

方祥生,高辉,2024. 2024 年初夏江南异常多雨的环流背景及热带西印度洋破纪录暖海温的作用[J]. 气象,50(12):1441-1450.  
Fang X S,Gao H,2024. Circulation background of abnormal rainfall in the area south of Yangtze River in June 2024 and role of record-breaking warm SST in tropical Western Indian Ocean[J]. Meteor Mon,50(12):1441-1450(in Chinese).

## 2024 年初夏江南异常多雨的环流背景及 热带西印度洋破纪录暖海温的作用\*

方祥生<sup>1</sup> 高 辉<sup>2</sup>

1 安徽省黄山市气象局,黄山 245000

2 国家气候中心,北京 100081

**提 要:** 2024 年初夏我国东部季风区呈现明显的“北旱南涝”分布特征,其中江南降水量打破历史同期纪录,统计和个例分析均表明,偏强偏西的西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)西侧异常偏强的南风水汽输送起到了主要作用。但在 110°E 以西地区大气环流表现出与历史事件不同的特征。北非副热带高压(以下简称北非副高)东侧明显向东和向南伸展,并在热带印度洋南部与西伸的西太副高首次连通,形成一个“倒 $\Omega$ ”环流型。热带印度洋西部异常暖海温可能是江南初夏异常多雨的主要外强迫因子。2024 年 1—2 月西热带印度洋海温距平首次突破 1℃,下垫面的热力作用加热了对流层中下层大气,气柱受热膨胀使北非副高东侧的位势高度升高和北风分量增强,与西太副高西段在热带印度洋南部上空共同形成“倒 $\Omega$ ”环流型,并在赤道印度洋上空形成很强的气旋式距平环流,其东侧偏南风距平分量汇入孟加拉湾西南气流,向江南地区的水汽输送明显增多,从而导致江南异常多雨;历史资料的统计分析同样验证了这一结论。

**关键词:** 江南,厄尔尼诺,热带印度洋全区一致海温模态,西太副高,北非副高

**中图分类号:** P461

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.092301

### Circulation Background of Abnormal Rainfall in the Area South of Yangtze River in June 2024 and Role of Record-Breaking Warm SST in Tropical Western Indian Ocean

FANG Xiangsheng<sup>1</sup> GAO Hui<sup>2</sup>

1 Huangshan Meteorological Office of Anhui Province, Huangshan 245000

2 National Climate Centre, Beijing 100081

**Abstract:** In June 2024, rainfall in eastern China exhibited a distinct spatial distribution characterized by “droughts in northern China and floods in southern China”. Notably, the rainfall in the area south of Yangtze River exceeded the historic record since 1961. Both the results of the statistical analysis and the case study have demonstrated that the anomalous southerly moisture transport on the western side of the Western Pacific subtropical high (WPSH) played a significant function. However, the general circulation to the west of 110°E showed different characteristics from those in historical events. The eastern boundary of the North Africa high (NAH) exhibited a notable eastward and southward extension, connecting the western boundary of the WPSH over the southern tropical Indian Ocean. This resulted in the formation of an “inverted  $\Omega$ ” circulation pattern, a phenomenon that has never been observed previously. In addition to

\* 国家自然科学基金项目(42230612)资助

2024 年 7 月 15 日收稿; 2024 年 8 月 29 日收修定稿

第一作者:方祥生,主要从事极端天气气候预报预测研究. E-mail:hsfangxs@163.com

通讯作者:高辉,主要从事短期气候预测研究. E-mail:gaohui@cma.gov.cn

the El Niño, the record-breaking warm sea surface temperature (SST) in the western tropical Indian Ocean was another significant impact factor for the abnormal rainfall in the area south of the Yangtze River in early summer. From January to February 2024, the SST anomaly over the west part ( $20^{\circ}\text{S}$ – $20^{\circ}\text{N}$ ,  $40^{\circ}$ – $75^{\circ}\text{E}$ ) of tropical Indian Ocean, exceeded  $1^{\circ}\text{C}$  for the first time. The thermal effect of the underlying surface caused the rise in air temperature below 600 hPa over the domain. The thermal expansion of the air column led to an increase in geopotential height over the eastern boundary of the NAH, which in turn contributed to an intensification of the north wind component. It can be concluded that the formation of the “inverted  $\Omega$ ” circulation pattern was a result of the eastward extension of the NAH and westward extension of the WPSH, respectively. This resulted in the development of a strong cyclonic anomaly circulation over the equatorial Indian Ocean. The anomalous southerly wind components on its eastern side converged enhancing the transport of southwest moisture flow from the Bay of Bengal to the area south of Yangtze River, resulting in abnormal rainfall in the latter. Statistical analysis from historical observations have also verified this conclusion.

