

唐红玉,吴遥,董新宁,等,2022.2020 年夏季重庆降水异常偏多成因分析[J].气象,48(9):1116-1129. Tang H Y,Wu Y,Dong X N,et al,2022. Analysis of characteristics and causes of abnormally more rainfall in Chongqing in summer 2020[J]. Meteor Mon,48(9):1116-1129(in Chinese).

2020 年夏季重庆降水异常偏多成因分析^{*}

唐红玉 吴 遥 董新宁 何慧根 魏麟骁 张 驰

重庆市气候中心,重庆 401147

提 要: 2020 年夏季,重庆降水量为 1961 年以来同期第三多,6—7 月为同期最多,极为异常。利用 1961—2020 年夏季重庆 34 个气象台站逐日降水和 NCEP/NCAR 逐日高度场、风场、相对湿度场等再分析资料及 NOAA 逐月海温场资料,采用相关、合成等现代统计诊断方法,分析了 2020 年重庆地区夏季降水出现异常偏多的主要原因。结果表明:2020 年夏季,尤其是夏季 6—7 月,欧亚地区大气环流高低纬度呈“十一+”环流型分布,环流的经向度明显,出现重庆夏季典型多雨的第一型环流配置,从而造成夏季降水的异常偏多。外强迫信号分析表明:2019 年秋冬季至 2020 春季 ENSO 暖事件使重庆夏季降水偏多的确定性概率增加,同时 2019 年秋季赤道印度洋偶极子正异常助推了 2020 年重庆夏季降水的异常偏多,两事件同时发生时其作用相互叠加,造成了重庆夏季降水的极端异常偏多。影响重庆夏季降水异常的主要外强迫信号包括 ENSO 和印度洋偶极子,提前监测和关注它们对重庆夏季降水预测意义重大。

关键词: 2020 年夏季,降水异常,环流型,海温异常,分析

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.042101

Analysis of Characteristics and Causes of Abnormally More Rainfall in Chongqing in Summer 2020

TANG Hongyu WU Yao DONG Xinning HE Huigen WEI Lingxiao ZHANG Chi
Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

Abstract: In the summer of 2020, Chongqing experienced the third most precipitation amount in the same period since 1961 and the maximum in the same period in June—July, so it was extremely anomalous. In this paper, we investigate the main causes for the abnormal summer precipitation in Chongqing in 2020 by using daily precipitation from 34 meteorological stations in Chongqing and daily geopotential height, wind, relative humidity and other reanalysis data from NCEP/NCAR as well as monthly sea surface temperature (SST) from NOAA during the summer of 1961—2020. We adopt the modern statistical diagnostic methods such as correlation and synthesis for the analysis. The results show that in summer 2020, especially in June—July, the atmospheric circulation in the high and low latitudes over the Eurasian region showed the “+ - +” circulation type distribution, and the longitude of the circulation was obvious. The first type of circulation configuration with typical rainy summer in Chongqing appeared, thus causing the abnormally more precipitation in summer 2020. The analysis of the external forcing signal indicates that the positive ENSO event from autumn—winter 2019 to spring 2020 made the certainty probability of Chongqing’s summer

* 国家自然科学基金项目(41875111)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z011 和 CXFZ2021Z033)、中国气象局西南区域气象中心重大科研业务项目(西南区域 2014-1)、重庆市气象局智慧气象技术创新团队项目(ZHCXTD-201908)和重庆市气象局业务技术攻关项目(YWJSGG-202208)共同资助

2021 年 9 月 23 日收稿; 2022 年 4 月 19 日收修定稿

第一作者:唐红玉,主要从事短期气候诊断预测业务和研究工作. E-mail:782378285@qq.com

precipitation increase. At the same time, the positive equatorial Indian Ocean dipole anomaly in autumn 2019 contributed to the anomalous increase of Chongqing's summer precipitation in 2020. The effects of the two events were superimposed on each other when they occurred simultaneously, causing the extreme anomalous increase of Chongqing's summer precipitation. ENSO and Indian Ocean dipole were the important precursor signals affecting Chongqing summer precipitation anomaly, so paying attention to these two signals in advance could provide meaningful references for Chongqing summer precipitation prediction.

Key words: summer 2020, precipitation anomaly, circulation type, SST anomaly, analysis

引言

我国位于亚欧大陆东部和太平洋的西岸,因独特的地理位置和地形影响,季风气候特点明显,大部地区降水主要集中在夏季,降水的季节变化和年际变化大,所以夏季也极易发生旱涝灾害(郑国光,2019)。如1954年和1998年,包括重庆在内的长江流域曾发生严重洪涝灾害(鞠笑生,1993;陶诗言等,1998),给经济社会造成严重影响(李维京,1999)。近年来,洪水、干旱等极端天气气候事件出现概率和强度增加(翟盘茂等,2016),气候异常造成的影响变得更加明显。对异常气候事件尤其是针对我国夏季降水异常的诊断和预测工作显得极为重要。由于我国地形复杂,降水的地域性和季节性特征明显(丁一汇等,2006;任国玉等,2010),一些造成区域性严重洪涝等灾害的异常气候,给当地国民经济带来了巨大的损失和破坏,同时也增加了政府等决策部门对气候预测服务水平要求,为此更需要对气候异常成因进行不断和深入的了解和再认识。

针对夏季气候异常和频繁发生的极端气候事件,Ren et al(2004)、Lin et al(2004)、鲍名和黄荣辉(2006)和杨涵洧等(2021)进行了大量研究工作。陈丽娟等(2016)、袁媛等(2017)、郑志海和王永光(2018)、高荣等(2018)、顾薇和陈丽娟(2019)、袁媛等(2017)、赵俊虎等(2021;2022)针对我国夏季气候的异常做过分析,认为热带太平洋和印度洋海温变化对东亚夏季风环流的影响,是造成我国夏季降水异常的主要原因。杨玮等(2017)研究认为,强降水的发生区域取决于梅雨锋位置的差异。胡泊等(2018)通过季节降水异常事件的研究,认为对初夏、盛夏和夏季降水有影响的主要环流系统均有明显的不同。封国林等(2012)的研究认为,长江中下游地区发生旱涝急转时,大气环流会出现显著异常,同时赤道中东太平洋及印度洋也会有异常海温出现,如

2011年春末初夏。孙小婷等(2017)和布和朝鲁等(2022)的研究表明:我国的春夏季节转换期间和夏季西南地区发生旱涝急转时,最主要的大气环流影响系统是西太平洋副热带高压(简称西太副高)和中高纬度西风带环流。在华南地区,降水的季节振荡特征明显,且海温和环流对降水的影响在不同年代并不相同(李春晖等,2017)。可见在不同区域或季节及不同年代,降水具有明显的差异性(唐红玉等,2019)。虽然近年来我国许多学者开展了对于夏季降水的客观预测技术方法研发(蒋薇等,2021;王会军等,2020;庞轶舒等,2021),但从揭示和了解本地气候异常成因和提高区域气候预测能力为出发点,非常有必要对区域降水异常的特征及影响系统、前兆信号等进行复盘分析和研究。

处在青藏高原与长江中下游平原过渡性地带的重庆,境内地形起伏明显。特殊的地理位置使得该地区气象灾害相比于长江中下游的平原地区更加复杂多样。近年来,重庆地区灾害性气候异常事件频繁出现,气象纪录不断被刷新,经济社会可持续发展面临严峻挑战。2020年夏季6—7月出现1961年以来历史同期最多降水,共出现11场区域暴雨影响全域34个区县,洪涝灾害较重。对重庆夏季降水异常的诊断,曾有一些学者在降水的年际或年代际变化方面(刘德等,2003)和夏季旱涝变化的成因方面(李永华等,2011;周浩等,2010;程炳岩,2012;张天宇等,2014;唐红玉等,2014)开展过研究,认为中高纬阻塞高压、东亚夏季风、高原积雪、热带太平洋海温等是影响重庆夏季旱涝的重要影响因子,且认为前期热带印度洋和太平洋海温、高原积雪、东亚夏季风等的变化最终是通过大气环流,尤其是通过影响夏季西太副高的位置和强度,从而影响重庆夏季降水的多寡。但影响气候异常的因素每年有其独特性,仍需持续不断地开展大量细致分析和研究工作。本文拟对重庆地区2020年夏季降水异常的原因进行分析,以期深入认识造成重庆地区异常气候的物

