

郑志海,王永光,2018. 2017年夏季北半球大气环流特征及对我国天气气候的影响[J]. 气象, 44(1):199-205.

2017年夏季北半球大气环流特征及 对我国天气气候的影响*

郑志海 王永光

国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081

提 要: 2017年夏季(6—8月),全国平均降水量348.6 mm,较常年同期(322.6 mm)偏多8.1%,呈现南、北两条多雨带。全国平均气温21.7℃,较常年同期(20.9℃)偏高0.8℃,为1961年以来第二高。东亚夏季风偏弱,西太平洋副热带高压显著偏强,脊线位置偏南,菲律宾附近对流层低层为反气旋环流控制;欧亚中高纬呈现“两槽一脊”环流型,乌拉尔山地区高度场为负距平,高压脊偏弱,贝加尔湖地区为正距平控制,日本附近高度场为负距平。低纬度和中高纬度的环流配置有利于冷暖气流在我国长江以南交汇,水汽通量辐合偏强,主要多雨带位于我国长江以南地区,降水显著偏多。西太平洋副热带高压的年代际增强和赤道中东太平洋由冷水向暖水发展是多雨带偏南的重要原因。

关键词: 夏季降水,西太平洋副热带高压,位相转换,年代际变化

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.01.018

Northern Hemisphere Atmospheric Circulation Characteristics in Summer 2017 and Its Impact on Weather and Climate in China

ZHENG Zhihai WANG Yongguang

Laboratory for Climate Studies, National Climate Centre, CMA, Beijing 100081

Abstract: During the summer of 2017 (June to August), the average precipitation over China was 348.6 mm, which is 8.1% more than the climate mean (332.6 mm). Two rainfall belts were observed over eastern China. The average temperature in summer was 21.7℃, which is 0.8℃ higher than the climate mean (20.9℃). The summer of 2017 is the second warmest since 1961. The East Asian summer monsoon (EASM) was weaker than normal, while the West Pacific subtropical high (WPSH) was significantly stronger than normal with southward ridge position. The anomalous Philippine Sea anticyclone controlled the lower troposphere. The “—+—” circulation pattern was located in Eurasian mid-high latitude, with negative anomalous over Ural Mountain and near Japan and positive anomalous over Baikal Region. Circulation configuration of low latitudes and mid-high latitudes resulted in anomalous convergence of moisture flux and more precipitation over the south of the Yangtze River. Further analysis indicated that the interdecadal strengthening of West Pacific subtropical high and the sea surface temperature anomalies over the central and eastern tropical Pacific changing from negative to positive are the important cause for the significantly more precipitation over the south of the Yangtze River.

Key words: summer precipitation, West Pacific subtropical high, phase-switching, interdecadal variation

* 国家自然科学基金项目(41475096)、国家科技支撑计划项目(2015BAC03B04)、国家重点研发计划专项(2017YFC1502303 和 2017YFA0603701)共同资助

2017年10月16日收稿; 2017年12月22日收修定稿

第一作者:郑志海,主要从事延伸期和季节预测研究. Email: zhengzh@cma.gov.cn

引言

我国中东部地处亚洲季风区,自然条件复杂,气候变化剧烈,旱涝灾害给我国经济发展造成严重损失,给人民生活造成巨大影响(黄荣辉等,2006;封国林等,2013)。而且在全球增暖的背景下,气候异常和极端气候事件更是频发,大范围的旱涝等气候灾害频繁发生,给国民经济和人民生活财产造成的损失还在增加。面对严峻的事实,若能对这些旱涝事件做出较准确的预测,就可以尽早地采取应对措施,减轻气候灾害所带来的严重后果,尤其是夏季旱涝灾害的预测对我国的防灾减灾具有重要意义。认识夏季气候的特征及其变化(赵俊虎等,2012;陈丽娟等,2013,2016;柯宗建等,2014;孙林海等,2015;袁媛等,2017;郑志海等,2009),加深对气候异常的机理认识,为提高汛期预测的准确率,更好地为政府和公众提供服务,具有重要意义。

