温的相关系数分布

Fig. 4 Distribution of correlation coefficients between the first mode time coefficient and monthly SST in the 1st five months in 1961—2015

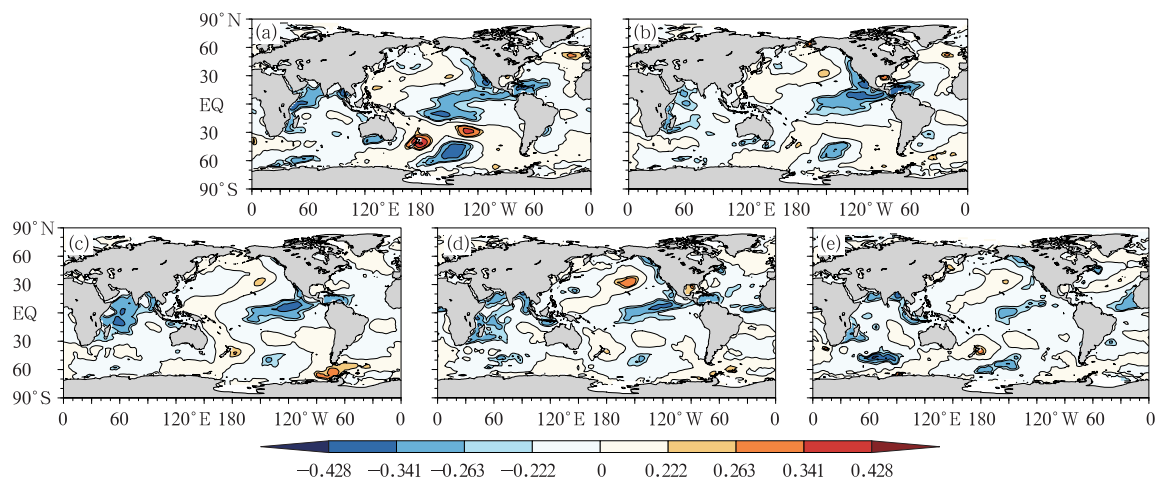


图 5 同图 4, 但为第二模态时间系数

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the second mode time coefficient

这种前期异常的影响可以总结为, 冬末春初 ENSO 开始发展, 春季迅速加强, 并于春末形成一次 ENSO 事件, 山东夏季降水易出现全省一致分布的模式。如果是厄尔尼诺年则易降水一致偏少, 而拉尼娜年降水一致偏多, 即 ENSO 春季处于发展阶段对应全省夏季降水一致的分布型。

对于山东省夏季降水东西反向分布的第二模态(图 5), 前期冬季赤道中东太平洋海温与降水模态呈显著的负相关。这种显著相关区春季开始逐渐减弱, 到 5 月, 赤道中东太平洋海温显著性影响基本消失, 即当冬季赤道中东太平洋处于暖海温的厄尔尼诺状态, 春季海温逐渐降低, 厄尔尼诺迅速衰减, 到春末厄尔尼诺结束, 山东夏季降水容易出现西多东少的第二模态分布形势。历史上这样的年份有 1966、1998 和 2010 年, 其中, 2010 年是典型的 EOF 第二模态的分布形势, 鲁西北偏多 5 成以上, 鲁东南偏少 2 成以上, 其他两年夏季多雨的异常中心也集中在鲁西北。历史上反向变化年份(拉尼娜在冬季达到峰值, 并于春季迅速衰减, 春末结束)的有 1976、1989、2008 和 2011 年, 除 1989 年全省降水偏少外, 其他年份都是西少东多的第二模态分布形势, 多雨中心位于鲁东南和半岛。这说明, ENSO 春季处于衰减阶段对应全省夏季降水东西反向的分布型。

对于第三模态南北反向的分布形势, 赤道中东太平洋不存在典型的显著相关区(图略), 前期海温异常对南北反向的降水分布型影响较小。

3.3 印度洋海温的影响

冬、春季印度洋海温异常年际变率模态对我国东部地区夏季降水形势预测有意义(徐志清和范可, 2012)。前期夏、秋季节的南印度洋偶极子对次年我国大陆东部夏季降水异常有显著的影响, 对应偶极子正位相, 次年夏季印度洋、南海(东亚)夏季风偏弱, 副热带高压(以下简称副高)加强且南撤、西伸, 易形成我国长江流域降水偏多, 华南降水偏少; 负位相年反之(贾小龙和李崇银, 2005)。在预测中, 厄尔尼诺和拉尼娜作为最强的年际信号受到关注较多, 而印度洋海温在预测时被考虑得较少, 本文分别利用印度洋海温不同模态的指数分布讨论前期异常对夏季降水预测的指示意义。