**Key words:** the area south of Yangtze River, El Niño, Indian Ocean Basin-Wide (IOBW), Western Pacific subtropical high (WPSH), North Africa high (NAH)

## 引 言

江南地区是我国初夏最易发生极端旱涝的地区。受东亚夏季风环流尤其是西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)季节内移动的影响,江南地区主汛期(江南梅雨)集中在每年的6月中下旬至7月上旬,造成江南初夏强降水发生时段集中、强度大、灾害重(丁一汇和张建云,2009;郑国光,2019)。以2017年初夏江南为例,仅湖南就有787.6万人受灾,42人死亡或失踪,直接经济损失达241.2亿元(国家气候中心,2017)。因此江南初夏强降水的变化特征、致灾机理和预测技术一直是气象工作者关注的科学问题。

研究表明,西太副高的西伸东退是江南南部初夏雨季发生发展的大气环流背景(苗长明等,2014),而低层急流位置是重要的动力条件。高层的南亚高压也会影响到江南初夏降水,且因其和西太副高相向而行可对降水产生协同影响(金爱浩等,2018;雷显辉等,2022)。水汽方面,青藏高原南侧水汽辐散区是影响江南南部初夏雨季的直接水汽源,澳大利亚北部至印度洋和阿拉伯海南部地区的大面积水汽辐散区则是间接水汽源,这其中经向水汽输送演变对江南雨季起讫具有标志性意义(苗长明等,2015)。除热带副热带环流因子外,高纬度大气环流或遥相关波列也会对江南降水产生影响,如东北冷涡(何金海等,2006)。

在诸多江南汛期旱涝外强迫信号中,ENSO(El Niño-Southern Oscillation)无疑是最主要因子之一。作为亚洲气候异常最主要的影响系统,ENSO及其与东亚夏季风环流的相互作用将直接导致夏季江南旱涝灾害的发生。Huang and Wu(1989)研究指出,在厄尔尼诺事件的发展(衰亡)阶段,江南地区降水量偏少(偏多)。此后大量的研究揭示了ENSO位相、强度、位置异常及演变对东亚夏季气候影响的复杂性及在江南旱涝气候预测中的应用(李维京,2012;丁一汇,2013;郑国光,2019)。陈文等(2018)全面回顾了不同类型ENSO及其气候影响的研究进展,特别是近年来两类ENSO事件对东亚夏季风和江南夏季降水影响和机理方面的多样性。近年来研究还表明,热带印度洋海温也会导致夏季风环流和江南夏季降水的异常(陈丽娟等,2013)。热带印度洋全区一致海温模态(IOBW)则是热带印度洋海温变化的最主要模态。已有研究指出,通过“大气桥”(Klein et al, 1999; Lau and Nath, 2000)或印度尼西亚贯穿流(Meyers, 1996)等机制,当赤道中东太平洋有厄尔尼诺(拉尼娜)事件发展时,在冬季至次年春季、夏季,热带印度洋海温往往表现为全区一致偏暖(偏冷),在该过程中印度洋起到一种信号储存的“电容器效应”(Yang et al, 2007; Xie et al, 2009)。当热带印度洋一致偏暖时,长江流域和江南北部夏季降水量易偏多(Hu et al, 2011)。近期的预测技术复盘表明,江南降水异常通常受热带太平洋和热带印度洋的共同影响。赵俊虎等(2018)指

出,受到前冬超强厄尔尼诺衰减和春季、夏季 IOBW 偏暖的影响,2016 年江南梅雨期西太副高异常偏强,其西南侧转向的水汽输送异常偏强,并与北方弱冷空气在江南梅雨期辐合,造成梅雨量异常偏多。

2024 年 6 月我国南方降水量显著偏多,共出现 5 次暴雨过程,其中 6 月 21 日至 7 月 2 日暴雨过程强度特强,过程降水量超过 50 mm 和 100 mm 的影响范围分别达到 288.0 万  $\text{km}^2$  和 128.9 万  $\text{km}^2$ 。强降水造成长江、太湖、洞庭湖发生 2024 年第 1 号洪水,长江中下游干流全线超警,华南、江南多地遭受严重暴雨洪涝及泥石流、滑坡等灾害。2024 年 5 月底国家气候中心对 6 月南方异常多雨进行了成功预报。但从气候诊断分析与研究角度,6 月南方异常多雨的极端性特征尚有待进一步分析,尤其是与历史江南多雨事件的比较。此外,本次多雨洪涝典型的气候尺度大气环流配置型及外强迫信号亦需诊断和揭示。因此本文将分析 2024 年 6 月江南异常多雨的极端性特征,揭示其大气环流背景,并对热带印度洋西部异常暖海温的可能影响进行诊断。

## 1 资 料

本文使用的逐日降水资料源自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 1961—2024 年。该数据集解决了基础气象资料质量和国家级、省级存档资料不一致的问题,数据质量和空间分辨率(测站数)较之前资料明显提高,已在科研和实际业务中得到广泛使用。

同时段逐日大气环流资料取自美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料集,资料水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ,所用要素包括 500 hPa 位势高度场、1000~500 hPa 气温场、850 hPa 比湿场和水平风场(Kalnay et al,1996; Kistler et al,2001)。

海温资料源自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的高分辨率资料(Reynolds et al,2007),水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,时段为 1982 年 1 月至 2024 年 6 月。文中用到的 Niño3.4 海温指数定义为  $5^\circ\text{S} \sim 5^\circ\text{N}$ 、 $170^\circ \sim 120^\circ\text{W}$  的海温距平,IOBW 指数定义为  $20^\circ\text{S} \sim 20^\circ\text{N}$ 、 $40^\circ \sim 110^\circ\text{E}$  的海温距平。