2017年夏季,全国平均降水量348.6 mm,较常年同期(322.6 mm)偏多8.1%,为1998年(394.7 mm)之后最多;夏季,全国平均气温21.7℃,较常年同期(20.9℃)偏高0.8℃,与2006、2010和2013年并列为1961年以来第二高,仅次于2016年(21.8℃)。西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)显著偏强,为1951年来第二高值,仅次于2010年;东亚夏季风偏弱。2017年夏季降水和气温与北半球大气环流系统有着怎样的联系?主要多雨带位于长江以南的可能原因是什么?本文将针对以上问题展开分析,并试图揭示其可能的成因。

1 资料

本文所用到的资料包括中国气象局国家气候中心整编的逐月降水和气温资料,台风资料来自中央气象台,大气环流资料为NCEP/NCAR逐月再分析资料(Kalnay et al,1996),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,积雪和极冰监测资料来源于国家气候中心气候监测业务应用资料。海温的空间资料为美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的扩展重建的全球海温数据(ERSST.V4),网格分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ (Huang et al,2015),海温指数采用国家气候中心的ENSO监测标准定义。如无特别说明,变量的气候值均为1981—2010年平均。西太副高强度采用

刘芸芸等(2012)的定义,取 10°N 以北, $110^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}$ 范围内500 hPa高度中588 dagpm特征等值线围成的面积与范围内所有格点高度值减去587 dagpm差值的乘积总合。东亚副热带夏季风强度指数采用张庆云等(2003)定义,即将东亚热带季风槽区($10^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{N}, 100^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{E}$)与东亚副热带地区($25^{\circ} \sim 35^{\circ}\text{N}, 100^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{E}$)平均的850 hPa风场的纬向风距平差作为季风指数。

2 2017年夏季我国气候异常特征

2017年夏季,全国平均降水量348.6 mm,较常年同期(322.6 mm)偏多8.1%,为1998年(394.7 mm)之后最多(图1a)。从空间分布来看,主要呈南、北两条多雨带:江南大部、广西大部、云南东部、贵州东南部、华北西部、西北中部和东北部、新疆西南部、西藏中西部等地偏多2成至1倍,局地偏多1倍以上;东北东南部及内蒙古中东部、河南中部、湖北中部、重庆南部、新疆东部等地偏少2~5成(图1b)。

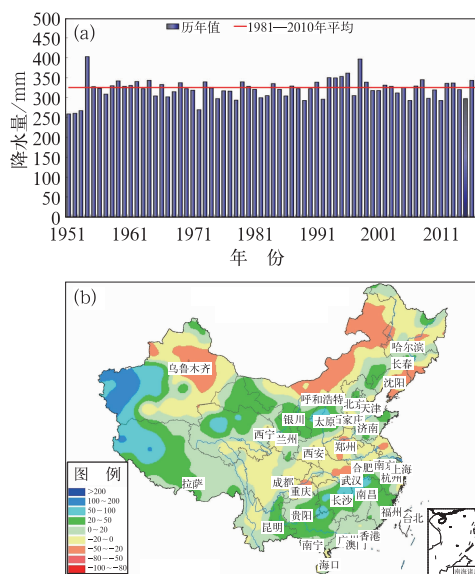


图1 1951—2017年夏季(6—8月)全国平均降水量历史序列(a)及2017年夏季全国降水量距平百分率(b,单位:%)分布
Fig.1 Time series of the summer (June, July, August mean) precipitation averaged in China from 1951 to 2017 (a), and distribution of precipitation anomaly percentage (b, unit: %) in summer 2017

