

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.

2016 年夏季我国东部降水异常特征及成因简析^{* 1}

袁媛 高辉 柳艳菊

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: 2016 年夏季(6—8 月),我国东部降水呈南、北两条多雨带,长江中下游和华北大部降水均较常年同期明显偏多。其中,6—7 月的降水主要发生在长江流域,而 8 月发生显著转折,除了华南地区降水偏多外,我国东部大部地区降水都较常年同期明显偏少。6—7 月长江流域的降水偏多主要是受到偏强、偏西的西太平洋副热带高压(以下简称副高)的影响,副高脊线位置总体接近常年,但南北摆动较大,阶段性偏南对应了长江流域降水明显偏多的时段。同时,菲律宾附近低层异常反气旋环流导致来自副高西侧的水汽通量异常辐合区主要位于长江中下游。热带印度洋全区一致暖海温在超强 El Niño 衰减年的持续发展是导致上述环流异常的重要外强迫因子。8 月,副高发生断裂,西北太平洋对流层低层转为异常气旋性环流控制,水汽输送异常辐散区控制我国东部大部地区,长江流域持续高温少雨。8 月的热带大气季节内振荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)活动偏强, MJO 东传至西太平洋并持续长达 25 d,为历史少见。异常的 MJO 活动是导致 8 月热带和副热带大气发生转折的重要原因。

关键词: 夏季降水,西太平洋副热带高压,超强 El Niño,印度洋暖海温, MJO

中图分类号: P448

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.01.013

Analysis of the Characteristics and Causes of Precipitation Anomalies over Eastern China in the Summer of 2016

YUAN Yuan GAO Hui LIU Yanju

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

Abstract: Two rainfall belts were observed over eastern China during the summer of 2016, with the southern one in the Yangtze River Valley (YRV) and the northern one over North China. In June and July, precipitation occurred mainly in the YRV. In August, however, precipitation was below normal in most part of eastern China, except for more precipitation over South China. The more intensified and more westward-extending west Pacific subtropical high (WPSH) was one of the most important circulation factors for the southern rainfall belt over the YRV in June and July. The mean position of the high ridge was near normal. However, the high ridge retreated southward sometimes, causing more precipitation over the YRV during that time. The associated anomalous low-level Philippine Sea anticyclone resulted in anomalous convergence of moisture flux over the middle and lower reaches of the YRV. Moreover, the persistent warming in the entire basin of the tropical Indian Ocean during the decaying year of extremely strong El Niño event acted as the important external-forcing factor for the above tropical and subtropical circulation anomalies. In August, however, the WPSH fractured. Anomalous low-level cyclonic circulation controlled the northwestern Pacific, which caused anomalous divergence of moisture flux over most part of eastern China. Therefore, high temperature and little precipitation occurred in the middle and lower reaches of the

* 中国气象局预报预测核心业务发展专项(CMAHX20160401)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430203)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906016、GYHY201406001 和 GYHY201306033)及国家自然科学基金重点项目(41130960)共同资助

2016 年 10 月 13 日收稿; 2016 年 11 月 9 日收修定稿

第一作者:袁媛,主要从事热带海气相互作用和短期气候预测研究. Email:yuany@cma.gov.cn

通信作者:高辉,主要从事短期气候预测研究. Email:gaohui@cma.gov.cn

YRV. Further analysis indicated that the unusually active Madden-Julian Oscillation (MJO) in August was the important cause for the significant turning of the tropical and subtropical circulations. MJO transmitted eastward to the western Pacific and stayed there for 25 days, which is seldom seen in history.

Key words: summer precipitation, west Pacific subtropical high (WPSH), super El Niño, Indian Ocean basin-wide warming, Madden-Julian Oscillation (MJO)