理原因,为气候服务工作提供参考。

1 资料与方法

1.1 资 料

观测资料取自重庆市气象局信息中心提供的重庆所有国家级气象台站(共 34 个)逐日数据集,分析时段为夏季 6—8 月和 6—7 月,气候值为 1981—2010 年的标准值。大气再分析资料包括 NCEP 提供的水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 逐日位势高度场、风场、水汽场等再分析资料,时段为 1961 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日。本文分析中所用的热带印度洋偶极子指数(TIOD)取自国家气候中心业务下发的环流特征量数据集,该指数先取的海洋区域和计算方法为:热带西印度洋($10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}, 50^{\circ} \sim 70^{\circ}\text{E}$)的海温距平与热带东印度洋($10^{\circ}\text{S} \sim 0^{\circ}, 90^{\circ} \sim 100^{\circ}\text{E}$)的海温距平之差。文中采用的副高特征量指数为刘芸芸等(2012)的定义计算而得,即强度指数取 10°N 以北, $110^{\circ} \sim 180^{\circ}\text{E}$ 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 588 dagpm 差值的总和;面积指数为该区域内 588 dagpm 的格点围成的面积总和;脊线指数为在 10°N 以北, $110^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{E}$ 范围内, 588 dagpm 等值线所包围的副热带高压体内纬向 $u=0$ 的特征线所在纬度位置的平均值;西伸脊点为 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}\text{E}$ 范围内, 588 dagpm 最西格点所在的经度。

1.2 方 法

本文采用相关、合成等常用气候统计诊断分析方法(魏凤英,2007)以及多变量经验正交函数分解(MV-EOF)方法(施能,2002)。因 2020 年前期赤道中东太平洋发生了 ENSO 暖事件,为综合分析 ENSO 暖事件与气候变率(即气候变化趋势)对重庆夏季降水的共同影响,采用最优气候均态(optimal climate normal, OCN)方法(Huang et al, 1996; Livezey et al, 2007)计算分析了重庆夏季降水的气候变率,并统计 ENSO 暖事件与气候变率综合影响降水的确定性概率。其步骤为:将重庆地区统计时段内近 5 年来降水的平均值减去气候平均值,用其距平百分率作为降水的气候变率;同时,计算近 5 年来降水距平百分率与该距平百分率一致的年份所占的频率;最后计算 ENSO 暖事件年降水距平百分率

与 OCN 方法得到的降水趋势百分率之和,得到综合考虑 ENSO 暖事件和气候变率影响下降水距平百分率的分布,以及降水距平百分率偏多(或偏少)一致的年份所占的频率,即为综合影响降水的确定性概率。

2 重庆 2020 年夏季降水异常特征

2020 年夏季重庆全市平均降水量为 667.1 mm,较常年同期(508.2 mm)显著偏多 3 成,为 1961 年以来历史同期第三多,仅次于 1998 年和 1982 年(图 1a)。降水季内分布极为不均,从夏季降水的逐日变化看(图 1b),6—7 月降水异常偏多,为 1961 年以来同期最多;降水偏多时段主要集中在 6 月中下旬和 7 月上中旬。从 2020 年夏季降水量的空间分布图(图 2a)可以看出,重庆全域降水显著偏多,特别是偏南地区较常年同期偏多 6 成以上。季内降水 6—7 月重庆大部地区降水异常偏多,偏南地区较常年同期偏多 6 成至 1.5 倍以上(图 2b,2c),异常程度极为显著。

3 重庆 2020 年夏季降水异常的环流成因分析

3.1 影响重庆夏季降水异常偏多的关键环流系统

大气环流异常往往是导致一个地区气候异常的

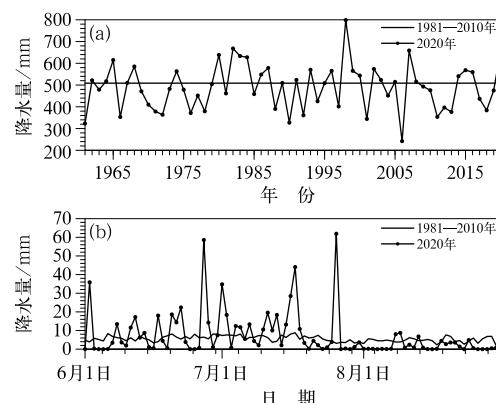


图 1 (a)1961—2020 年重庆夏季降水量逐年变化和(b)2020 年夏季降水逐日演变

Fig. 1 (a) Annual variation of summer precipitation during 1961–2020 and (b) daily variation of summer precipitation in 2020 in Chongqing

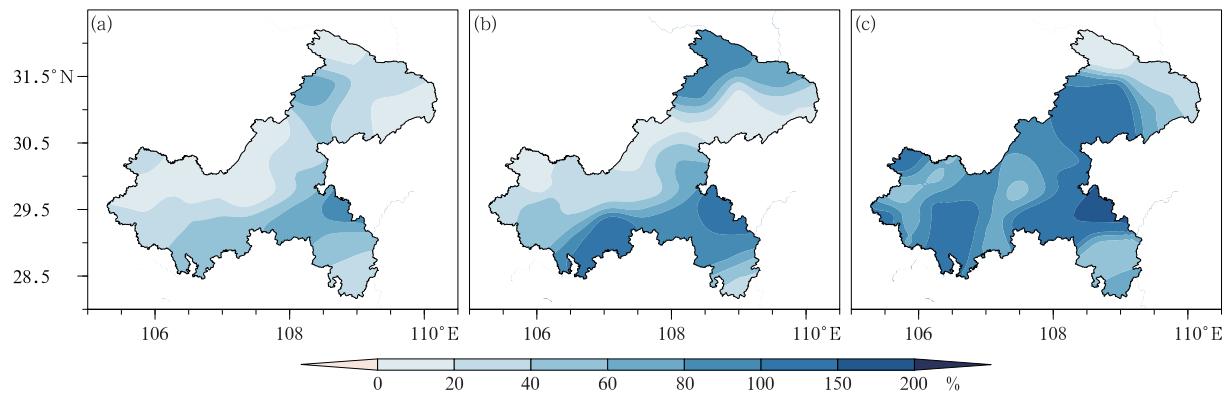


图2 2020年重庆(a)夏季(6—8月),(b)6月,(c)7月降水距平百分率空间分布

Fig. 2 Distribution of precipitation anomaly percentage in Chongqing in
(a) summer (June—August), (b) June and (c) July 2020

主要原因。首先对影响重庆夏季降水异常偏多的关键环流系统进行梳理和分析。

分析重庆夏季降水与同期中高层高度场500 hPa(图3a)和300 hPa(图3b)的相关可知,重庆夏季降水的偏多(偏少)年,中高层大气环流呈现较为一致的环流特征,主要表现在:欧亚从高纬到低纬地区为“+—+(—+)”高度距平分布,表现出乌拉尔山

附近及以东地区阻塞高压(以下简称乌山阻高)发展,中纬度 $30^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 地区低值系统活跃(不活跃),低纬度地区西太副高偏强(偏弱)和印度低压偏弱(偏强)的特点。

根据上面的分析,提取高度场上影响重庆夏季降水的主要大气环流系统所在区域距平指数,即西太副高指数: $15^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$;印度低压指

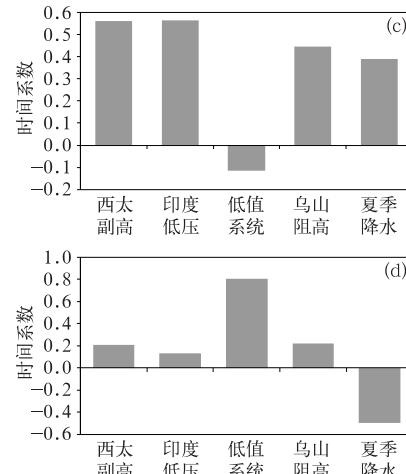
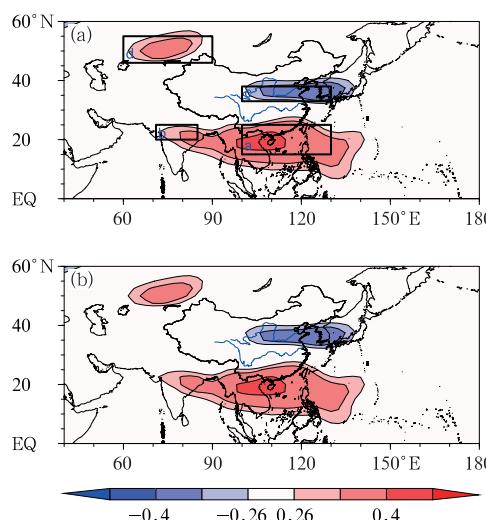


图3 重庆夏季降水与同期(a)500 hPa 和(b)300 hPa 高度场的相关
(填色区通过了0.10以上显著性水平检验)和(c,d)关键区环流系统指数与
重庆夏季降水的多变量经验正交分解:(c)第一模态,(d)第二模态

Fig. 3 The correlation between Chongqing summer precipitation and the height fields at
(a) 500 hPa and (b) 300 hPa during the same period (Shaded areas are
those having passed the significance test above 0.10 level), and
multivariate empirical orthogonal decomposition of the key area circulation
system index and the Chongqing summer precipitation for
(c) the first mode, (d) the second mode