文中气候态取 1991—2020 年平均。

## 2 2024 年初夏江南异常多雨的极端性特征

2024 年 6 月江南地区发生了严重的洪涝灾害,造成了重大的经济损失和不同程度的人员伤亡。根据国家气候中心监测,6 月 10 日江南入梅至 6 月底,长江流域降水量较常年同期偏多 49.2%,为 1961 年以来历史同期第二多,长江和太湖发生 2024 年第 1 号洪水。从 2024 年 6 月全国降水量距平百分率分布(图 1)可以看出,旱涝分布的区域性差异极为显著。在东部季风区,长江以南降水量几乎一致性偏多,其中江淮南部和江南大部等地偏多 5 成以上,尤其是湘鄂赣三省交界处偏多 1~2 倍。而在长江以北的黄淮和华北等地降水量偏少,其中华北南部和东北部、黄淮、江汉大部偏少 5~8 成。

政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告通常用降水量的前 5% 或 10% 作为气候尺度极端降水事件的阈值标准。本文采用前 5%,即 1961—2024 年 6 月降水量最多的三年(最少的三年)都视为极端偏多(偏少)。图 1 同时给出了 2024 年 6 月降水量位列 1961 年以来历史同期前三多和前三少的测站分布,可以看出,极端偏多的站点主要分布在从广西东部经湖南、江西北部到浙江和福建北部的西南—东北向雨带范围,呈现出典型的季风性强降水特征,这与 6 月西太副高异常偏西、东亚夏季风弱

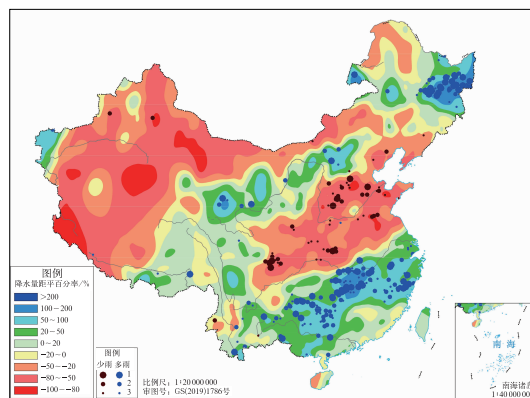
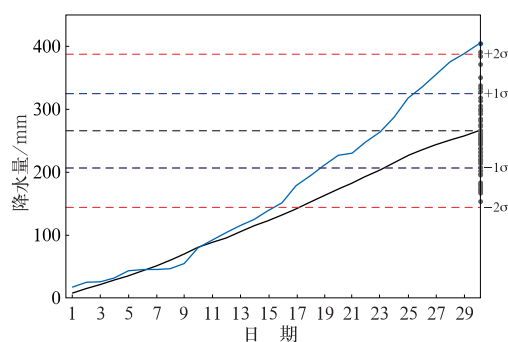


图 1 2024 年 6 月降水量距平百分率(填色)及该月达到 1961 年以来历史最多前三年(蓝色圆点)和最少前三年(棕色圆点)记录的站点分布

Fig.1 Precipitation anomaly percentage (colored) in June 2024 and distribution of stations with top three (blue dot) and minimum three (brown dot) precipitation records since 1961

有关。与极端多雨测站集中分布于江南地区不同,长江以北极端少雨的测站分布相对分散,且站数较少。我国夏季风雨带的移动有明显的季节性北抬特征,6月主雨带主要位于江南梅雨区,华北黄淮雨季尚未开始。因此,虽然6月上述北方地区气象干旱明显,但并非历史罕见,强度也未能达到极端事件阈值标准。

图2给出了2024年6月江南( $25^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\text{E}$ 以东)逐日累计降水量曲线,可以看出,在6月10日之前江南地区的上旬降水量和气候态基本一致,两条累计降水量曲线演变相互交替。但从下半月开始,两条曲线的差距快速拉大,尤其是6月22—30日,前者平均降水量是后者的1倍以上。从图2还可以看出,下半月曲线维持较大斜率,约为 $19.2\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ,表明这段时期江南强降雨持续发生。事实上,这一时段(22—30日)有8 d暴雨的站数百分比均超过10%,最大百分比出现在25日,有25%的测站监测到暴雨发生。由1961—2024年逐年6月降水量分布(图2中圆点)可以看出,2024年6月江南降水量超过了2个标准差,为1961年以来最多,也是唯一超过400 mm的年份。



注:蓝色线为2024年6月逐日累计降水量,  
黑色线为气候态6月平均逐日累计降水量;  
水平黑虚线为气候态6月平均降水量,  
蓝、红色虚线示意 $\pm 1\sigma$ ,  $\pm 2\sigma$ ;  
圆点为1961—2024年各年6月降水量分布。

图2 2024年6月江南( $25^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\text{E}$ 以东)逐日累计降水量及  
1961—2024年逐年6月降水量分布

Fig. 2 Daily accumulated precipitation in the  
area south of Yangtze River  
( $25^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$ , east of  $110^{\circ}\text{E}$ ) in June 2024  
and precipitation in June during 1961—2024