引 言

中国地处欧亚大陆与太平洋之间,受亚澳季风系统影响,气候复杂多变。我国夏季天气气候受多因子控制,既与东亚夏季风系统中多个成员的相互协同作用有关,又受热带海洋等外强迫因子的影响,同时也与中高纬冷空气的活动密切相关(张庆云和陶诗言,1998;黄荣辉等,2006;Wu et al, 2013)。多因子之间复杂的相互关系造成夏季旱涝分布等天气气候特征具有明显的年际变化,这种分布异常的持续维持会进一步导致极端天气气候事件及气象灾害的发生(王遵娅等,2012;龚志强等,2014;崔童等,2015;王东阡等,2016)。例如,1998年长江全流域的严重洪涝灾害,2003和2007年淮河流域洪涝灾害等,均给人民的生产生活造成影响,带来严重的经济损失(冯明等,2000;徐良炎,2003)。因此,详细了解中国夏季气候特征及其变化,加强夏季重大气候事件的成因诊断分析,明确大气内部动力过程及前期下垫面外强迫对夏季气候异常事件的可能影响,具有重要的现实意义。

2016年夏季,全国平均气温 21.8°C ,较常年同期偏高 0.9°C ,是1961年以来的最高值。全国平均降水量 343.4 mm ,较常年偏多 5.6% 。其中,长江流域降水异常偏多,梅雨期间梅雨量较常年偏多1倍以上,同时北方大部降水也明显偏多。2016年夏季也是超强El Niño事件的衰减年,El Niño事件于2015年11月达到峰值,2016年4月结束,是1951年以来峰值强度最强、持续时间最长的一次El Niño事件(袁媛等,2016;邵懿和周兵,2016;翟盘茂等,2016)。那么,2016年夏季我国东部降水异常特征是否与前期超强El Niño事件有关?是否还有其他外强迫因子的协同作用?本文将针对这些问题展开详细分析和讨论,以期为提高短期气候预测提供更多的参考和依据。

1 资料和方法

本文所用到的资料包括:(1)中国气象局国家气

象信息中心发布的《中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)》(任芝花等,2012),时段为1951—2016年;(2)NCEP/NCAR逐日再分析资料集中的各层位势高度场、水平风场等;资料水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al, 1996; Kistler et al, 2001);(3)美国NOAA提供的线性最优插值全球海温数据(OISST-v2),网格点分辨率是 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ (Reynolds et al, 2002),资料起始于1981年12月。除了OISST-v2数据的气候平均场分别取自1982—2010年平均外(受资料起始时间限制),其余所有数据的气候平均场都为1981—2010年平均。如无特殊说明,本文中冬季指当年12月至次年2月平均,春季为3—5月平均,夏季为6—8月平均,秋季为9—11月平均。

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。西太平洋副热带高压(以下简称副高或西太副高)强度采用刘芸芸等(2012)定义,取 10°N 以北, $110^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ 范围内500 hPa层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差值的乘积总和。热带印度洋全区一致海温模态指数(IOBW)定义为热带印度洋($20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $40^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$)区域格点平均海温距平。Niño3.4指数定义为Niño3.4区($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{W}$)区域平均海温距平。热带大气季节内振荡(MJO)指数采用Wheeler and Hendon(2004)设计的多变量二维MJO指数,取自澳大利亚气象局(<http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>)。

2 2016年夏季降水异常特征

2016年夏季,全国平均降水量 343.4 mm ,较常年同期偏多 5.6% (图1a),也是1999年以来降水量第二多年,仅次于2008年同期(345.1 mm)。从空间分布上看,主要呈南、北两条多雨带:长江中下游大部降水较常年偏多2~5成,其中湖北东部至安徽

中部偏多 5 成以上;西北地区大部至华北大部降水也较常年偏多 2~5 成,其中新疆大部、内蒙古西部及华北西部部分地区偏多 5 成以上,局地偏多 1 倍以上(图 1b)。夏季,全国有 351 站出现极端日降水量事件,主要分布在长江中下游和华北地区,其中 73 站日降水量突破历史极值(图 1c)。我国南方共发生 11 次区域性暴雨过程,暴雨过程平均综合强度为 1980 年以来最强,其中 6 月 28 日至 7 月 6 日长江中下游地区暴雨过程历时 9 d,影响范围包括 451 个国家气象观测站,为 1961 年以来仅次于 1998 年、1991 年等排名第五位的区域性暴雨事件。长江流域梅雨于 6 月 19 日开始,7 月 21 日结束,梅雨期(32 d)较常年(29.3 d)略偏多 3 d,累计梅雨量(584.3 mm)较常年(281 mm)偏多 1 倍以上。