分别计算了春季和夏季的 IOBW 指数与山东夏季降水的相关(图 6), 发现鲁东南和半岛的降水与 IOBW 指数存在显著的负相关。前期春季印度洋一致偏暖时, 山东夏季鲁东南和半岛南部降水易偏少; 如果印度洋暖海温维持到夏季, 整个半岛降水偏少的概率会更大。

TIOD 一般夏季发展秋季达到峰值, 而 SIOD 一般在 1—3 月达到最强, 这里选取当年 2 月 SIOD 指数和前一年 8 月 TIOD 指数分别与山东夏季降水计算相关(图 7)。结果表明, 前期 SIOD 指数与鲁西北和鲁中北部降水存在显著的负相关, SIOD 负位相易造成山东夏季降水西部和北部偏多; 而前期 TIOD 指数在该区域存在显著正相关, TIOD 正位

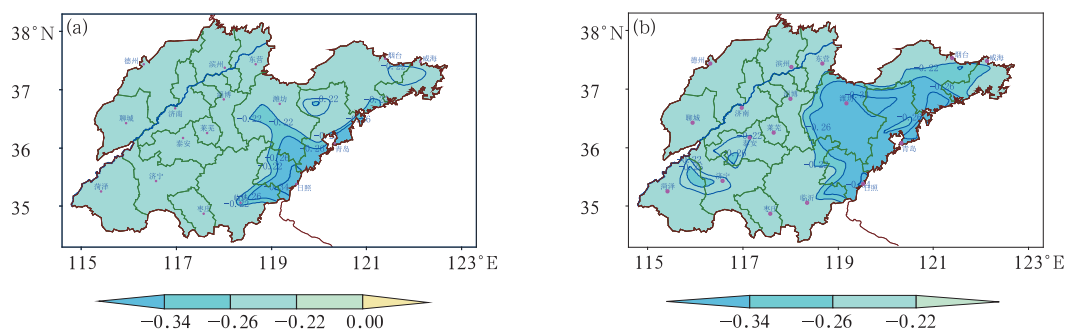


图 6 1961—2015 年春季(a)和夏季(b)IOBW 指数与山东夏季降水的相关系数分布

Fig. 6 Distribution of correlation coefficients between spring (a) or summer (b) IOBW index and Shandong summer precipitation in 1961—2015

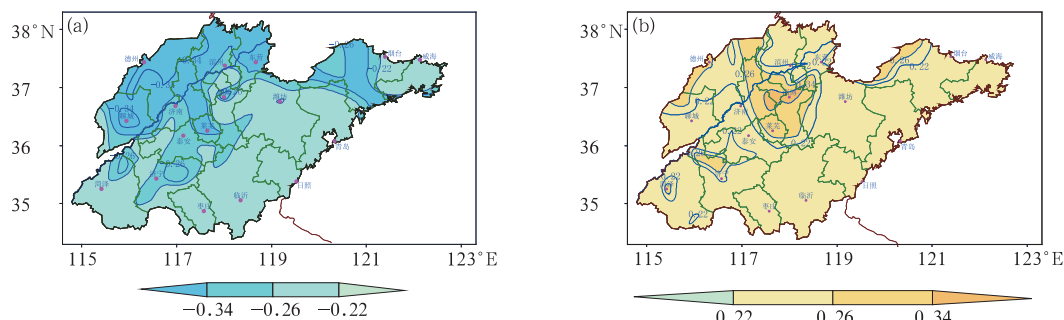


图 7 1961—2015 年 2 月 SIOD 指数(a)和前一年 8 月 TIOD 指数(b)与山东夏季降水的相关系数分布

Fig. 7 Distribution of correlation coefficients between February SIOD index (a) or last August TIOD index (b) and Shandong summer precipitation in 1961—2015

相易造成山东夏季降水西部和北部偏多。

4 夏季降水不同分布型对应的环流场特征

海温的异常通过强迫大气环流来影响降水分布,通过同期的 500 hPa 高度场,进一步分析山东夏

季降水的不同分布型对应的环流场特征。

3.2 节分别给出了前期冬、春季厄尔尼诺开始发展并迅速加强,于春末形成厄尔尼诺事件的年份,以及前期冬、春季厄尔尼诺迅速衰减,于春末结束的年份。对这些典型年份夏季的 500 hPa 高度距平场进行合成(图 8),讨论前期 ENSO 不同的演变阶段对夏季环流场及山东降水分布型的影响。对于前期