### 3 2024年初夏江南异常多雨的大气环流背景

根据谢安等(2001)研究,6月无论是经向还是纬向水汽输送,850 hPa和整层积分(1000~300 hPa)的水汽输送相关系数值均为各层最高,因此可以用850 hPa水汽输送代替整层。为了排除2024年这一极端个例的影响,本文相关系数值的计算时段为1982—2023年。图3给出了6月江南降水量和同期850 hPa水汽通量的空间相关场及经向水汽输送通量和降水量通过0.05显著性水平检验的相关系数。从图中可以看出,西太平洋地区为一个强大的反气旋式相关场分布型,表明当菲律宾上空反气旋环流强盛且西界位于我国南方沿海上空时,有利于江南初夏多雨。这一反气旋式相关场分布型对应于西太副高的偏强偏西。西太副高偏强偏西有利于副高西侧的水汽沿着其西界从热带洋面向我国南方内陆输送。这与赵振国(1999)的研究结论一致,亦是南方降水短期气候预测物理统计模型的基本依据之一。华南沿海的经向水汽对江南多雨起到了决定性作用。在西太平洋地区亦有两个较弱的气旋式相关场中心,分别位于近赤道和 $40^{\circ}\text{N}$ 附近。前者与澳大利亚东侧高压影响我国长江中下游降水有关(刘炯等,2008),后者则为东亚-太平洋遥相关型波列在中纬度的中心(黄刚和严中伟,1999)。从图3

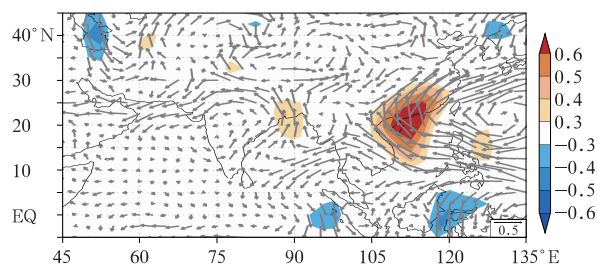


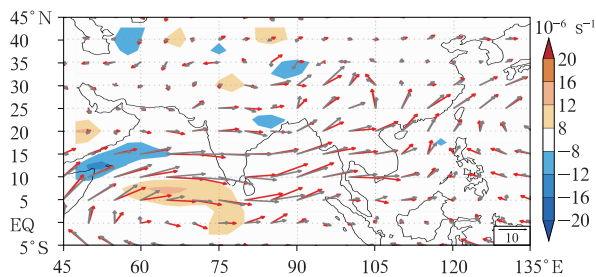
图3 1982—2023年6月江南降水量和  
同期850 hPa水汽通量相关场(箭头),  
以及经向水汽输送通量和降水量通过  
0.05显著性水平检验的相关系数(填色)

Fig. 3 Correlation (arrow) between precipitation  
in the area south of Yangtze River and the  
850 hPa water vapor flux, and correlation  
coefficient (colored) between meridional  
water vapor transport flux and precipitation  
having passed 0.05 significance level test  
in June during 1982—2023

还可看出,在热带北印度洋上空,江南初夏降水和纬向风为负相关,即热带北印度洋西风强不利于江南初夏降水。这主要是因为当西太副高异常偏强时,其南侧的东风可显著西伸,减弱了印度洋上空西风水汽输送。

图 4 给出了 2024 年 6 月 850 hPa 水汽输送通量和涡度距平。从图中可以看出,在  $110^{\circ}\text{E}$  以东地区,源自西太平洋的水汽输送明显强于气候态,且在华南地区,经向风明显偏强,这与图 3 结果一致,即 2024 年 6 月西太副高偏强偏西加强了其西侧的南风分量水汽输送。在  $30^{\circ}\text{N}$  以北地区,水汽输送通量快速减弱,在江南上空形成了很强的低层水汽辐合。但 2024 年 6 月  $110^{\circ}\text{E}$  以西地区的水汽场异常表现出与图 3 不一致的特征。在热带北印度洋上空,2024 年 6 月的西风明显强于气候态,即为西风距平,同时南风分量也较强,因此孟加拉湾的西南向水汽输送明显强于气候态,孟加拉湾季风槽偏强。这表明 2024 年初夏江南低层水汽有两支气流汇入,一支为源自南海并经西太副高西侧的东南季风型经向输送,另一支为源自孟加拉湾的西南季风型水汽输送。

从图 4 还可以看出,孟加拉湾很强的西南水汽和热带西印度洋上空的西风气流密切相关,且可追踪至索马里越赤道气流。但对比气候态可以发现,2024 年 6 月索马里越赤道气流强度即经向风并未有明显差异,但赤道西印度洋上空的纬向风分量差异明显。在热带印度洋西侧存在一个较强的涡度正距平,中心值高于  $1.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,即该区域存在一



注:灰色箭头为气候态平均水汽输送通量  
(单位:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

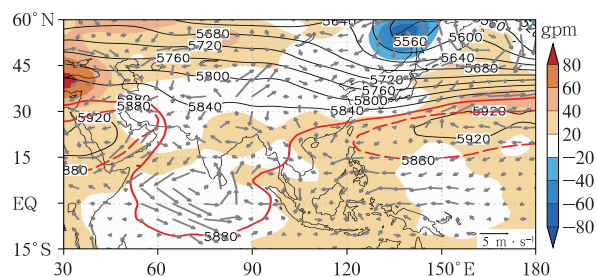
图 4 2024 年 6 月 850 hPa 水汽输送通量(红色箭头,单位:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )和涡度距平(填色,仅给出  $\pm 8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  以外数值)