然而,从东部地区夏季降水量的逐日演变来看(图略),6 月至 7 月中旬降水主要位于长江流域,7

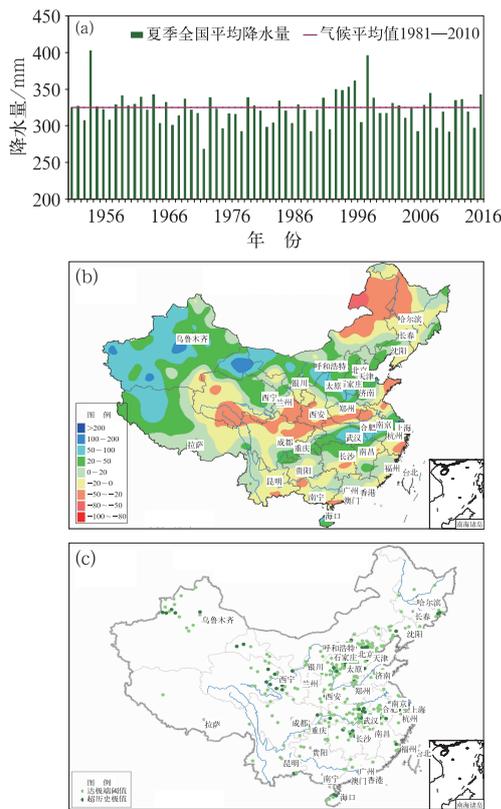


图 1 1951—2016 年夏季(6—8 月平均)全国平均降水量历史序列(a),2016 年 6—8 月平均全国降水量距平百分率分布(b,单位:%)及全国极端日降水量事件分布(c)

Fig. 1 Time series of the summer (June–July–August mean) precipitation averaged in China from 1951 to 2016 (a, unit: mm), and distribution of precipitation anomaly percentage (b, unit: %) and extreme daily precipitation events (c) in China in the summer of 2016

月下旬开始降水北移至我国北方地区,这表明我国东部地区夏季降水具有显著的季节内变化特征。6—7 月平均降水距平百分率的合成情况也和夏季平均的情况基本相似(图 2a),而 8 月发生显著转折,除华南大部降水偏多外,东部大部地区的降水都明显偏少(图 2b)。考虑到降水异常所对应的环流形势的变化,下面将分别针对 6—7 月平均和 8 月降水异常特征做简要的成因分析。

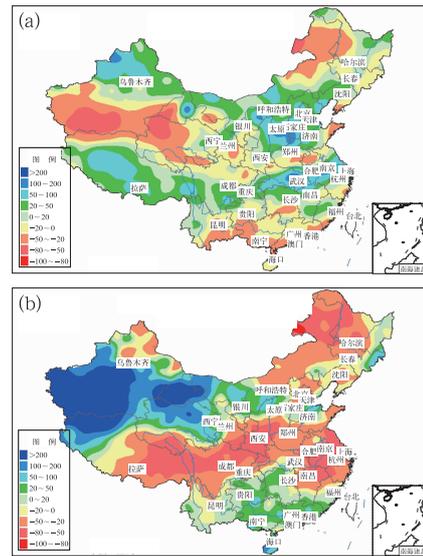


图 2 2016 年 6—7 月平均(a)和 8 月(b)全国降水量距平百分率分布(单位:%)

Fig. 2 Distribution of precipitation anomaly percentage in China for June and July mean

(a) and August (b) in 2016, respectively (unit: %)

3 夏季 6—7 月平均降水异常成因

2016 年 6—7 月,欧亚中高纬呈“两脊两槽”型环流控制(图 3a),乌拉尔山高压脊明显偏弱,东亚北部上空为低压槽控制,而贝加尔湖高压脊和鄂霍茨克海高压脊均偏强。同时,西太副高较常年偏强、偏西,脊线位置接近常年,菲律宾附近对流层低层为异常反气旋环流控制(图 3b),来自西北太平洋的转向水汽输送明显偏强,其与中高纬的弱冷空气配合,造成水汽通量异常辐合区主要位于长江中下游地区(图 3c),导致该地降水明显偏多。从水汽输送场上也可以看出,副高外围的异常西南风水汽输送的部分南支分量自南向北可一直延伸到黄河中下游,这也为我国华北大部多雨提供了充沛的水汽条件。关键环流指数监测也显示出一致的特征:2016 年 6—7