雨季进程总体呈偏晚的特征,2017 年华南前汛期于 4 月 20 日开始,较常年(4 月 6 日)偏晚 14 d。南海夏季风于 5 月第 4 候爆发,爆发时间较常年(5 月第 5 候)略偏早。西南雨季于 6 月 15 日开始,开始时间较常年(5 月 26 日)偏晚 20 d。江淮流域不同区域梅雨开始和结束有很大的差异,江南区梅雨期为 6 月 4 日至 7 月 5 日,时间长度为 32 d,梅雨雨量为 491.9 mm。与气候平均值相比,入梅偏早 4 d,出梅偏早 2 d,雨期偏长 2 d,雨量偏多 34.6%;长江中下游区梅雨期为 6 月 21 日至 7 月 5 日,时间长度为 15 d,梅雨雨量为 166.4 mm。与气候平均值相比,入梅偏晚 7 d,出梅偏早 7 d,雨期偏短 14 d,雨量偏少 40.8%;江淮区梅雨期为 6 月 30 日至 7 月 10 日,长度为 11 d,梅雨雨量为 116.2 mm。与气候平均值相比,入梅偏晚 9 d,出梅偏早 4 d,雨期偏短 13 d,雨量偏少 56.1%。华北雨季于 7 月 21 日开始,较常年(7 月 18 日)偏晚 3 d,于 8 月 11 日结束,较常年(8 月 18 日)偏早 7 d,雨季内平均降水量为 97.5 mm,较常年(135.7 mm)偏少 28.2%。

2017 年夏季,全国平均气温 21.7°C ,较常年同期(20.9°C)偏高 0.8°C ,与 2006、2010 和 2013 年并列 1961 年以来第二高,仅次于 2016 年(21.8°C)。除广西大部、新疆西南部气温偏低 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$ 外,全国大部地区气温接近常年同期或偏高,其中西北地区东部、黄淮西北部和东南部、江淮大部及内蒙古大部、甘肃西北部、新疆东部、四川东部、重庆西部等地偏高 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ (图 2)。

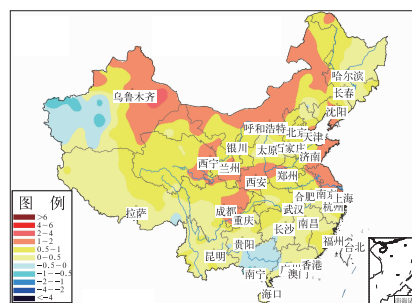


图 2 2017 年夏季(6—8 月)全国平均气温距平(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 2 Distribution of the summer (June, July, August) temperature anomaly (unit: $^{\circ}\text{C}$) in China in 2017

3 夏季降水异常成因

2017 年夏季,欧亚中高纬呈现“两槽一脊”环流型,乌拉尔山地区高度场为负距平,高压脊偏弱,而贝加尔湖地区为正距平所控制,日本附近高度场为负距平,东北亚地区为槽区(图 3a),有利于引导冷空气沿东陆南下到长江以南的东部地区,尤其是在 6 月该特征更明显(图 5a)。同时,在低纬度地区,西太副高较常年显著偏强偏西,脊线位置偏南,菲律宾附近对流层低层为反气旋环流控制(图 3b),引导来自西太平洋和南海的暖湿气流沿副高外围向我国长江以南地区输送。冷暖气流在我国长江以南交汇(图 3c),水汽通量辐合偏强,造成主要多雨带位于我

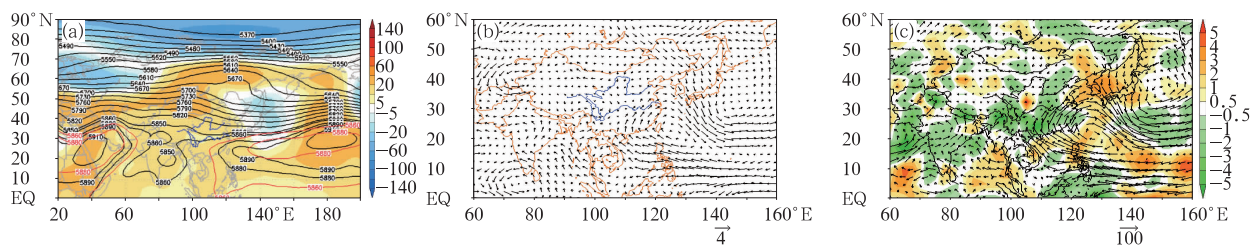


图 3 2017 年夏季(6—8 月)平均大气环流距平场

(a) 500 hPa 高度场(等值线)及距平场(阴影,单位: gpm,红色等值线表示气候平均 5880 和 5860 gpm),
(b) 850 hPa 距平风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (c) 对流层整层积分水汽通量(矢量,
单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)及水汽通量散度(阴影,单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)距平场