Fig. 4 The 850 hPa water vapor transport flux (red arrow, unit:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and vorticity anomaly (colored, only values beyond  $\pm 8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) in June 2024

个气旋式距平风场,这一正涡度距平或气旋式距平风场在该处形成了一个相对气压低于周围的低压槽,槽前的西南风气流和孟加拉湾地区西南风输送叠加,导致输入江南的水汽明显强于气候态。

图 5 给出了 2024 年 6 月 500 hPa 位势高度及其距平和 850 hPa 风场距平。从图中可以看出,2024 年 6 月 5880 gpm 特征等值线在整个东半球是连通的,即西太副高和北非副高相连。2024 年 6 月西太副高不仅控制在华南,其西段越过东南亚上空后继续向西南方向延伸并一直到达热带印度洋南部的  $10^{\circ}\text{S}$  附近。同时北非副高也较其气候态位置略东。在东半球副热带地区,西太副高和北非副高是北半球副热带高压带的两个最主要的分中心(符淙斌等,1980)。相比于西太副高西伸脊点,北非副高的东伸脊点年际变率小得多(假拉等,2002)。但在 2024 年 6 月,北非副高的东侧明显向东和向南延伸,并在热带印度洋南部和西太副高连通。统计结果表明(假拉等,2002),北非副高和西太副高在东西方向上也存在相向而行的特征,当北非副高增强且偏东偏南时,西太副高也加强并西伸偏南,造成长江以南降水量多、以北降水量少的空间分布,这与 2024 年 6 月的降水量分布(图 1)一致。

2024 年西太副高和北非副高连通是 1981 年以来初夏首次出现。图 6 给出了 1981—2024 年  $15^{\circ}\text{S} \sim 40^{\circ}\text{N}$  的最大位势高度。在这一纬度带,若某一经度位势高度最大值未能达到 5880 gpm,则表明无论是西太副高还是北非副高均未能西伸或东伸到这一



注:红色实线为 5880 gpm 线,红色虚线为气候态平均 6 月 5880 gpm 线。

图 5 2024 年 6 月 500 hPa 位势高度(等值线,单位: gpm)和位势高度距平(填色)及 850 hPa 风场距平(箭头)

Fig. 5 The 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm) and geopotential height anomaly (colored) and 850 hPa wind anomaly (arrow) in June 2024

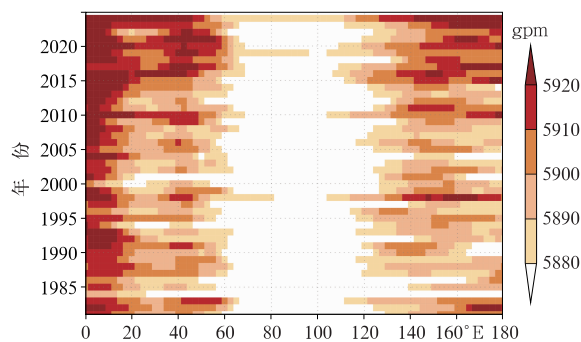


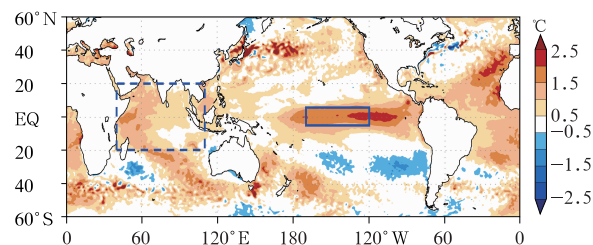
图 6 1981—2024 年 15°S~40°N 上最大位势高度

Fig. 6 Maximum geopotential height at each longitude from 15°S to 40°N during 1981–2024

经度,即西太副高和北非副高无法连通。从图 6 可见,在其他高压带偏强年份如 1998 年、2010 年和 2019 年等,虽然西太副高和北非副高也有明显的相向而行,但均未能相连。结合图 5 还可以看出,2024 年 6 月 5880 gpm 等值线在热带印度洋向南伸展,形成“倒 Ω”环流型,从而在赤道印度洋上空造成很强的气旋式距平环流。这一气旋式距平环流的东侧偏南风距平分量加强了孟加拉湾西南气流向江南地区的输送。进一步的分析表明,在 1998 年、2010 年和 2019 年这三年初夏江南地区降水量均偏多,降水量距平百分率合成图(图略)和 2024 年初夏分布非常一致,均为“北方极端干旱-江南异常多雨”的空间型。对这三年的 850 hPa 风场距平进行合成分析发现,同样在赤道印度洋地区存在一个反气旋式距平环流,孟加拉湾地区越赤道气流偏强(图略),这与图 5 一致。