月平均的欧亚经向环流指数较气候平均略偏弱(图 4a),表明欧亚中高纬以纬向环流为主,冷空气势力较弱;副高较气候平均明显偏强,其强度为历史第二,仅次于 2010 年同期(图 4b);东亚夏季风强度明显偏弱,且为 2004 年以来最弱(图 4c)。

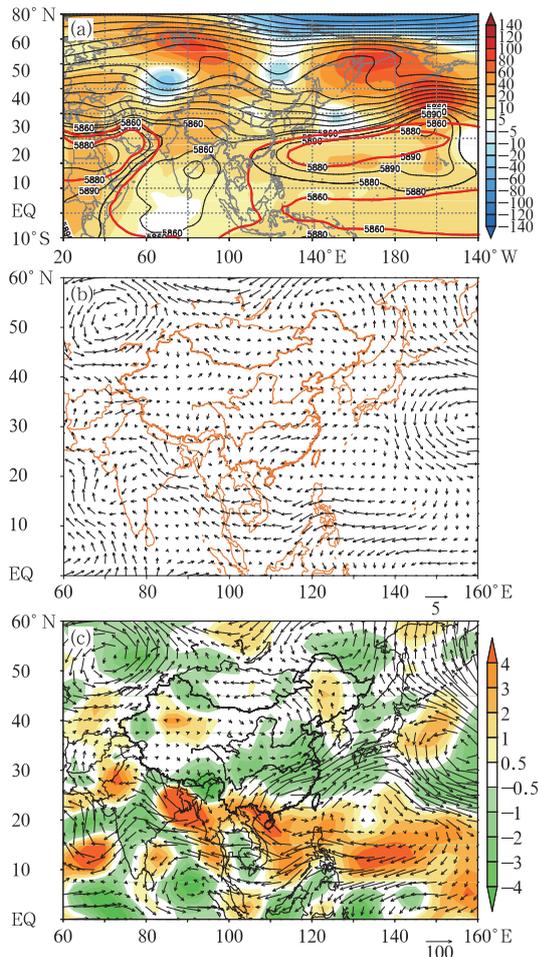


图 3 2016 年 6—7 月平均大气环流距平场
(a)500 hPa 位势高度场(等值线)及距平场(阴影区),
(红色等值线表示气候平均 5880 和 5860 gpm,
单位:gpm);(b)850 hPa 距平风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);(c)对流
层整层积分水汽通量(矢量,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)及水汽
通量散度(阴影区,单位: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)距平场

Fig. 3 Averaged atmospheric circulation anomalies
in June–July 2016

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

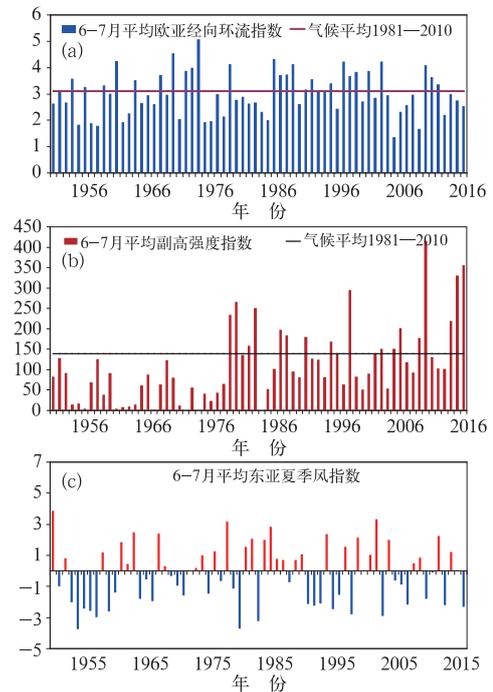


图 4 1951—2016 年 6—7 月平均大气环流指数历史序列
(a)欧亚经向环流指数(单位: $\text{gpm}/^\circ$), (b)西太
副高强度指数(单位: $10^6 \text{dagpm} \cdot \text{km}^2$),
(c)东亚夏季风指数(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 Time series of atmospheric circulation indices
averaged in June–July from 1951 to 2016