数: $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}, 71^{\circ}\sim 85^{\circ}\text{E}$; 中纬度低值系统指数: $33^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$; 乌山阻高指数: $46^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}, 60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$ 。将各指数与重庆夏季降水量进行标准化处理后进行多变量的经验正交分解分析。分解后第一、二模态累积方差贡献可约占总方差的 76%, 可体现出最能影响降水的几种大尺度环流型配置。即当重庆夏季降水偏多时, 第一型大气环流配置为乌拉尔山地区有阻高发展, 中纬度地区有气旋等低值系统发展或活跃, 印度低压偏弱和西太副高偏强(图 3c); 第二型大气环流配置为乌拉尔山地区无阻高发展, 但中纬度地区气旋等低值系统发展或活跃, 低纬度地区印度低压略偏强和西太副高略偏弱(图 3d)。可见在影响重庆夏季降水的环流系统中, 相对最为重要和关键的因素是中纬度的低值系统的发展或活跃, 如果同时北部高纬度地区有阻高的影响, 南有西太副高的配合, 即北方有南下冷空气的影

响, 南有活跃的中纬度低值系统配合副高外围暖湿气流, 降水的动力和水汽条件均充足, 极易造成重庆夏季极端性降水或降水异常偏多的情形。

3.2 2020 年夏季和 6—7 月降水异常偏多的环流特征

通过分析影响重庆夏季降水异常的关键环流系统, 再看北半球 2020 年夏季大气环流系统。由图 4 可见, 2020 年夏季 6—7 月(图 4a~4c), 欧亚地区大气环流高低纬度呈“十一”环流型分布, 环流的经向度明显。影响重庆的主要环流系统从北到南依次为: ①乌拉尔山附近和鄂霍次克海至堪察加半岛阻高异常偏强, 表现为新地岛以南乌拉尔山附近高压脊发展, 正距平中心最大值达 62 dagpm, 鄂霍次克海至堪察加半岛阻高中心最大值在 40 dagpm 以上; ②中纬度低值系统活跃, 表现为巴尔喀什湖以西以南

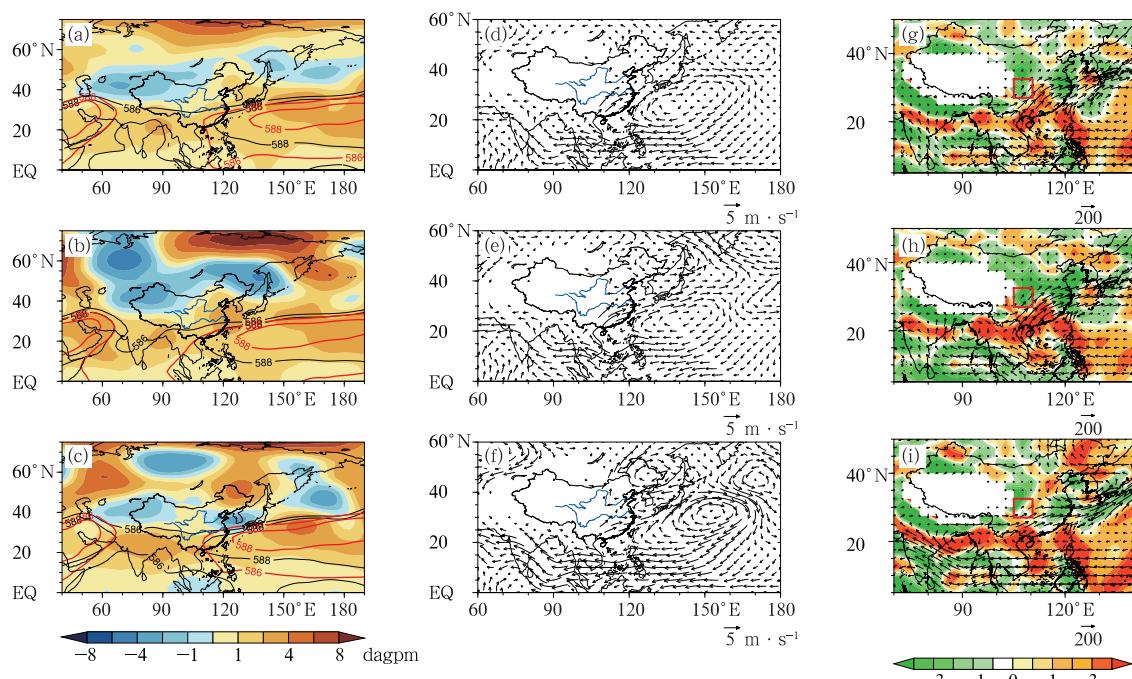


图 4 2020 年 6—7 月(a,d,g)及 6 月(b,e,h)和 7 月(c,f,i)大气环流场

(a~c) 500 hPa 位势高度(等值线, 单位: dagpm)及距平场(填色)

(黑色等值线为实况值, 红色等值线为气候值), (d~f) 850 hPa 距平场(风矢),

(g~i) 对流层整层(1000~30 hPa)积分水汽通量(矢量, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

及水汽通量散度距平场(填色, 单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 4 General circulation of June–July (a, d, g), June (b, e, h) and July (c, f, i) in 2020

(a~c) 500 hPa geopotential height (contour) and anomalies (colored; black contour; observation, red contour: climatic value, unit: dagpm); (d~f) wind anomalies at 850 hPa (vector); (g~i) vertically integrated anomalous water vapor transport fluxes at 1000–30 hPa (vector, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and their divergence (colored, unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

至贝加尔湖以南及我国黄河流域,为大范围的负距平区,中心最大负距平值达50 gpm以上;③印度低压偏弱,表现为该地区最大值为40 gpm以上的正距平区;④西太副高异常偏强,表现在西太副高区域内为大范围显著的正距平控制,正距平中心最大值达40 gpm以上。同时,西太副高面积偏大、西伸脊点异常偏西,脊线位置偏南(图5),可以说2020年的夏季环流场表现出典型的重庆夏季降水异常偏多的环流型,即出现了前文分析的重庆夏季典型多雨年的第一型环流(图3c)的配置。在这种环流型配置下,5880 gpm外围的5860 gpm等值线正好压在重庆长江沿线偏南地区,十分有利于来自西太平洋地区及我国南海地区的水汽沿着副高外围输送到重庆地区,对重庆偏南地区尤为明显,再配合中高纬度乌山阻高(主要影响在7月)和鄂霍次克海阻高(主要影响在6月)的发展,使贝加尔湖地区低压槽长时问维持,其底部冷空气南下,中纬度北风分支往南输送的冷空气与低纬度副高外围的西南暖湿气流易在长江沿线汇合,利于重庆出现降水极端或异常偏多。

同时,在对流层低层850 hPa高度场,6—7月菲律宾附近地区异常反气旋发展明显(图4d~4f),在低纬度地区,来自西太平洋的转向西南暖湿气流明显偏强,从我国南海一直输送到长江及其中下游地区。在中高纬度地区,6月东北地区有明显的气旋活动,即说明东北低涡异常活跃,其外围不断有西北风向南往长江流域输送,7月虽然东北低涡减弱,转为反气旋性环流,但其东部外围有东风转为东北

风向南往长江流域输送。低纬度向北输送的西南暖湿气流与中高纬度向南输送的冷空气的交汇位置正好在长江流域,且包括了重庆地区,使该地区6—7月强降水频发,造成降水的异常偏多。从整层积分的水汽输送及辐合辐散距平场(图4g~4i)上可以看出,夏季6—7月有两条水汽输送到重庆上空地区,一支是西太副高外围的西南方向的水汽输送,另一支是来自印度洋的自西向东输送的水汽,这两支水汽在我国西南地区西南部上空汇合后向长江流域输送,重庆尤其是重庆的偏南地区正好位于水汽强辐合中心区内,非常有利于降水的生成。

4 海温异常对2020年夏季重庆降水异常的影响及其机理分析

4.1 太平洋和印度洋海温的影响

4.1.1 太平洋海温影响分析

气候预测能力提升的关键是对影响因子及机理的深入认识,而李建平等(2011)、张舰齐等(2019)、鄢凤玉等(2021)的研究认为,海陆气相互作用是造成短期气候变化的根本原因。气候预测业务的实践也证明,在全球气候异常中海洋的作用异常重大,这在王绍武(2001)和陈丽娟等(2013)、任宏利等(2020)的海气相互作用研究进展和气候模式发展研究工作中得到验证。下面从太平洋和印度洋海温的异常,分析其对重庆2020年夏季降水的影响。