#### 4 热带印度洋西部异常暖海温的可能影响

造成夏季长江以南异常多雨的大气环流型与前期海温尤其是热带太平洋、热带印度洋海温异常密切相关。大量的统计分析揭示了 ENSO 的贡献,这也是传统夏季降水物理统计预测模型中最重要的因子之一(赵振国,1999;李维京,2012)。典型个例如 1998 年(国家气候中心,1998)、2016 年(高辉等,2017;袁媛等,2017b)、2019 年(丁婷等,2020)也验证了统计分析的结果。此外,近年来的研究表明热带印度洋海温冷暖也会导致东亚夏季风环流和我国夏季降水的异常,并成为新的预测信号(陈丽娟等,2013;袁媛等,2017a)。图 7 给出了 2024 年冬季海



注:蓝色实框和虚框分别为 Niño3.4 海温指数及 IOBW 指数定义区。

图 7 2024 年冬季海温距平分布

Fig. 7 Distribution of winter SST anomaly in 2024

温距平分布,从图中可以看出,在大部分海域海温均为正距平,这是因为全球变暖背景下海洋也呈现出线性增暖的趋势,尤其是热带印度洋和南海是全球海温增暖最为显著的海域。赤道中东太平洋海温异常偏暖,中心距平值超过 2℃ 以上, Niño3.4 海温指数为 1.78℃,仅次于 2016 年、1983 年和 1998 年(超强厄尔尼诺年份)。在热带印度洋地区同样海温偏暖明显,其中 IOBW 指数为 0.89℃。由于冬季赤道东太平洋海温均方差较热带印度洋明显偏大,因此虽然热带印度洋平均海温距平在 0.5~1.5℃,但其极端性要超过东太平洋。在 2024 年冬季, Niño3.4 海温指数较常年偏高 1~2 个均方差(1 个均方差为 1.04℃),但 IOBW 指数较常年偏高约 3 个均方差(1 个均方差为 0.30℃),为 1982 年以来冬季最强。

从图 7 还可以看出,热带印度洋暖海温的分布仍呈现出空间差异,其西侧偏暖程度明显强于东侧。为此本文将 IOBW 分成西东两个等面积海域,分别为 IOBW-W (20°S~20°N、40°~75°E), IOBW-E (20°S~20°N、75°~110°E)。本文重点分析西侧暖海温。图 8 给出了 1982 年以来逐月 IOBW-W 指数,可以看出,2024 年 1—2 月期间 IOBW-W 指数均超过 1℃ (分别为 1.17℃ 和 1.15℃),是研究时段内最强月份。事实上,自 2023 年 8 月至 2024 年 5 月, IOBW-W 指数一直维持在 0.8℃ 以上。异常暖海温的长时间维持极为罕见。从图 8 还可以发现,2014 年开始热带印度洋西侧基本维持暖海温。过去的研究表明,当赤道中东太平洋有厄尔尼诺(拉尼娜)事件发展时,在冬季至次年春季、夏季,热带印度洋海温往往表现为全区一致偏暖(偏冷),在该过程中印度洋起到一种信号储存的“电容器效应”(Yang et al, 2007; Xie et al, 2009)。即使在 2020—2023 年三峰拉尼娜期间(Jiang et al, 2023),热带印度洋亦

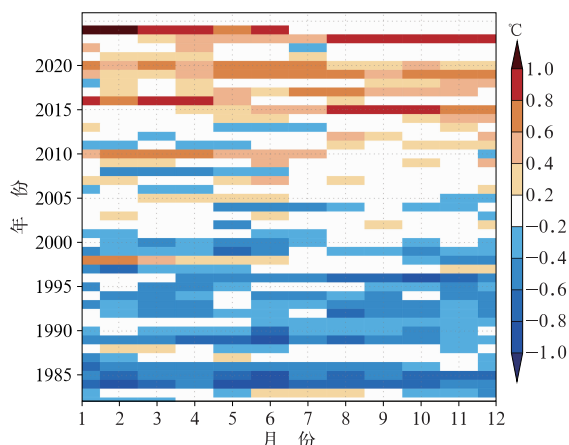
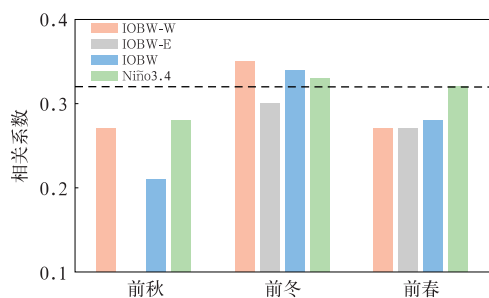


图 8 1982 年以来逐月 IOBW-W 指数

Fig. 8 Monthly IOBW-W index since 1982

为海温正距平,表明其海温异常有其自身显著的年代际增暖趋势。

为对比各因子对江南降水量影响的差异,图 9 给出了前秋(前一年 9—11 月)、前冬(前一年 12 月至当年 2 月)和前春(当年 3—5 月) IOBW-W、IOBW-E、IOBW 及 Niño3.4 海温指数与 6 月江南降水量的相关系数值。可以看出,相比于前秋和前春,前冬海温和初夏降水量的相关系数值最高,除 IOBW-E 外,各数值均通过 0.05 显著性水平检验,但各海区与降水量相关系数值的季节性差异明显。进一步统计分析表明,热带西印度洋海温的年际变率要高于东印度洋,这也使得 IOBW 指数的年际变化主要受其西部海温影响,同时 IOBW 指数和降水