Fig. 3 Averaged atmospheric circulation anomalies in summer 2017

(a) 500 hPa geopotential height (contours) and anomalies (shading, unit: gpm, red contours stand for the climatological 5880 and 5860 gpm contours),
(b) 850 hPa wind anomalies (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (c) anomalous moisture flux integrated from 1000 to 300 hPa (vectors, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence (shading, unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

国长江以南地区,降水显著偏多。环流指数监测表明,2017年夏季副高异常偏强(图4a),位置偏南,东亚夏季风强度明显偏弱(图4b),副高强度仅次于2010年同期,由其带来的水汽输送也很强,是南方降水异常偏多(为1998年之后最多)的重要原因,副高偏强偏南和夏季风的偏弱有利于我国的主雨带位于长江以南(张庆云等,2003;Wang et al,2008;Gu et al,2016)。

2017年夏季环流形势存在显著的阶段性变化,6月欧亚地区中高纬盛行“两槽一脊”环流型(图5a),低纬地区西太副高显著偏强偏西,脊线位置偏南,季风雨带在西南地区东部至江南地区持续,导致该区域降水偏多,而北方地区在6月上旬受高空槽的阶段性影响,使得西北地区降水偏多。7月,东亚中高纬地区受平直的纬向环流控制,低纬地区西太副高显著偏大、偏强(图5b),西南季风水汽输送也偏强,西南地区南部至华南地区降水偏多。其中7月下旬,受低纬地区台风活跃影响,西太副高断

裂,西段西伸北抬,引导水汽向北方地区输送,西北地区中部至华北西部降水偏多。8月受副高偏强偏西偏南影响(图5c),江淮至江南降水偏多,同时,8月下旬副高的阶段性北抬导致西北至华北降水偏多。另一方面,台风的活跃也与副高的位置和强度密切相连(图略),2017年夏季台风存在两个活跃阶段,7月下旬台风活跃,有6个台风生成,断裂后的西太副高的西段西伸北抬,引导暖湿气流向我国华北输送,为北方地区的降水提供了充沛的水汽条件;8月下旬,南海至西太平洋对流异常活跃,副高偏北,第13号台风天鸽和第14号台风帕卡西行登陆华南,造成华南南部和西南地区南部降水偏多。

2017年夏季,贝加尔湖地区高度场异常偏高,加之盛夏西太副高断裂,西段西伸北抬,冷空气活动偏弱,我国大部气温明显偏高,尤其是在我国的北方地区。气温呈现显著的阶段性特征,6月受东路冷空气偏强的影响,冷暖气流在我国西南地区东部至江南地区交汇,造成6月我国东部主要多雨带维持

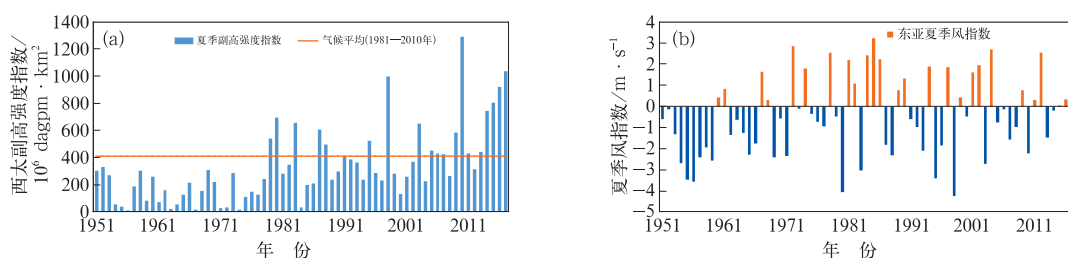


图4 1951—2017年夏季(6—8月)平均大气环流指数历史序列
(a)西太副高强度指数(单位: $10^6 \text{ dagpm} \cdot \text{km}^2$), (b)东亚夏季风指数(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig. 4 Time series of atmospheric circulation indices averaged in summer (June, July, August) from 1951 to 2017
(a) intensity index of WPSH (unit: $10^6 \text{ dagpm} \cdot \text{km}^2$), (b) EASM (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