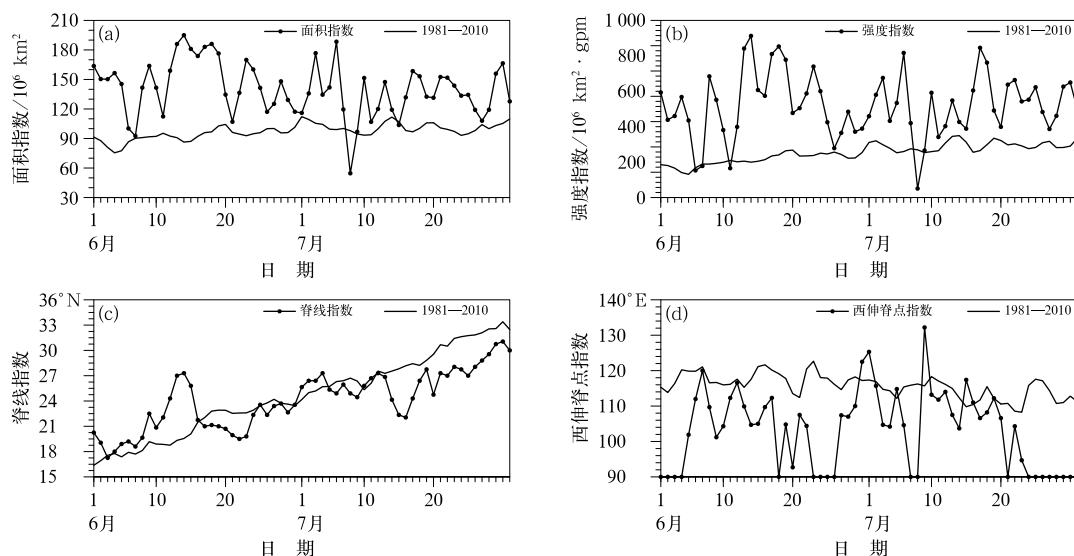


图5 2020年6—7月西太副高(a)面积,(b)强度,(c)脊线和(d)西伸脊点指数逐日时间演变

Fig. 5 Daily variations of (a) area, (b) intensity, (c) ridge line and (d) west extension ridge point of WPSH in June–July 2020

2019 年 11 月至 2020 年 4 月,赤道中东太平洋连续 5 个月以上 Niño3.4 指数的滑动平均值在 0.5°C 以上,根据厄尔尼诺/拉尼娜事件的国家判识标准,为一次弱厄尔尼诺事件(国家气候中心,2017)。分析重庆夏季降水与同期夏季、前一年冬季及前期春季热带太平洋地区海温的相关可知(图略),夏季同期的海温场与重庆市夏季降水只在 Niño3 区的赤道东太平洋小范围地区呈显著正相关;而前期的海温场对重庆夏季降水显现出更强的指示意义。相关分析和前期的研究(程炳岩,2012)均显示,前一年冬季在热带太平洋厄尔尼诺监测海域 Niño3 区海温与重庆夏季降水存在显著正相关;前期春季东太平洋地区海域同样也表现出与夏季降水的显著正相关,但在相关显著性程度和范围方面相对冬季海温要弱。可见重庆夏季降水对热带太平洋地区海温异常的响应至少要滞后 3~6 个月,并以滞后 6 个月(前一年冬季)的关系最为显著。由此表明,当厄尔尼诺事件发生并在冬季维持时,赤道东太平洋地区海温偏高,重庆夏季降水将偏多,这种关系对夏季气候趋势预测有一定的参考价值。2019—2020 年冬春季发生的厄尔尼诺事件对 2020 年重庆降水的异常偏多起到了积极的作用。

进一步采用 Huang et al(1996) 和 Livezey et al (2007) 介绍的 OCN 方法,计算分析重庆夏季降水本身的气候变率和 ENSO 暖事件对夏季降水的综合影响,发现 2020 年春末结束的弱中部型厄尔尼诺事件,对重庆夏季降水的具体影响表现为重庆东南部附近的降水偏多区域明显向东南部扩展(图 6a)。从确定性概率看(图 6b),ENSO 暖事件发生时,重庆大部地区降水偏多的确定性概率增加,大部地区降水偏多的概率在 66% 以上,尤其是东南部地区增加明显,降水偏多的概率达到 83%~100%,表明重庆偏南地区对此次厄尔尼诺事件反应更敏感。

所以从多种分析结果看,2019—2020 年冬春季厄尔尼诺事件的发生,重庆大部地区降水偏多的确定性概率有所增加,尤其是重庆东南部地区对此次厄尔尼诺事件反应更敏感。可以更明确地说明前期冬春季厄尔尼诺的事件发生,对 2020 年重庆降水的异常偏多,尤其是对重庆偏南地区的异常降水起到了积极的作用,是影响重庆夏季降水的重要外强迫信号。

4.1.2 印度洋海温的影响

热带印度洋偶极子的定义是指热带印度洋西部

和东部的海温距平差,即 TIOD 指数。该指数在正或负位相时,热带印度洋海温呈现西高东低或西低东高的空间分布模态。这种分布特征存在明显的季节特征,一般夏季发展,秋季达峰值,冬季则快速衰减(李维京,2012)。

通过分析重庆夏季降水与前期和同期 TIOD 指数的相关可知,前一年秋季 TIOD 指数与重庆夏季降水的关系尤其密切,二者相关系数达到 0.40,通过了 0.05 的显著性水平检验(表 1)。分析重庆夏季降水与前期、同期不同月份 TIOD 指数的相关显示(图 7b),对于重庆夏季降水,前一年秋季 TIOD 指数的关系较同期更为显著,通过了 0.10 的显著性水平检验,关系最为密切的是前一年秋季 11 月,二者间 0.54 的相关系数通过了 0.05 的显著性水平检验。

表 1 重庆夏季降水与前期、同期不同季节 TIOD 指数的相关

Table 1 Correlation between summer precipitation and TIOD in Chongqing in early and same periods

前一年 TIOD 与重庆夏季 降水的相关系数		同年 TIOD 与重庆 夏季降水的相关系数	
秋季	冬季	春季	夏季
0.40*	0.36*	0.04	0.00

注: * 表示通过 0.05 显著性水平检验。

Note: * refers to those having passed the significance test at 0.05 level.

从空间相关系数的分布特征看,重庆 34 个气象台站夏季降水与前一年秋季(图 7c)和 11 月(图 7d) TIOD 指数的空间相关除重庆少部分地区外,多地相关系数在 0.30 以上,相关关系较为显著;而重庆夏季降水与前一年 11 月 TIOD 指数的相关更加密切,高相关区位于重庆西部和偏南地区,最高相关系数可达 0.8 及以上(图 7d),通过了 0.05 的显著性水平检验。

分析 1961—2020 年资料,热带印度洋海温 TIOD 指数异常偏高最为突出的年份是 1997 年的秋季,其 TIOD 指数距平达到 1.87°C ,11 月峰值期曾达到 2.22°C ,第二年夏季 1998 年重庆出现有观测记录以来最多的降水。2019 年秋季 TIOD 指数距平也异常偏高,其中秋季达到 1.99°C ;秋季 11 月峰值期达到 2.36°C ,比 1997 年还高出 0.14°C ,偏高幅度超过了 1997 年秋季(表 2),为 1961 年以来历史最强。从相关分析和数据统计分析得出的结论均说明,赤道印度洋海温的异常偏高是继 ENSO 暖位相事件外的又一重要影响因子,助推了 2020 年重庆夏季降水的异常偏多,是另一重要外强迫因子和预测的前兆信号。

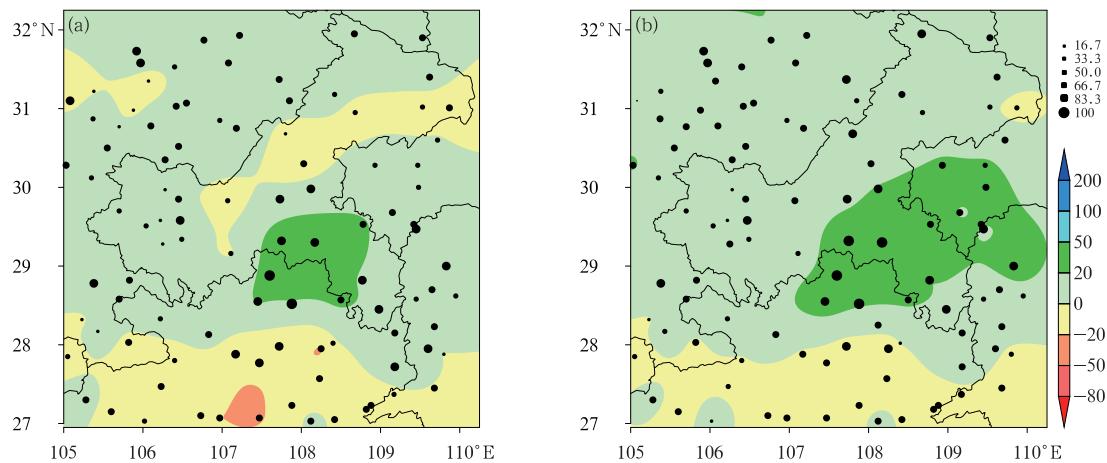


图 6 (a)气候变率和 ENSO 暖事件共同影响和(b)ENSO 暖事件独立影响下重庆夏季降水的确定性概率
(填色为降水距平百分率,实心点为概率值,单位:%)