注:虚线为 0.05 显著性水平检验。

图 9 2024 年前秋、前冬和前春 IOBW-W、IOBW-E、IOBW 及 Niño3.4 海温指数与 6 月江南降水量相关系数值

Fig. 9 Correlation coefficients of IOBW-W, IOBW-E, IOBW and Niño3.4 indices in the previous autumn, winter and spring with the June precipitation in the area south of Yangtze River in 2024

量的高相关性也主要受其西部海温作用。

热带印度洋西部异常偏暖导致江南初夏降水量偏多可能与其下垫面热力效应有关。图 10 给出 2024 年 6 月热带印度洋西部( $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $40^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{E}$ )和东部( $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $75^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ )上空的 1000~500 hPa 各层气温距平。显然,由于西部海域海温高于东部,海洋下垫面的热力作用导致其上空气温也存在西部高于东部的现象,这种海洋对大气的热力效应存在于对流层中低层,且在 925 hPa 最为明显。对比 2024 年 1—6 月热带印度洋西部和东部上空 925 hPa 气温原始值和距平可以看出(图略),除 4 月出现短暂性波动外,2024 年上半年有五个月西部气温距平均高于东部,尤其是 5—6 月更为明显,这也使气温原始值呈现出更为明显的西高东低特征,表明冬季热带印度洋西侧超强暖海温的影响可在冬春季至初夏持续。因此,若西热带印度洋异常偏暖,将加热其上空气温,气柱受热膨胀,空气密度减小,因此位势高度增高,从而加强了北非副高的东侧位势高度,导致北非副高东侧的北风分量加强。同时由于西太副高受前期厄尔尼诺事件影响明显西伸,其西侧的南风分量加强,从而在热带印度洋南部形成一个类似于低槽的“倒 $\Omega$ ”环流,增强了槽前南风分量的水汽输送并与其西侧的水汽输送汇合,加强了江南的低层南风分量水汽汇聚,从而导致江南异常多雨。

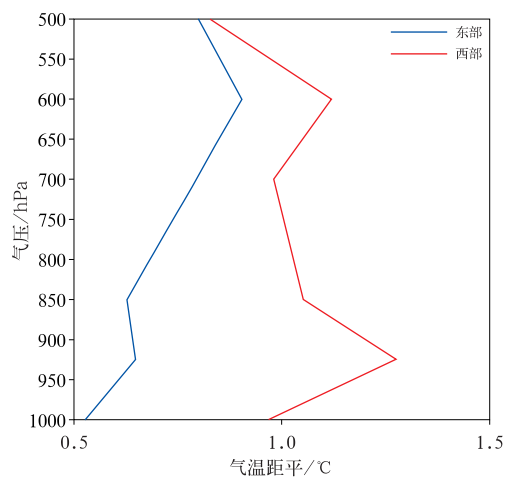


图 10 2024 年 6 月热带印度洋西部( $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $40^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{E}$ )和东部( $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $75^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ )上空气温距平

Fig. 10 Temperature anomalies over the western ( $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $40^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{E}$ ) and the eastern tropical Indian Ocean ( $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ ) in June 2024

从图 6 中选择北非副高东侧位势高度强的 1998 年和 2019 年, 这两年合成结果表现出北非副高东界明显偏东(图略)。图 11 为这两年合成的冬季热带印度洋海温距平, 从图中可以看出, 在西热带印度洋大部分地区海温正距平在  $0.5^{\circ}\text{C}$  以上, 且强于东热带印度洋, 验证了 2024 年个例分析的结果, 即西热带印度洋海温异常偏暖的年份北非副高易加强东伸。此外, 北非副高东伸可能还与西热带印度洋持续偏暖有较好的关联。初步的统计结果显示, 西热带印度洋海温距平在冬春季超过  $0.2^{\circ}\text{C}$  以上四个月的年份中, 后期北非副高偏东的概率明显高于其他年份。但目前无论是业务还是科研中均缺乏类似于西太副高西伸脊点的北非副高东界指数, 因此这一关联尚需通过制定客观化监测指标加以进一步分析。

## 5 结论和讨论

2024 年 6 月我国江南地区遭受了严重的洪涝灾害, 造成了重大的经济损失和不同程度的人员伤亡。本文分析了该区域异常多雨的极端性特征。统计发现, 该月东部季风区旱涝分布的区域性差异极为显著, 在长江以南降水量几乎一致性偏多, 其中江淮南部和江南大部偏多 5 成以上。从广西东部经湖南、江西北部到浙江和福建北部的西南—东北向雨带范围内多个测站降水量位列 1961 年以来前三位。而在华北南部和东北部、黄淮、江汉大部偏少 5~8 成, 气象干旱持续。从逐日降水量可知, 2024 年 6 月下半月开始, 江南强降水持续发生, 区域平均降水强度超过  $15\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$  的有 12 d, 而在上半月仅有 2 d, 因此下半月的持续强降水导致江南 6 月降水量打破历史纪录。