(a) Eurasian meridional circulation index (unit: $\text{gpm}/^\circ$),
(b) intensity index of WPSH (unit: $10^6 \text{dagpm} \cdot \text{km}^2$)
and (c) EASM (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

热带印度洋海温的全区一致增暖模态是导致上述热带和副热带地区大气环流异常的最主要原因。2016 年夏季处于超强 El Niño 事件的衰减年,受 El Niño 事件影响,西太副高自 2015 年秋季开始就表现出持续偏强、偏西的特征,并且在 2015/2016 年冬季副高强度达到历史最强(袁媛等,2016)。与此同时,热带印度洋全区一致海温模态也表现出持续偏暖的特征(图 5),并且在前冬(2015/2016 年冬季)和春季均达到 1951 年以来最暖(袁媛等,2016)。研究表明,热带印度洋全区一致增暖多表现为对 El Niño 事件的滞后响应,它在维持 El Niño 事件对东亚气候的影响中起到重要的“接力”作用(Wu and Kirtman,2004;Annamalai et al,2005;Yang et al,2007;Xie et al,2009;Yuan et al,2008;2012;Saji et al,1999)。通常,在 El Niño 发展年的秋冬季,东亚副热带地区会通过 Rossby 波遥相关作用在菲律宾附近激发异常反气旋环流,该反气旋环流也被认为是

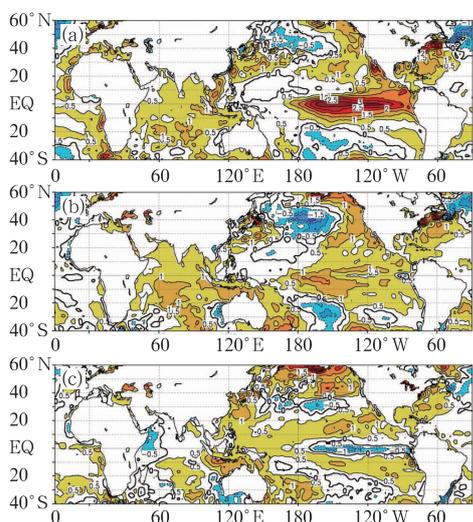


图 5 2015/2016 年冬季(a)、2016 年春季(b)和夏季(c)海温距平分布(单位: °C)

Fig. 5 Distribution of sea surface temperature anomalies in winter 2015/2016 (a), spring (b) and summer (c) 2016 (unit: °C)

El Niño影响东亚气候异常的重要纽带(Zhang et al, 1999; Wang et al, 2000; Wang and Zhang, 2002)。与此同时,副高加强西伸,位置易偏南,副高西侧大量水汽输送至我国南方地区,导致秋冬季我国南方易多雨(Zhou et al, 2010; Zhou and Wu, 2010; Zhou, 2011; Yuan et al, 2014)。然而,在 El Niño 衰减年的夏季,由于赤道中东太平洋异常暖水已经减弱,此时副高偏强、偏西以及菲律宾附近异常反气旋环流的维持却多是印度洋暖海温滞后响应的结果(Xie et al, 2009; Yuan et al, 2012)。从各月 IOBW 指数和 Niño3.4 指数分别与同期副高强度指数的相关系数可以清楚地看出,印度洋海温对于副高强度的影响是显著的、持续的,而赤道中东太平洋海温的影响却是减弱的,且从5月开始低于0.05的显著

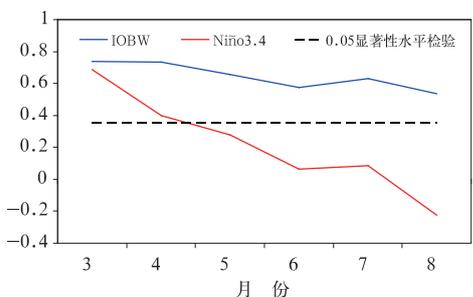


图 6 1980—2015 年 3—8 月各月 IOBW 和 Niño3.4 指数分别与同期副高强度指数的相关系数

Fig. 6 Monthly correlation coefficient of intensity index of WPSH with monthly IOBW (red) and Niño3.4 (blue) index in March–August during 1980–2015, respectively