Fig. 6 Deterministic probability analysis of summer precipitation in Chongqing (a) under the joint influence of climate variability and ENSO warm events and

(b) independent influence of ENSO warm events

(colored: precipitation anomaly percentage, solid dot: probability value, unit: %)

表 2 2019 年秋季和 1997 年秋季 TIOD 指数
距平对比(单位:℃)

Table 2 Comparison of TIOD index anomalies
in autumn 2019 and 1997 (unit: °C)

时段	秋季	9月	10月	11月
1997 年	1.87	1.28	2.12	2.22
2019 年	1.99	1.30	2.32	2.36

4.2 ENSO 暖事件及印度洋偶极子异常影响重庆夏季降水的机理分析

4.2.1 ENSO 暖事件的影响机理分析

瞿盘茂(2003)、袁媛等(2017)研究认为,厄尔尼诺年的夏季,由于赤道东太平洋海温升高和哈得来环流的发展,西太副高强度增强,但其对厄尔尼诺的响应一般要落后3~6个月,且通常情况下出现厄尔尼诺的次年这种关系更为明显。Wang et al(2000), Gao et al(2014)和Zhang et al(2016)研究也认为,ENSO暖事件对中国夏季降水的影响原因与东亚夏季风的减弱有关,在夏季风弱的年份,季风雨带位置偏南,易造成包括重庆在内的长江流域及其以南地区夏季降水的偏多。其中最主要的机理是当赤道中东太平洋海温异常偏高时,大气环流场上赤道东太平洋两侧温度异常升高,并通过罗斯贝波的响应,在日界线以东形成新的西风环流,使沃克环流减弱(瞿盘茂,2003)。同时在日界以西的菲律宾附近低层通常有异常反气旋性环流发展,可加强西北太平洋和

南海地区上空向北输送的分量,给中国南方带去了充沛的水汽,再加上东亚夏季风的偏弱,使北上暖湿气流势力减弱,从而季风雨带位置偏南,长江流域易多雨。

2019/2020发生的ENSO暖事件,在大气环流场上表现出沃克环流减弱和哈得来环流加强。从2020年夏季及6—7月沃克环流(图8)可以看出,夏季6—7月赤道中太平西太平洋地区120°E以西为较强的上升气流,在其西侧为弱的下沉气流(图8a),这种情形在6月(图8b)和7月(图8c)表现更为明显;在夏季6—7月10°~22°N区域经向环流场上(图8d),90°~120°E地区总体表现为强烈的下沉气流,且在6月(图8e)和7月(图8f)该下沉气流更加显著。可以证实在2019冬季至2020春季赤道太平西太平洋海温异常偏暖发生的ENSO暖事件影响下,2020年夏季,尤其在6—7月大气环流场上,表现出沃克环流减弱和中低纬度哈得来环流加强。受其影响,西太平副热带地区下沉气流加强,使西太副高加强西伸,强度偏强,其外围不断有西太平水汽的输送,造成重庆地区6—7月降水的异常偏多。

4.2.2 前期印度洋偶极子影响机理分析

研究表明,印度洋偶极子状态的发生与西南地区的降水关系密切。刘宣飞和袁慧珍(2006a;2006b)认为其发生时中国西南部异常西南气流影响该地区降水。晏红明和肖子牛(2000)和肖子牛等

(2002)的研究认为,印度洋偶极子正位相对中国南方降水的增强有一定作用。另有研究认为印度洋偶极子偏强次年长江流域降水会偏多(贾小龙和李崇银,2005)。Li and Mu(2001)的研究认为,500 hPa 位势高度场与 TIOD 指数相关系数的分布在中纬度($25^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$)地区为负相关区,且 TIOD 指数超前 5

个月时仍有这种相关关系。即说明前期 TIOD 指数是通过影响大气环流影响我国西南等地的夏季降水的。通过分析夏季 500 hPa 和 300 hPa 高度场与前一年 11 月 TIOD 指数的相关发现,当前一年 11 月 TIOD 指数为正位相时,次年夏季高度场从高纬度到低纬度易出现“十一+”的相关分布,反映出夏季

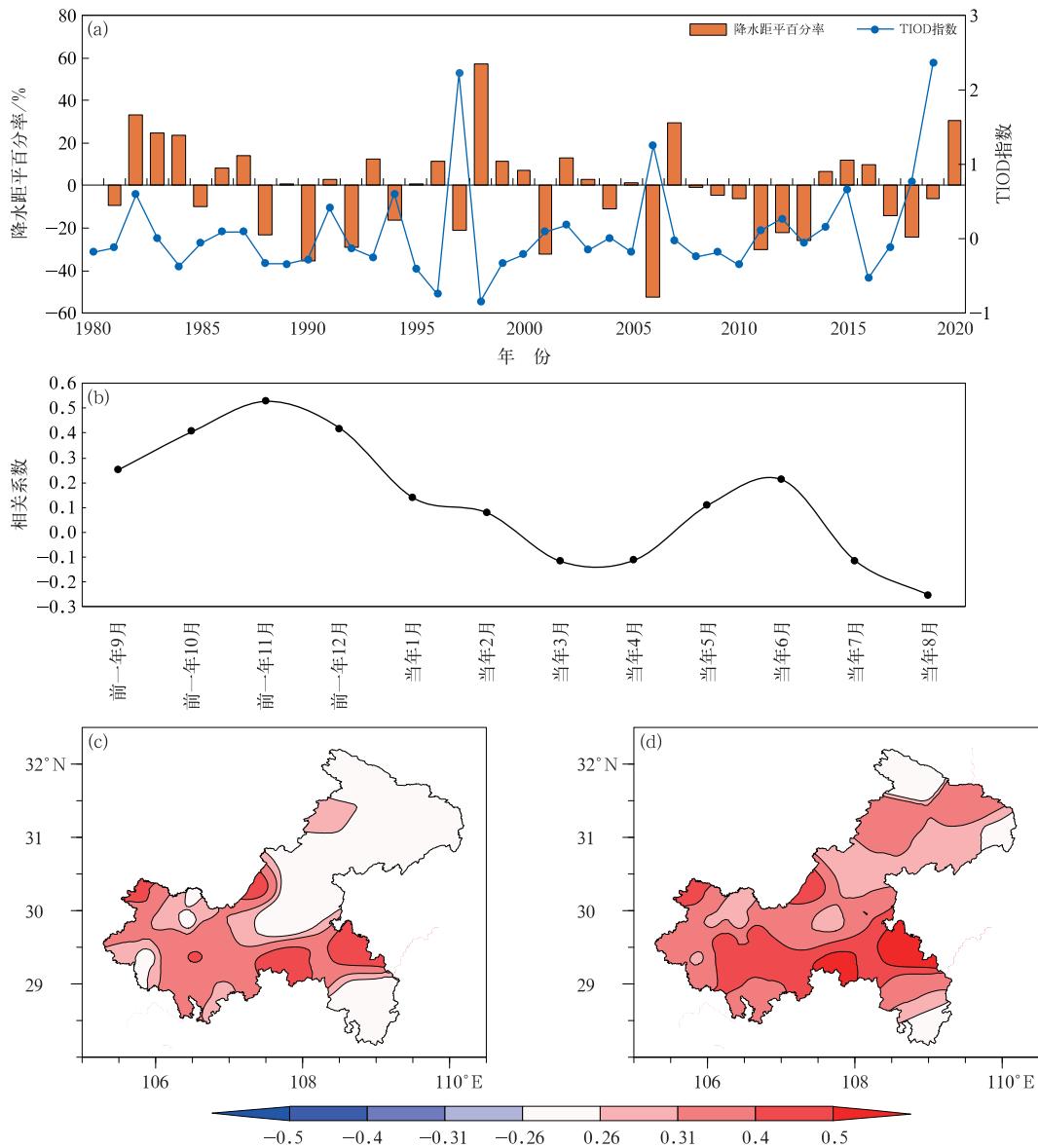


图 7 1981—2020 年(a)前一年 11 月 TIOD 指数与重庆夏季降水距平百分率变化,
(b) TIOD 指数与重庆夏季降水在前期和同期逐月的相关,以及(c)前一年秋季和
(d)前一年 11 月 TIOD 指数与重庆夏季降水的空间相关(填色区为通过 0.10 显著性水平检验)

Fig. 7 (a) Annual variation of TIOD in November of the previous year and Chongqing summer precipitation anomaly percentage, (b) the correlation between TIOD and Chongqing summer precipitation in the previous period and the same period, spatial correlation (c) between TIOD in the autumn of the previous year and Chongqing summer precipitation and (d) between TIOD in the November of the previous year and Chongqing summer precipitation from 1981 to 2020
(Shaded areas have passed the significance test at 0.10 level)