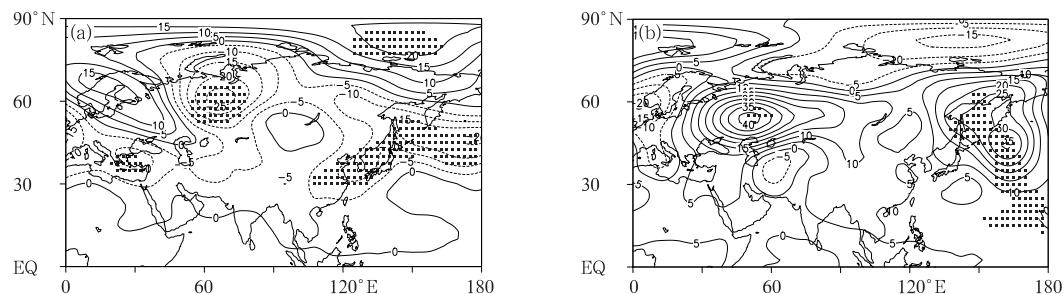


图 8 1961—2015 年厄尔尼诺发展年(a)和厄尔尼诺衰减年(b)夏季 500 hPa 高度距平场的合成图(单位: gpm)

(点状区为通过 0.1 显著性水平检验的区域)

Fig. 8 The 500 hPa geopotential height anomaly composite for summer in El Niño developing years (a) and decaying years (b) during 1961 to 2015 (unit: gpm. Point area has passed the significance test at 0.1 level)

处于厄尔尼诺发展阶段,夏季副高偏南,在中高纬度乌拉尔山和鄂霍次克海上空为明显的负距平,通过了 0.1 的显著性水平检验。贝加尔湖上空为弱的高压脊,山东处于脊前槽后,同时日本海附近负距平不利于副高北抬,这不利于水汽沿副高外围向山东输送。这种环流形势造成了全省降水一致偏少的第一模态分布型。

对于前期处于厄尔尼诺衰减阶段,夏季中高纬度的环流场出现明显不同。乌拉尔山和鄂霍次克海上空为明显的正距平,山东处于两个高压脊之间。日本海上空的正距平利于副高北抬,同时由于副高偏西,山东西部处于副高的外围,尤其是鲁西北降水容易偏多,形成西多东少的第二模态分布型。

除了 ENSO 的年际信号,还有 PDO 在年代际尺度上的气候变率强信号。朱益民和杨修群(2003)的研究指出,在 PDO 暖位相背景下,西太平洋副高偏南,东亚夏季风减弱,致使输送到华北地区的水汽大为减弱,形成了类似于“北旱南涝”的降水异常分布型。在 PDO 暖位相年的合成图上(图略),贝加尔湖至巴尔喀什湖一带为位势高度正距平,山东上空主要受异常的西北气流控制,不利于水汽输送,容易造成山东一致偏少的降水模态。

5 海温异常对 2016 年山东夏季降水的指示意义

前文分析了前期太平洋和印度洋的海温异常对山东夏季降水模态的影响,本节讨论其对 2016 年山东夏季降水分布形势的指示作用。2016 年山东夏季降水呈现西多东少的第二模态,鲁西北和鲁中北部为多雨中心,较常年偏多 2~5 成;半岛为少雨中心,较常年偏少 2~5 成(图 2)。在年代际尺度上, PDO 暖位相信号指示山东夏季半岛降水偏少,这与实况非常吻合。2014 年 PDO 转为暖位相背景后,直到 2016 年春季 PDO 仍处于明显的暖位相,山东半岛经历了连续 3 年的夏旱。在年际尺度上,2016 年的厄尔尼诺的发展形势为前期冬季达到峰值,在春季开始迅速减弱并于 5 月结束,山东夏季降水分布出现了典型的西多东少的 EOF 第二模态分布型,这验证了前期 ENSO 处于衰减状态时,山东夏季降水易出现东西反向的分布形势。对于印度洋异常信号,2016 年春、夏季,印度洋海温表现为明显的一致偏暖,2016 年夏季山东半岛降水异常偏少,有较好

的对应关系。2016 年春季 SIOD 为明显的负位相,尤其是 2 月达到峰值,而 TIOD 在 2015 年夏、秋季则是明显的正位相,这都与 2016 年夏季山东降水西多东少的形势吻合。

6 结论和讨论

文章讨论了前期全球海温异常对山东夏季降水的影响,总结了年代际和年际海洋异常信号对山东夏季降水不同模态的影响,得到了对夏季降水预测有指示意义的异常信号,并结合 2016 年的降水特征,考察了这些异常信号在 2016 年气候预测中的指示意义。