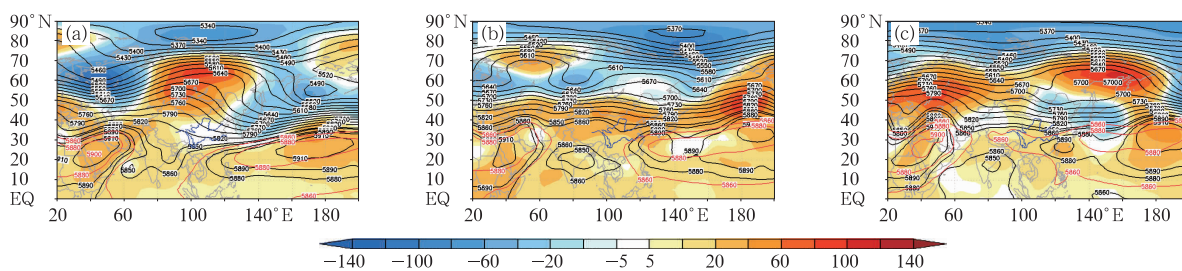


图5 2017年夏季500 hPa高度场(等值线)及距平场(阴影)
(a)6月, (b)7月, (c)8月

(单位:gpm, 红色等值线表示气候平均5880和5860 gpm)

Fig. 5 The 500 hPa geopotential height (contours) and anomalies (shading) in summer 2017
(a) June, (b) July, (c) August

(unit: gpm, red contours stand for the climatological 5880 and 5860 gpm contours)

在这一地区,气温偏低。7 月全国平均气温较常年同期偏高 1.3°C ,是我国自 1961 年以来最热 7 月;全国平均高温(35°C 以上)日数、日最高气温,也创下了 1961 年以来历史同期的新纪录。从空间分布来看,在长江流域和北方地区气温都偏高 1°C 以上,但造成北方和南方地区高温的原因有所不同。北方高温和中纬度环流型有关,南方高温和副高有关。7 月上中旬(1—20 日),北方地区高温显著,主要受到东亚中纬度平直的纬向环流的影响,北方地区上空受到高度场正异常的控制,冷空气活动弱,气温显著偏高,降水偏少,其中西北、东北、华北大部地区气温偏高 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。而 7 月下旬(21—31 日),副高断裂,西段西伸北抬,使得江南至黄淮的大部分地区受副高西段控制,盛行下沉气流,出现持续性高温。上中旬和下甸,我国均有大范围的高温区,使得 7 月平均气温异常偏高。8 月上中旬欧亚中高纬仍维持纬向型环流,冷空气弱,我国气温以偏暖为主。

今年的主要多雨带位于长江以南,与异常偏强偏西的西太副高、偏弱的夏季风配合欧亚中高纬的“两槽一脊”环流型密切相关。2017 年 1—3 月,西太副高强度接近常年同期略偏弱,但从 4 月开始至 8 月副高持续偏强。其中夏季(6—8 月)副高偏强程度列 1951 年以来第二位,仅次于 2010 年;副高西伸达到 111.2°E ,比气候平均值(119.5°E)明显偏西。今年副高偏强西伸的特征可能受到年代际尺度和年际尺度信号共同的影响。在全球变暖背景下,副高于 20 世纪 70 年代末经历了以增强西伸为显著特征的年代际转折,统计研究认为这种年代际的增强西伸与海温的变化有关,尤其是受到热带印度洋—西太平洋的海表温度年代际增暖驱动(Hu, 1997; Zhou et al, 2009; Gong and Ho, 2002; Gu et al, 2016)。