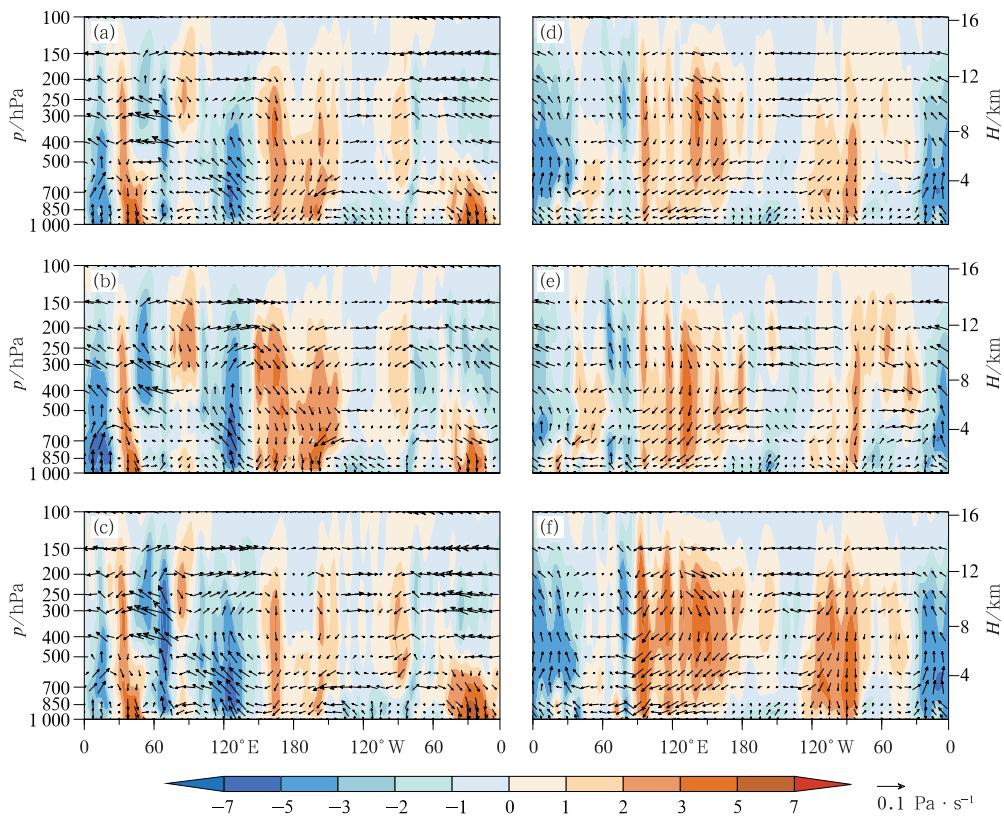


图8 2020年夏季(a,d)6—7月,(b,e)6月及(c,f)7月(a~c)沃克环流
和(d~f)纬度 10° ~ 22° N区域经向环流剖面

Fig. 8 Cross-sections of (a–c) Walker circulation and (d–f) 10° – 22° N regional meridional circulation in (a, d) June–July, (b, e) June, and (c, f) July in summer 2020

环流场从高到低均表现出乌山阻高明显(不明显)、中纬度多(少)低值系统,副高偏强(弱)、位置偏南(北)的特征,这种特征与重庆夏季降水异常偏多年环流型一致。说明前一年秋季热带印度海温的偶极型分布与这种大气环流型密切关联,且这种关系超前7个月也仍然存在,2020年这种关系同样存在,并与作者前期的研究结果也较为吻合(唐红玉等,2020)。2020年夏季,尤其是夏季6—7月,除了副高的西伸偏强、位置偏南外,中低纬度不断有低值系统的配合,从而造成了夏季降水的异常偏多。

通过合成分析前一年秋季 TIOD 指数显著正位相次年(1983、1998、2007、2016 和 2020 年)夏季 850 hPa 风场距平(图 9),可见热带印度洋地区存在东北风或东风异常,其上空向北输送的水汽偏弱。但菲律宾附近地区西太平洋为有异常反气旋环流发展,更利于西太副高加强西伸及其位置偏南,其外围有强盛的西南气流,中高纬度异常偏北气流与持续来自西太平洋经南海的西南向水汽在重庆上空交汇,非常利于降水的生成。2021 年夏季尤其是 6—7

月,欧亚 850 hPa 风场距平场上正是出现了这种典型的风场环流(图 4d),强盛的西南气流和西太平洋地区充沛的水汽供应,是造成重庆市夏季降水异常偏多的必要条件。

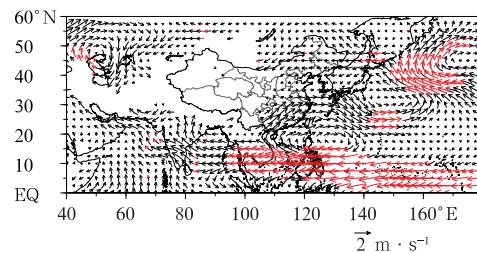


图9 前一年秋季 TIOD 指数显著正位相次年
(1983、1998、2007、2016 和 2020 年)

夏季 850 hPa 风场距平合成
(标红区域通过 0.10 显著性水平检验)

Fig. 9 Wind anomaly synthesis at 850 hPa in summers of 1983, 1998, 2007, 2016 and 2020 with significant positive TIOD phase in the fall of the previous year
(Red marked areas have passed the significance test at 0.10 level)

4.2.3 ENSO 暖事件与印度洋偶极子共同影响机理分析

分析发现,在重庆夏季降水异常偏多的年份(如 1998、2007 和 2016 年),前一年秋季 TIOD 指数偏强时,同时有厄尔尼诺事件发生。Li and Mu(2001)的研究认为,ENSO 和热带印度洋偶极子通过赤道大气纬向垂直环流异常联系,使得两事件密切关联且相互维持。研究还认为当前期两正位相事件同时发生时,西太平洋暖池地区有加强的下沉运动,而这种运动可能延迟到夏季(李琰等,2007)。对于 2020 年夏季,前期 2019 年 11 月至 2020 年 4 月出现的 ENSO 暖事件和 2019 年秋季 TIOD 指数出现的异常正位相,其影响过程与机理与上述研究结论一致。即 ENSO 暖事件和前期热带印度洋偶极子异常正位相同时发生时,二者密切关联且相互维持,它们的作用相互叠加,使得西太平洋地区菲律宾反气旋异常偏强,西太副高加强西伸、位置偏南,同时受乌山阻高和鄂霍次克海附近的阻高影响,北方冷空气易南下并长时间维持,东亚至北太平洋中纬度地区($30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$)有异常的低值系统发展,从而造成重庆极端异常偏多的降水。

5 结论与讨论

综合以上分析,得到以下结论:

(1)2020 年夏季全市平均降水量为 667.1 mm,较常年同期显著偏多 3 成,为 1951 年以来历史同期第三多,6—7 月以前降水异常偏多,为 1961 年以来同期最多。

(2)2020 年夏季尤其是夏季 6—7 月,欧亚地区大气环流高低纬度“十一+”环流型分布,环流的经向度明显,影响重庆的主要环流系统的从北到南依次为:乌山阻高和鄂霍次克海附近阻高异常偏强,中纬度低值系统活跃,印度低压偏弱,西太副高异常偏强。即夏季环流场出现了重庆夏季降水偏多的典型环流型配置,造成夏季降水的异常偏多。

(3)2019—2020 冬春季 ENSO 暖事件的发生,对 2020 年重庆降水的异常偏多起到了积极的作用,重庆大部地区降水偏多的确定性概率增加,尤其是东南部地区对此次厄尔尼诺事件反应更敏感。2019 年秋季及 11 月赤道印度洋海温异常偏高,TIOD 指数的异常为 1961 年以来历史最强,是 ENSO 暖位相事件外的又一重要影响因子,助推了 2020 年重庆

夏季降水的极端异常偏多。

(4)2020 年夏季赤道太平洋 ENSO 暖事件和前期赤道印度洋偶极子事件同时发生,二者之间有密切关联且相互维持,它们的作用相互叠加,使得西太平洋地区菲律宾反气旋异常偏强,西太副高加强西伸、位置偏南,同时受乌山阻高和鄂霍次克海附近阻高影响下北方冷空气易南下并长时间维持,东亚至北太平洋中纬度地区($30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$)有异常的低值系统发展,从而造成重庆极端异常偏多的降水。在重庆夏季降水预测的工作中,在分析热带海洋对本地夏季降水的影响时,应同时考虑热带太平洋和印度洋的共同作用。

对于重庆 2020 年夏季降水,本文分析了造成降水异常偏多的大气环流及海洋外强迫信号。但影响气候的因素纷繁多样,可能还受到海洋以外其他外强迫信号的影响,多种因子的影响过程和机理更加复杂和多变,还需要在今后的工作中不断进行分析和研究,以期为提高气候预测准确率提供更加科学和全面的参考依据。