性水平检验,8 月相关系数转为负值(图 6)。这更进一步证明了在 El Niño 次年,当赤道中东太平洋暖海温开始衰减时,印度洋海温的持续偏暖是维持西太副高继续偏强、偏西的重要外强迫因子。

4 8 月降水异常成因

2016 年 8 月,环流形势发生明显转折,500 hPa 欧亚中高纬转为“两脊一槽”的形势,乌拉尔山高压脊和鄂霍茨克海高压脊均偏强,环流经向度明显偏大,我国大陆上空为大陆高压持续控制;副高断裂成两部分,东段偏弱偏东,西段与大陆高压结合,而西北太平洋为高度场负距平控制(图 7a)。相对应,西北太平洋对流层低层也转为异常气旋性环流(图 7b),整层水汽输送明显偏弱,我国东部为异常的偏北风水汽输送,大部地区为水汽通量异常辐散区控制(图 7c),从而导致我国东部江南及以北地区降水明显偏少(图 2b)。

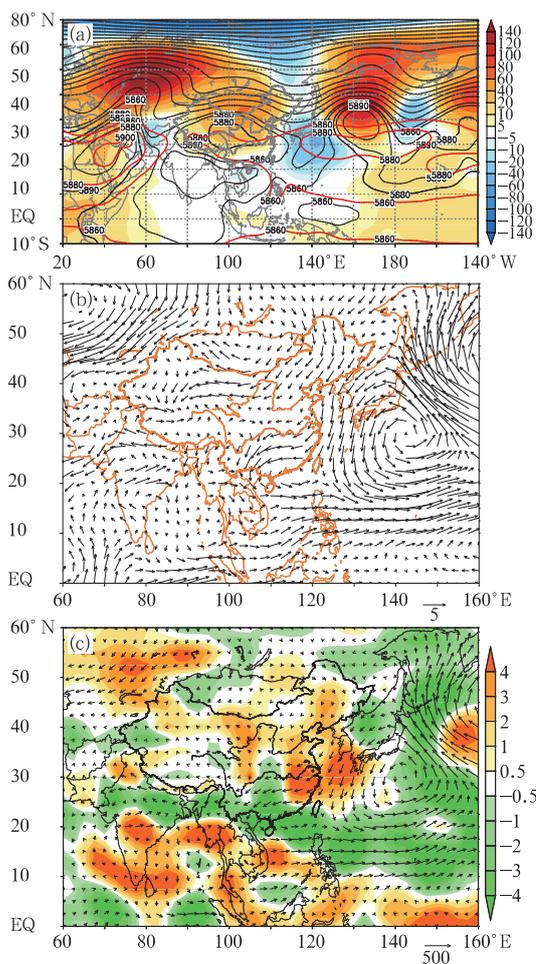


图 7 同图 3,但为 2016 年 8 月

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for August 2016

8月热带和副热带地区的环流形势为何会发生突然转折? 观测表明, 2016年8月, 西北太平洋热带气旋突然变得异常活跃, 共有7个台风生成, 其中2个登陆我国(这是导致华南地区降水偏多的主要原因)。另一方面, MJO指数位相图逐日监测显示: 2016年8月MJO东传至西太平洋(6~7位相), 并且一直持续在6~7位相超过20d(图8a)。MJO在印度洋区域(2~3位相)活跃有利于西太副高的加强西伸, 而MJO在西太平洋(6~7位相)活跃则有利于热带气旋的生成, 反而使得副高减弱东撤。2016年8月MJO在6~7位相持续了25d, 超过气候平均值(7.4d)近18d, 为1979年以来历史第二多, 仅次于1984年(27d)。2016年8月MJO处于6~7位相的平均强度也较气候平均偏强, 并且是2003年以来最强的一年(图8b)。历史上中等以上强度的El Niño次年8月, MJO处于6~7位相的天数多数年份也少于气候平均值, 且强度多偏弱(图略)。因此, 2016年8月MJO活动的异常是导致西