赤道中东太平洋海温的演变型对夏季降水有重

要的影响(Zheng et al, 2016),通常 El Niño 次年的夏季西太副高强度偏强且位置偏西偏南,副热带西北太平洋低层为异常反气旋,有利于向长江流域输送水汽(陈烈庭, 1977; 陶诗言和张庆云, 1998; Chang, 2000);而在 El Niño 发展期,赤道中太平洋暖海表温度异常是影响西太副高的主要因子;在 El Niño 衰减期,中太平洋对西太副高作用快速减弱,热带印度洋、热带西北太平洋和海洋性大陆附近海区海表温度作用增强(Wang et al, 2000; Xie et al, 2009; Chung et al, 2011)。从年际信号上来看,从 2016 年到 2017 年赤道中东太平洋海温的年际变化对主要多雨带位于长江以南有重要贡献。2016 年 8 月赤道中东太平洋海温进入拉尼娜状态,2017 年 2 月海温转为偏暖(图 6b),春季暖海温发展迅速(图 6a),且偏暖持续到 7 月,即赤道中东太平洋海温由前冬的冷水转换为春、夏季的暖水。根据国家气候中心 ENSO 监测标准中的 Niño3.4 指数,1951 年以来的冷水向暖水转换的年份有 1951、1957、1963、1965、1968、1972、1976、1979、1986、1990、1993、1997、2002、2006、2009 和 2014 年,共 16 年,按国家气候中心的四类雨型划分标准(孙林海等, 2005),发现冷水向暖水转换的 16 年中主要呈现两种雨型特征,1951、1957、1963、1965、1972、1986、1990 和 2009 年共 8 年为淮河多雨的 II 类雨型,而 1968、1993、1997、2002、2006 和 2014 年共 6 年为江南南部和华南多雨的 IV 类雨型。仔细分析上述年份发现,出现 II 类雨型的年份基本都集中在 20 世纪 80 年代以前,而 IV 类雨型主要出现在 80 年代以后。高辉(2006)研究发现,淮河降水与 ENSO 事件的关系发生了年代际突变。因此分析了在赤道中东太平洋冷水转暖水的年份中 80 年代前后分布型的差异,在 80 年代以前,降水偏多主要分布在黄淮、内蒙古中部和西南地区西南部,长江流域降水偏少(图 7a);而

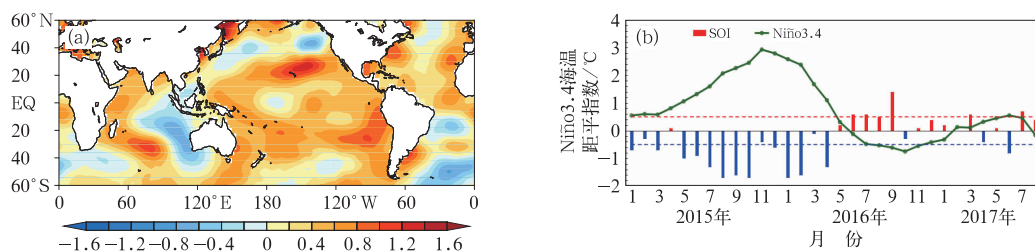


图 6 2017 年春季海温距平(a,单位: $^{\circ}\text{C}$)和 2015 年以来的 Niño3.4 月平均指数演变(b)

Fig. 6 Distribution of sea surface temperature (SST) anomalies in spring 2017 (a, unit: $^{\circ}\text{C}$), and monthly Niño3.4 index since January of 2015 (b)

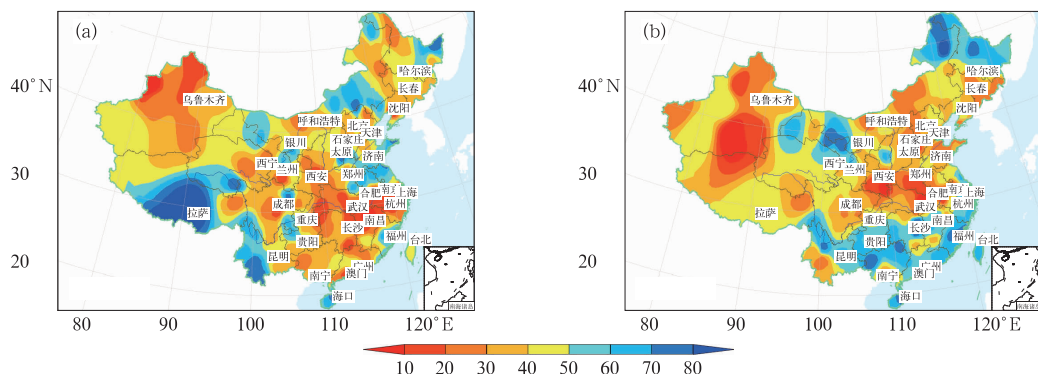


图7 赤道中东太平洋冷水向暖水转换年份夏季降水正距平频次(单位: %)