参考文献

- 鲍名,黄荣辉,2006.近 40 年我国暴雨的年代际变化特征[J].大气科学,30(6):1057-1067. Bao M, Huang R H, 2006. Characteristics of the interdecadal variations of heavy rain over China in the last 40 years[J]. Chin J Atmos Sci, 30(6):1057-1067(in Chinese).
- 布和朝鲁,林大伟,齐道日娜,等,2022.亚洲中高纬环流春夏季节转换过程的关键特征[J].大气科学,46(1):151-167. Bueh C, Lin D W, Chyi D, et al, 2022. Key circulation characteristics of spring-to-summer seasonal transition process over mid- and high-latitude Asia[J]. Chin J Atmos Sci, 46(1):151-167(in Chinese).
- 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. Chen L J, Gu W, Ding T, et al, 2016. Overview of the precursory signals of seasonal climate prediction in summer 2015[J]. Meteor Mon, 42(4):496-506(in Chinese).
- 陈丽娟,袁媛,杨明珠,等,2013.海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展[J].应用气象学报,24(5):521-532. Chen L J, Yuan Y, Yang M Z, et al, 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTAs impact on EASM[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5):521-532(in Chinese).
- 程炳岩,2012.重庆市气候业务技术手册[M].北京:气象出版社:101-148. Cheng B Y, 2010. Chongqing Climate Business Technical Manual[M]. Beijing: China Meteorological Press:101-148(in Chinese).
- 丁一汇,任国玉,石广玉,等,2006.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展,2(1):3-8.

- Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, et al, 2006. National assessment report of climate change (I): climate change in China and its future trend[J]. *Adv Clim Change Res.*, 2(1): 3-8(in Chinese).
- 封国林,杨涵洧,张世轩,等,2012.2011年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探[J].*大气科学*,36(5):1006-1026.
- Feng G L, Yang H W, Zhang S X, et al, 2012. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011[J]. *Chin J Atmos Sci.*, 36(5): 1006-1026(in Chinese).
- 高荣,宋连春,钟海玲,2018.2016年汛期中国降水极端特征及与1998年对比[J].*气象*,44(5):699-703.
- Gao R, Song L C, Zhong H L, 2018. Characteristics of extreme precipitation in China during the 2016 flood season and comparison with the 1998 situation[J]. *Meteor Mon.*, 44(5): 699-703(in Chinese).
- 顾薇,陈丽娟,2019.2018年夏季海洋大气特征及对我国气候的影响[J].*气象*,45(1):126-134.
- Gu W, Chen L J, 2019. Characteristics of atmospheric and oceanic condition and their influences on summer climate of China in 2018[J]. *Meteor Mon.*, 45(1): 126-134(in Chinese).
- 国家气候中心,2017.厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法(GB/T 33666-2017)[S].北京:中华人民共和国标准化管理委员会. National Climate Center, 2017. El Niño/La Niña Incident Identification Method (GB/T 33666-2017) [S]. Beijing: Standardization Administration Commission, PRC(in Chinese).
- 胡泊,申红艳,王晓娟,等,2018.东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水特征及环流型的异同性研究[J].*大气科学*,42(1):109-123.
- Hu P, Shen H Y, Wang X J, et al, 2018. A study on characteristics of precipitation and circulation pattern in early summer, midsummer and conventional summer in Northeast Asia[J]. *Chin J Atmos Sci.*, 42(1): 109-123(in Chinese).
- 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.
- Jia X L, Li C Y, 2005. Dipole oscillation in the Southern Indian Ocean and its impacts on climate[J]. *Chin J Geophys.*, 48(6): 1238-1249(in Chinese).
- 蒋薇,刘芸芸,陈鹏,等,2021.利用深度神经网络和先兆信号的江苏夏季降水客观预测方法[J].*气象学报*,79(6):1035-1048.
- Jiang W, Liu Y Y, Chen P, et al, 2021. Prediction of summer precipitation in Jiangsu Province based on precursory factors: a deep neural network approach[J]. *Acta Meteor Sin.*, 79(6): 1035-1048(in Chinese).
- 鞠笑生,1993.1954年、1991年长江流域洪涝对比[J].*灾害学*,8(2):68-73.
- Ju X S, 1993. Comparison of flood and waterlogging in the Yangtze River reaches between 1954 and 1991[J]. *J Catastrophol.*, 8(2): 68-73(in Chinese).
- 李春晖,潘蔚娟,李霞,等,2017.华南春季降水及其季节内振荡强度的年代际变化特征[J].*高原气象*,36(2):491-500.
- Li C H, Pan W J, Li X, et al, 2017. Interdecadal variation characteristics of spring rainfall and its intraseasonal oscillation intensity in South China[J]. *Plateau Meteor.*, 36(2): 491-500(in Chinese).
- 李建平,吴国雄,胡敦欣,2011.亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响[M].北京:气象出版社:4-5.
- Li J P, Wu G X, Hu D X, 2011. *Air Sea Interaction in Asia India Pacific Intersection and Its Impact on China's Short-Term Climate*[M]. Beijing: China Meteorological Press; 4-5(in Chinese).
- 李维京,1999.1998年大气环流异常及其对中国气候异常的影响[J].*气象*,25(4):20-25.
- Li W J, 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China[J]. *Meteor Mon.*, 25(4): 20-25(in Chinese).
- 李维京,2012.现代气候业务[M].北京:气象出版社:138-140.
- Li W J, 2012. *Modern Climate Business*[M]. Beijing: China Meteorological Press: 138-140(in Chinese).
- 李琰,王亚非,魏东,2007.前期热带太平洋、印度洋海温异常对长江流域及以南地区6月降水的影响[J].*气象学报*,65(3):393-405.
- Li Y, Wang Y F, Wei D, 2007. Effects of anomalous SST in tropical Indian Ocean and Pacific Ocean on next June rainfall over the Yangtze River Basin and area south of the basin[J]. *Acta Meteor Sin.*, 65(3): 393-405(in Chinese).
- 李永华,卢楚翰,徐海明,等,2011.夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系[J].*大气科学*,35(3):422-434.
- Li Y H, Lu C H, Xu H M, et al, 2011. Contemporaneous relationships between summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and drought/flood in eastern southwest China[J]. *Chin J Atmos Sci.*, 35(3): 422-434(in Chinese).
- 刘德,李永华,何卷雄,2003.重庆市夏季气温及降水变化的小波分析[J].*高原气象*,22(2):173-178.
- Liu D, Li Y H, He J X, 2003. Wavelet analysis of variations of summer temperature and precipitation in Chongqing[J]. *Plateau Meteor.*, 22(2): 173-178(in Chinese).
- 刘宣飞,袁慧珍,2006a.印度洋偶极子与中国秋季降水的关系[J].*南京气象学院学报*,29(5):644-649.
- Liu X F, Yuan H Z, 2006a. Relationship between the Indian Ocean Dipole and autumn rainfall in China[J]. *J Nanjing Inst Meteor.*, 29(5): 644-649(in Chinese).
- 刘宣飞,袁慧珍,2006b. ENSO对印度洋偶极子与中国秋季降水关系的影响[J].*南京气象学院学报*,29(6):762-768.
- Liu X F, Yuan H Z, 2006b. Effects of ENSO on the relationship between IOD and autumn rainfall in China[J]. *J Nanjing Inst Meteor.*, 29(6): 762-768(in Chinese).
- 刘芸芸,李维京,艾锐秀,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.
- Liu Y Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Reconstruction and application of the monthly western Pacific subtropical high indices[J]. *J Appl Meteor Sci.*, 23(4): 414-423(in Chinese).
- 庞轶舒,周斌,祝从文,等,2021.西南夏季降水多因子降维客观预测方法研究[J].*大气科学*,45(3):471-486.
- Pang Y S, Zhou B, Zhu C W, et al, 2021. Multifactor descending dimension method of objective forecast for summer precipitation in southwest China[J]. *Chin J Atmos Sci.*, 45(3): 471-486(in Chinese).
- 任国玉,封国林,严中伟,2010.中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J].*气候与环境研究*,15(4):337-353.
- Ren G Y, Feng G L, Yan Z W, 2010. Progresses in observation studies of climate ex-