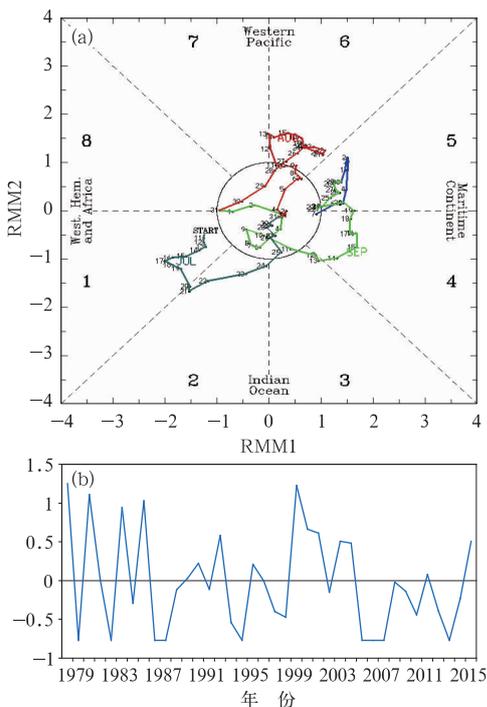


图8 (a)2016年7—9月MJO指数位相图(引自 <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>), 红色为8月指数和(b)1979—2016年8月MJO处于6~7位相的平均强度

Fig. 8 Phase diagram of MJO index during July–September 2016 (cited from <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>), with red for the August index (a), and time series of MJO intensity in Phases 6 and 7 in August during 1979–2016 (b)

北太平洋台风异常活跃以及夏季热带—副热带大气环流发生突然转折的重要原因。

5 结论和讨论

2016年夏季, 我国东部地区降水呈南、北两条多雨带, 长江中下游和和华北大部降水均较常年同期明显偏多。然而, 东部地区的降水表现出了显著的季节内变化特征, 6—7月降水主要发生在长江流域; 7月底至8月初, 环流形势的调整导致我国东部雨带发生显著转折, 除了华南地区受登陆台风影响降水偏多外, 东部大部地区降水都明显偏少, 尤其长江中下游持续高温少雨。文章利用大气环流和海温等资料简要分析了2016年夏季降水异常的可能原因。6—7月长江流域降水异常偏多主要表现为对前期超强El Niño事件和热带印度洋持续暖海温异常的响应, 最直接的环流影响因子是强度偏强、西伸脊点偏西的西太副高, 对流层低层菲律宾附近异常反气旋环流, 以及由该反气旋环流所导致的西北太平洋转向水汽输送。从6—7月平均500 hPa高度场来看, 副高脊线位置基本接近常年同期。但是从月内脊线位置的逐日演变来看, 副高脊线南北摆动很大(图略)。与长江中下游降水量逐日演变对比可以看出, 副高脊线位置偏南的时候多对应长江中下游降水偏多的时段。而华北降水偏多除了欧亚西风带槽脊的配合外, 副高西侧外围的水汽输送也为其提供了重要的水汽来源。8月, 热带和副热带地区环流形势的突然转变主要是受到热带MJO活动的影响, 较强的MJO东传至西太平洋并持续长达25d, 在下垫面偏暖海水的影响下激发了异常活跃的热带气旋活动, 从而导致副高断裂, 西北太平洋为异常气旋性环流控制, 水汽输送条件转差, 水汽通量异常辐散区控制我国东部大部地区。而8月MJO的活动异常可能与热带印度洋海温快速发展的偶极子负位相有关, 我们将另文做更深入的分析研究工作。

文章仅分析了我国东部地区夏季降水异常, 尤其是南方地区降水异常的成因, 对于夏季我国北方旱涝分布的机理认识还有待提高。我们已在另文中简单分析了2016年夏季华北地区降水的异常特征, 除了2016年7月18—21日的强降水过程外, 华北地区其他几次过程的区域平均降水量都不到20 mm。而2016年7月19—20日两日的累计降水

量占 5—8 月降水总量的 25%, 如果去除这次过程的降水量, 2016 年夏季华北地区降水呈现较常年同期略偏少的特征。这表明华北地区本次极端强降水对汛期降水整体偏多起到了非常重要的贡献。极端性天气尺度环流造成的强降水对短期气候可预测性的影响究竟如何还需要做更多的深入研究工作。最后, 2016 年夏季处于超强 El Niño 事件的衰减年, 这与 1998 年夏季的前期海温分布及演变格外相似; 2016 年夏季长江流域降水异常偏多的特征也与 1998 年较为相似, 但前者强度明显偏弱。我们将另文详细分析这两年夏季的降水异常特征、大气环流和夏季风活动以及外强迫因子的异同点等。