(a)1951—1979年, (b)1980—2017年

Fig. 7 Composites of the summer precipitation positive anomalies frequency in years when eastern tropical Pacific changed from negative to positive

(a) 1951—1979, (b) 1980—2017

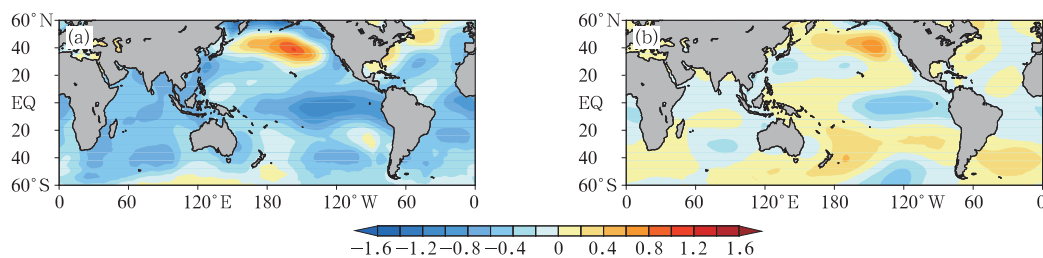


图8 同图7,但为前期冬季海温距平(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for previous winter SST anomalies (unit: $^{\circ}\text{C}$)

在80年代以后,降水主要位于长江以南地区,西南地区东部、江汉、华北等地降水偏少(图7b)。进一步分析80年代前后赤道中东太平洋冷水转暖年份的海温分布(图8),80年代以前,前冬赤道中东太平洋海温偏低的范围很广,日界线以东地区海温均为负距平,且印度洋地区海温在前冬也偏低明显(图8a)。而80年代以后的前冬赤道中东太平洋的冷海温主要位于东太平洋地区,日界线附近海温为接近常年同期,印度洋海温接近常年同期略偏低(图8b)。2016/2017年冬季赤道中东太平洋和印度洋的海温与20世纪80年代以后的前冬海温分布类似。在目前的年代际背景下,海温分布也有利于副高的增强,主要多雨带偏南。赵树云等(2017)的研究也表明,在赤道中东太平洋冷水位相结束且当年发展成El Niño事件的年份,华北雨季降水易偏少,主要多雨带位于南方。

4 结论与讨论

文章总结了2017年夏季降水和气温的主要特

征,分析了对应的北半球大气环流特征及其对我国主要天气气候的影响,初步讨论了环流异常的可能原因。主要结论如下:

(1) 2017年夏季,全国平均降水量348.6 mm,较常年同期(322.6 mm)偏多8.1%,为1998年(394.7 mm)之后最多,东部地区降水呈南、北两条多雨带,长江以南地区和西北、华北等地降水偏多。夏季,全国平均气温 21.7°C ,较常年同期(20.9°C)偏高 0.8°C ,与2006、2010、2013年并列为1961年以来第二高,仅次于2016年(21.8°C),尤其是北方大部分地区偏高 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 。在7月下旬和8月下旬两个时段,台风阶段性活跃,生成和登陆集中。

(2) 2017年夏季,欧亚中高纬呈现“两槽一脊”环流型,尤其是6月更显著,乌拉尔山地区高度场为负距平,高压脊偏弱,而贝加尔湖地区为正距平所控制,日本附近高度场为负距平,有利于引导冷空气沿东路南下到长江以南的东部地区。同时,在低纬度地区,西太副高较常年同期显著偏强偏西,脊线位置偏南,菲律宾附近对流层低层为反气旋环流控制,引导来自西太平洋和南海的暖湿气流沿副高外围向我

国长江以南地区输送。冷暖气流在我国长江以南交汇,水汽通量辐合偏强,造成主要多雨带位于我国长江以南地区,降水显著偏多。关键环流指数监测表明,2017年夏季副高异常偏强,强度仅次于2010年,东亚夏季风强度明显偏弱。