山东夏季降水存在三种典型的分布型,即全省一致型、东西反向型和南北反向型。全省一致型对应着前期春季处于 ENSO 发展的状态,东西反向型对应着前期春季处于 ENSO 衰减的状态。前期冬季厄尔尼诺开始发展,春季迅速加强并于春末形成厄尔尼诺事件,当年夏季副高偏强、偏南,山东夏季降水易出现一致偏少的形势,若为拉尼娜事件,则易出现全省一致偏多的分布型。前期冬季处于厄尔尼诺状态,春季迅速减弱并于春末结束厄尔尼诺事件,副高容易偏西,山东夏季易出现西多东少的降水形势,若为拉尼娜事件,易出现西少东多的降水形势。

此外,在年代际尺度上, PDO 暖位相背景易造成山东东部降水偏少,年际尺度上,印度洋海温一致偏暖易造成山东半岛降水偏少,前期冬、春季 SIOD 负位相和前一年夏、秋季 TIOD 正位相易造成山东夏季西部尤其是鲁西北降水偏多。

2016 年前期, PDO 处于暖位相背景,厄尔尼诺在春季迅速衰减并于 5 月结束,印度洋海温处于典型的一致偏暖的状态,春季 SIOD 和前一年夏、秋季 TIOD 分别处于明显负位相和正位相,这些异常信号与 2016 年的山东夏季降水形势都高度吻合,在后续的气候预测中具有重要的指示意义。

需要指出的是,海温只是气候预测中参考的一个强迫源,海温、海冰、积雪及其他外强迫的相互作用引起的大气环流和水汽输送异常对山东降水形势的影响还需要做进一步的具体分析。

参考文献

- 陈丽娟,高辉,龚振淞,等,2013. 2012 年汛期气候预测的先兆信号和应用[J]. 气象,39(9):1103-1110.

- 陈丽娟,顾薇,丁婷,等,2016. 2015 年汛期气候预测先兆信号的综合分析[J]. 气象,42(4):496-506.
- 崔童,王东阡,李多,等,2015. 2014 年夏季我国气候异常及成因简析[J]. 气象,41(1):121-125.
- 费艳琴,孙即霖,郑美琴,等,2006. 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,26(2):1-4.
- 顾润源,汤子东,2004. 2002 年夏季山东干旱成因分析[J]. 气象,30(8):22-26.
- 胡桂芳,2011. 山东夏季降水分布型及与全国雨型的关系[J]. 山东气象,31(1):1-4.
- 贾小龙,李崇银,2005. 南印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响[J]. 地球物理学报,48(6):1238-1249.
- 柯宗建,王永光,龚振淞,2014. 2013 年汛期气候预测的先兆信号及其应用[J]. 气象,40(4):502-509.
- 廖荃荪,赵振国,1992. 我国东部夏季降水分布的季度预报方法[J]. 应用气象学报,3(增刊):1-9.
- 司东,柳艳菊,邵懿,等,2016. 2015 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响[J]. 气象,42(4):481-488.
- 孙林海,宋文玲,龚振淞,2015. 2014 年汛期气候预测先兆信号应用及其复杂性初探[J]. 气象,41(5):639-648.
- 王东阡,王艳姣,崔童,等,2016. 2015 年夏季气候异常特征及其成因简析[J]. 气象,42(1):115-121.
- 王朋岭,周兵,柳艳菊,等,2015. 2014 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响[J]. 气象,41(4):489-496.
- 王庆,孙即霖,刘诗军,等,2005. 大气环流异常对山东雨季降水的影响[J]. 热带气象学报,21(2):181-190.
- 奚秀芬,郑世芳,1988. 厄尼诺现象与山东旱涝的关系[J]. 山东气象,8(4):18-21,34.
- 肖子牛,晏红明,李崇银,2002. 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,18(4):335-344.
- 徐志清,范可,2012. 冬季和春季印度洋海温异常年际变率模态对中国东部夏季降水的可能影响过程[J]. 大气科学,36(5):879-888.
- 袁媛,高辉,贾小龙,等,2016. 2014—2016 年超强厄尔尼诺事件的气候影响[J]. 气象,42(5):532-539.
- 袁媛,高辉,柳艳菊,2017. 2016 年夏季我国东部降水异常特征及成因简析[J]. 气象,43(1):115-121.
- 袁媛,杨辉,李崇银,2012. 不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响[J]. 气象学报,70(3):467-478.
- 翟盘茂,余荣,郭艳君,等,2016. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J]. 气象学报,74(3):309-321.
- 张苏平,李丽平,程亚军,等,2000. 山东夏季降水与热带海气相互作用区域特性的相关分析[J]. 南京气象学院学报,23(4):594-600.
- 张苏平,朱平盛,胡桂芳,1997. 山东夏季降水与北太平洋 SST 和大气环流的关系[J]. 气象,23(4):3-8.
- 朱益民,杨修群,2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J]. 气象学报,61(6):641-654.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Am Meteor Soc, 77(3):437-472.
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S, 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900—93[J]. J Climate, 10(5):1004-1020.