参考文献

- 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.
- 冯明, 王家宝, 熊守全, 2000. 1998 年长江大洪水与大气环流和海温异常分析[J]. 长江流域资源与环境, 9(1): 112-117.
- 龚志强, 王艳姣, 王遵娅, 等, 2014. 2013 年夏季气候异常特征及成因简析[J]. 气象, 40(1): 119-125.
- 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.
- 刘芸芸, 李维京, 艾婉秀, 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.
- 任芝花, 余予, 邹凤玲, 等, 2012. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测[J]. 应用气象学报, 23(6): 739-747.
- 邵颀, 周兵, 2016. 2015/2016 年超强厄尔尼诺事件气候监测及诊断分析[J]. 气象, 42(5): 540-547.
- 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.
- 王遵娅, 任福民, 孙冷, 等, 2012. 2011 年夏季气候异常及主要异常事件成因分析[J]. 气象, 38(4): 448-455.
- 徐良炎, 2003. 淮河流域暴雨频繁洪涝严重江南华南酷热少雨伏旱发展[J]. 气象, 29(10): 62-63.
- 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.
- 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.
- 张庆云, 陶诗言, 1998. 夏季东亚热带和副热带季风与中国东部汛期降水[J]. 应用气象学报, 9(S1): 17-23.
- 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(5): 559-568.
- Annamalai H, Xie S P, McCreary J P, et al, 2005. Impact of Indian Ocean sea surface temperature on developing El Niño[J]. J Climate, 18: 302-319.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 77: 437-471.
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al, 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull Am Meteor Soc, 82: 247-268.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al, 2002. An improved in Situ and satellite SST analysis for climate[J]. J Climate, 15: 1609-1625.
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachand P N, et al, 1999. A dipole in the tropical Indian Ocean[J]. Nature, 401(16751): 360-363.
- Wang B, Wu R, Fu X, 2000. Pacific-east Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate[J]? J Climate, 13: 1517-1536.
- Wang B, Zhang Q, 2002. Pacific-east Asian teleconnection. Part II: how the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development[J]? J Climate, 15: 3252-3265.
- Wheeler M C, Hendon H H, 2004. An all-season real-time multivariate MJO index: development of an index for monitoring and prediction[J]. Mon Wea Rev, 132: 1917-1932.
- Wu B Y, Zhang R H, Rosanne D A, et al, 2013. The relationship between winter sea ice and summer atmospheric circulation over Eurasia[J]. J Climate, 26 (15): 5523-5536.
- Wu R, Kirtman B, 2004. Understanding the impacts of the Indian Ocean on ENSO variability in a coupled GCM[J]. J Climate, 17: 4019-4031.
- 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: 730-747.
- Yang J, Liu Q, Xie S-P, et al, 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon[J]. Geophys Res Lett, 34, L02708. DOI: 10.1029/2006GL028571.
- Yuan Y, Li C Y, Yang S, 2014. Characteristics of winter precipitation over southern China and East Asian winter monsoon associated with El Niño and La Niña[J]. J Meteor Res, 28(1): 91-110.
- Yuan Y, Yang S, Zhang Z Q, 2012. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between Eastern and Central Pacific El Niño: effects of Indian Ocean SST[J]. J Climate, 25: 7867-7883. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00004.
- Yuan Y, Zhou W, Chan J C L, et al, 2008. Impacts of the basin-wide Indian Ocean SSTA on the South China Sea summer monsoon onset[J]. Int J Climatol, 28: 1579-1587.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M, 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China[J]. Adv Atmos Sci, 16: 229-241.
- Zhou L T, 2011. Impact of East Asian winter monsoon on rainfall over southeastern China and its dynamical process[J]. Int J Climatol, 31(5): 677-686.
- Zhou L T, Tam C Y, Zhou W, et al, 2010. Influence of South China Sea SST and the ENSO on winter rainfall over South China [J]. Adv Atmos Sci, 27(4): 832-844.
- Zhou L T, Wu R G, 2010. Respective impacts of the East Asian winter monsoon and ENSO on winter rainfall in China[J]. J Geophys Res, 115, D0217. DOI: 10.1029/2009JD012502.