- tremes and changes in mainland China[J]. Climatic Environ Res, 15(4):337-353(in Chinese).
- 任宏利, 郑飞, 罗京佳, 等, 2020. 中国热带海-气相互作用与 ENSO 动力学及预测研究进展[J]. 气象学报, 78(3):351-369. Ren H L, Zheng F, Luo J J, et al, 2020. A review of research on tropical air-sea interaction, ENSO dynamics, and ENSO prediction in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):351-369(in Chinese).
- 施能, 2002. 气象场的奇异值分解(SVD)[M]//气象科研与预报中的多元分析方法. 北京: 气象出版社: 162. Shi N, 2002. Singular Value Decomposition of the Meteorological Field (SVD) [M]// Multivariate Analysis Method in Meteorological Research and Forecast. Beijing: China Meteorological Press: 162(in Chinese).
- 孙小婷, 李清泉, 王黎娟, 2017. 我国西南地区夏季长周期旱涝急转及其大气环流异常[J]. 大气科学, 41(6):1332-1342. Sun X T, Li Q Q, Wang L J, 2017. Characteristics of long-cycle abrupt drought-flood alternations in southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6):1332-1342(in Chinese).
- 唐红玉, 李锡福, 李栋梁, 2014. 青藏高原春季积雪多、少年中低层环流对比分析[J]. 高原气象, 33(5):1190-1196. Tang H Y, Li X F, Li D L, 2014. Contrast of circulation pattern related to more and less spring snow cover over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 33(5):1190-1196(in Chinese).
- 唐红玉, 吴遥, 董新宁, 等, 2019. 重庆 2017 年秋季降水异常成因分析[J]. 气象, 45(6):822-834. Tang H Y, Wu Y, Dong X N, et al, 2019. Analysis on causes of precipitation abnormality in autumn of 2017 in Chongqing[J]. Meteor Mon, 45(6):822-834(in Chinese).
- 唐红玉, 吴遥, 董新宁, 等, 2020. 赤道印度洋偶极子对重庆夏季降水的影响分析[J]. 海洋气象学报, 40(2):52-61. Tang H Y, Wu Y, Dong X N, et al, 2020. Impact analysis of equatorial Indian Ocean dipole on summer precipitation in Chongqing[J]. J Marine Meteor, 40(2):52-61(in Chinese).
- 陶诗言, 张庆云, 张顺利, 1998. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件[J]. 气候与环境研究, 3(4):290-299. Tao S Y, Zhang Q Y, Zhang S L, 1998. The great floods in the Changjiang River Valley in 1998[J]. Climatic Environ Res, 3(4):290-299(in Chinese).
- 王会军, 任宏利, 陈活泼, 等, 2020. 中国气候预测研究与业务发展的回顾[J]. 气象学报, 78(3):317-331. Wang H J, Ren H L, Chen H P, et al, 2020. Highlights of climate prediction study and operation in China over the past decades[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):317-331(in Chinese).
- 王绍武, 2001. 现代气候学研究进展[M]. 北京: 气象出版社: 304-326. Wang S W, 2001. Research Progress of Modern Climatology[M]. Beijing: China Meteorological Press: 304-326 (in Chinese).
- 魏凤英, 2007. 现代气候统计诊断与预测技术: 第 2 版[M]. 北京: 气象出版社: 160-169. Wei F Y, 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press: 160-169(in Chinese).
- 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. Xiao Z N, Yan H M, Li C Y, 2002. The relationship between Indian Ocean SST dipole index and the precipitation and temperature over China[J]. J Trop Meteor, 18(4):335-344(in Chinese).
- 鄢凤玉, 赵传湖, 孙即霖, 2021. 1470—2019 年中国东部旱涝年代际变化及其与太平洋海表温度的关系[J]. 气象学报, 79(2):196-208. Yan F Y, Zhao C H, Sun J L, 2021. Interdecadal variation of dryness/wetness in eastern China and its relationship with the Pacific sea surface temperature during 1470—2019[J]. Acta Meteor Sin, 79(2):196-208(in Chinese).
- 晏红明, 肖子牛, 2000. 印度洋海温异常对亚洲季风区天气气候影响的数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 16(1):18-27. Yan H M, Xiao Z N, 2000. The numerical simulation of the Indian Ocean SST influence on climatic variations over Asian monsoon region[J]. J Trop Meteor, 16(1):18-27(in Chinese).
- 杨涵洧, 龚志强, 王晓娟, 等, 2021. 中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析[J]. 大气科学, 45(3):683-696. Yang H W, Gong Z Q, Wang X J, et al, 2021. Analysis of the characteristics and causes of interdecadal changes in the summer extreme precipitation over eastern China[J]. Chin J Atmos Sci, 45(3):683-696(in Chinese).
- 杨玮, 徐敏, 周顺武, 等, 2017. 江淮流域 6—7 月极端强降水事件时空变化及环流异常[J]. 高原气象, 36(3):718-735. Yang W, Xu M, Zhou S W, et al, 2017. Spatial-temporal variation of extreme precipitation events from June to July over Yangtze-Huaihe River Basin and the circulation anomalies[J]. Plateau Meteor, 36(3):718-735(in Chinese).
- 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. Yuan Y, Gao H, Liu Y J, 2017. Analysis of the characteristics and causes of precipitation anomalies over eastern China in the summer of 2016[J]. Meteor Mon, 43(1):115-121(in Chinese).
- 翟盘茂, 2003. 厄尔尼诺[M]. 北京: 气象出版社: 102-105. Zhai P M, 2003. El Niño[M]. Beijing: China Meteorological Press: 102-105 (in Chinese).
- 翟盘茂, 李蕾, 周佰铨, 等, 2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J]. 应用气象学报, 27(5):631-640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al, 2016. Progress on mechanism and prediction methods for persistent extreme precipitation in the Yangtze-Huai River Valley[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):631-640 (in Chinese).
- 张舰齐, 叶成志, 陈静静, 等, 2019. 印度洋偶极子对中国南海夏季西南季风水汽输送的影响[J]. 大气科学, 43(1):49-63. Zhang J Q, Ye C Z, Cheng J J, et al, 2019. Influence of the Indian Ocean Dipole on water vapor transport from southwesterly monsoon over the South China Sea in the summer[J]. Chin J Atmos Sci, 43(1):49-63(in Chinese).
- 张天宇, 唐红玉, 雷婷, 等, 2014. 重庆夏季旱涝急转与大气环流异常的联系[J]. 云南大学学报(自然科学版), 36(1):79-87. Zhang T Y, Tang H Y, Lei T, et al, 2014. The relationship between summer

- drought-flood abrupt alternation in Chongqing and the anomalous of atmospheric circulation[J]. J Yunnan Univ (Nat Sci Ed),36(1):79-87(in Chinese).
- 赵俊虎,陈丽娟,章大全,2022.2021年夏季我国气候异常特征及成因分析[J].气象,48(1):107-121. Zhao J H,Chen L J,Zhang D Q,2022. Characteristics and causes for the climate anomalies over China in summer 2021[J]. Meteor Mon,48(1):107-121(in Chinese).
- 赵俊虎,张涵,左金清,等,2021.2020年江淮流域超强梅雨年际异常的驱动因子分析[J].大气科学,45(6):1433-1450. Zhao J H, Zhang H,Zuo J Q,et al,2021. What drives the super strong precipitation over the Yangtze-Huaihe River Basin in the Meiyu period of 2020[J]. Chin J Atmos Sci,45(6):1433-1450(in Chinese).
- 郑国光,2019.中国气候[M].北京:气象出版社:25-54. Zheng G G, 2019. Climate in China[M]. Beijing: China Meteorological Press: 25-54(in Chinese).
- 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. Zheng Z H,Wang Y G,2018. Northern Hemisphere atmospheric circulation characteristics in summer 2017 and its impact on weather and climate in China[J]. Meteor Mon,44(1):199-205(in Chinese).
- 周浩,唐红玉,程炳岩,2010.青藏高原冬春季积雪异常与西南地区夏季降水的关系[J].冰川冻土,32(6):1144-1151. Zhou H,Tang H Y,Cheng B Y,2010. Relation between the abnormal snow cover in winter and spring over the Tibetan Plateau and summer precipitation over the southwest China[J]. J Glaciol Geocryol, 32(6):1144-1151(in Chinese).
- Gao H,Jiang W,Li W J,2014. Changed relationships between the East Asian summer monsoon circulations and the summer rainfall in eastern China[J]. J Meteor Res,28(6):1075-1084.
- Huang J,van den Dool H M,Barnston A G,1996. Long-lead seasonal temperature prediction using optimal climate normals[J]. J Climate,9(4):809-817.
- Li C Y,Mu M Q,2001. The influence of the Indian Ocean Dipole on atmospheric circulation and climate[J]. Adv Atmos Sci,18(5): 831-843.
- Lin Z H,Wang H J,Zhou G Q,et al,2004. Recent advances in dynamical extra-seasonal to annual climate prediction at IAP/CAS [J]. Adv Atmos Sci,21(3):456-466.
- Livezey R E,Vinnikov K Y,Timofeyeva M M,et al,2007. Estimation and extrapolation of climate normals and climatic trends[J]. J Appl Meteor Climatol,46(11):1759-1776.
- Ren B H,Lu R Y,Xiao Z N,2004. A possible linkage in the interdecadal variability of rainfall over North China and the Sahel[J]. Adv Atmos Sci,21(5):699-707.
- Wang B,Wu R G,Fu X H,2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. J Climate,13 (9):1517-1536.
- Zhang W J,Li H Y,Suecker M F,et al,2016. A new understanding of El Niño's impact over East Asia: Dominance of the ENSO combination mode[J]. J Climate,29(12):4347-4359.

(本文责编:王蕾)