(3) 今年主要多雨带偏南的特征可能受到年代际尺度和年际尺度信号共同的影响。首先,在全球变暖背景下,副高于20世纪70年代末经历了年代际转折,增强西伸。副高这种年代际变化主要受到热带印度洋—西太平洋的海表温度年代际增暖驱动,副高的增强西伸有利于多雨带偏南。年际信号上,2016年8月赤道中东太平洋海温进入拉尼娜状态,2017年2月海温转为偏暖,春季暖海温发展迅速,且偏暖持续到盛夏,即赤道中东太平洋海温发展由前冬的冷水转换为春夏季的暖水。分析发现赤道中东太平洋由冷水向暖水转换与我国降水的关系存在年代际变化,在80年代以前有利于黄淮地区多雨,而在80年代后有利于长江以南地区多雨。年代际和年际的共同作用使得多雨带位于长江以南的特征更明显。关于年代际和年际信号对我国雨带的影响机理还需进一步研究。

参考文献

- 陈丽娟,顾微,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.
- 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.
- 陈烈庭,1977. 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响[J]. 大气科学,1(1):1-12.
- 封国林,赵俊虎,支蓉,等,2013. 动力-统计客观量化汛期降水预测研究新进展[J]. 应用气象学报,24(6):656-665.
- 高辉,2006. 淮河夏季降水与赤道东太平洋海温对应关系的年代际变化[J]. 应用气象学报,17(1):1-9.
- 刘芸芸,李维京,艾税秀,等,2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. 应用气象学报,23(4):414-423.
- 黄荣辉,蔡榕硕,陈际龙,等,2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系[J]. 大气科学,30(5):730-743.
- 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.
- 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.
- 孙林海,赵振国,许力,等,2005. 中国东部季风区夏季雨型的划分及其环流成因分析[J]. 应用气象学报,16(s1):56-62.
- 陶诗言,张庆云,1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应[J]. 大气科学,22(4):399-407.
- 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.
- 张庆云,陶诗言,陈烈庭,2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流[J]. 气象学报,61(4):559-568.
- 赵树云,陈丽娟,崔童,2017. ENSO位相转换对华北雨季降水的影响[J]. 大气科学,41(4):857-868.
- 赵俊虎,封国林,杨杰,等,2012. 夏季西太平洋副热带高压的不同类型与中国汛期大尺度旱涝的分布[J]. 气象学报,70(5):1021-1031.
- 郑志海,任宏利,黄建平,2009. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值实验[J]. 物理学报,58(10):7359-7367.
- Chang C P,2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: roles of the subtropical Ridge[J]. J Climate,13(24):4310-4325.
- Chung P, Sui C, Li T,2011. Interannual relationships between the tropical sea surface temperature and summertime subtropical anticyclone over the western North Pacific[J]. J Geophys Res,116(D13):1016-1022.
- Gong D Y, Ho C H,2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River Valley in the late 1970s[J]. Geophys Res Lett,29(10):78-1-78-4.
- Gu B, Zheng Z, Feng G, et al,2016. Interdecadal transition in the relationship between the western Pacific subtropical high and sea surface temperature[J]. Int J Climatol,37(5):2667-2678.
- 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(D16):19403.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al,1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project[J]. Bull Amer Meteor Soc,77(3):437-471.
- Wang B, Wu R, Fu X,2000. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? [J]. J Climate,13(9):1517-1536.
- Wang B, Wu Z, Fu X, et al,2008. How to measure the strength of the East Asian summer monsoon[J]. J Climate,21:4449-4463.
- Xie S P, Hu K, Hafner J, et al,2009. Indian ocean capacitor effect on indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño[J]. J Climate,22(3):730.
- Zheng Z, Hu Z Z, L'Heureux M,2016. Predictable components of ENSO Evolution in real-time multi-model predictions[J]. Sci Rep,6:35909.
- Zhou T, Yu R, Zhang J, et al,2009. Why the Western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s[J]. J Climate,22(8):2199-2215.