统计分析表明, 当低层菲律宾上空反气旋环流

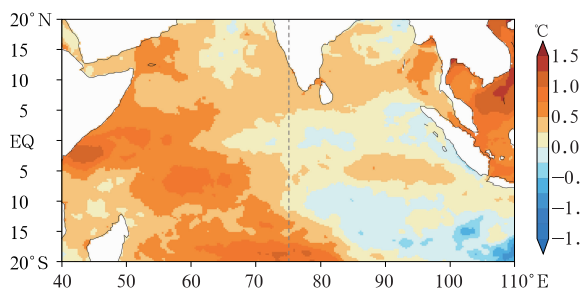


图 11 1998 年和 2019 年平均冬季海温距平

Fig. 11 Winter averaged SST anomaly in 1998 and 2019

强盛且西界位置偏至中国南方沿海上空时, 对应于中层西太副高偏强偏西, 有利于其西侧的水汽沿着其西界从热带洋面向南方输送, 经华南沿海的经向水汽输送偏强, 对江南多雨起到了直接作用, 这是江南初夏多雨的典型环流配置型。对比 2024 年 6 月水汽输送场可以发现, 在  $110^{\circ}\text{E}$  以东地区环流型和统计结论一致, 即偏强偏西的西太副高西侧异常偏强的南风水汽输送有重要作用。但在  $110^{\circ}\text{E}$  以西地区水汽输送场异常表现出和统计结果不一致的特征。在热带北印度洋上空, 2024 年 6 月西风和南风均强盛, 使得孟加拉湾季风槽偏强。初夏江南低层水汽汇入气流除传统的源自南海并经西太副高西侧的东南季风型经向输送外, 另有一支源自孟加拉湾的西南季风型水汽输送起到了主要贡献。这一异常环流配置和 2024 年 6 月西太副高—北非副高首次连通有关。该月西太副高控制华南后其西段越过东南亚上空并继续向西南方向延伸, 一直到达热带印度洋南部的  $10^{\circ}\text{S}$  附近。同时北非副高的东侧明显向东和向南延伸, 并在热带印度洋南部和西太副高连通, 形成“倒  $\Omega$ ”环流型, 从而在赤道印度洋上空造成很强的气旋式距平环流。这一气旋式距平环流的东侧偏南风距平分量加强了孟加拉湾西南气流向江南地区的输送。

2024 年冬季 IOBW 指数达  $0.89^{\circ}\text{C}$ , 为 1982 年以来冬季最强。但热带印度洋全区一致偏暖分布型下仍存在空间差异, 其西侧偏暖程度明显强于东侧。其中西侧 ( $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $40^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{E}$ ) 在 1—2 月期间海温首次突破  $1^{\circ}\text{C}$ , 为研究时段内最强月份。由于西部海域海温暖于东部, 海洋下垫面的热力作用导致其上空大气温度也存在西部高于东部的现象, 这种海洋对大气的热力效应存在于对流层中低层 600 hPa 之下。热带印度洋西部异常偏暖将加热其上空气温, 气柱受热膨胀, 空气密度减小, 因此位势高度增高, 从而加强了北非副高东侧的位势高度, 导致北非副高东侧的北风分量加强。同时由于西太副高受前期厄尔尼诺事件影响明显西伸, 其西侧的南风分量加强, 从而在热带印度洋南部形成上述类似于低槽的“倒  $\Omega$ ”环流, 加强了槽前南风分量的水汽输送并和西太副高西侧的水汽输送汇合。进一步计算了前秋、前冬和前春 IOBW-W、IOBW-E、IOBW 及 Niño3.4 海温指数与 6 月江南降水量相关系数, 发现冬季 IOBW-W 指数和降水量的相关系数为所有数值中最大, 验证了热带印度洋西部海温可能对江

南初夏降水起到更为主要的贡献。

需要指出的是,本文仅从热带大气环流和海温的角度分析了 2024 年 6 月江南多雨的可能原因。之前的研究亦指出,中高纬度大气环流和海温信号同样可对江南夏季降水产生重要影响,如阻塞(赵振国,1999)、西伯利亚上空位势高度异常(谭桂容和王一舒,2016)、北大西洋海温等(Zuo et al,2013)。从图 5 可发现,2024 年 6 月日本北部存在一个低层气旋距平环流,对应于中层负位势高度距平,从逐日环流场上可知该地区东北冷涡活跃。何金海等(2006)的研究表明,频繁的东北冷涡活动具有显著的“气候效应”并可对梅雨期降水产生影响。东北冷涡越强,梅雨将越容易偏多。6 月正是江南梅雨最盛行的月份,因此 2024 年 6 月活跃的东北冷涡可能是另一个重要的影响因子。但东北冷涡或高纬度其他环流系统的影响需要和热带环流系统相配置开展分析,后续需要结合日尺度环流加以精细化诊断。

## 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. Chen L J, Gao H, Gong Z S, et al, 2013. Overview of precursory signals of seasonal climate prediction and its application in summer 2012[J]. Meteor Mon, 39(9):1103-1110(in Chinese).
- 陈文,丁硕毅,冯娟,等,2018. 不同类型 ENSO 对东亚季风的影响和机理研究进展[J]. 大气科学,42(3):640-655. Chen W, Ding S Y, Feng J, et al, 2018. Progress in the study of impacts of different types of ENSO on the East Asian monsoon and their mechanisms[J]. Chin J Atmos Sci, 42(3):640-655(in Chinese).
- 丁婷,韩荣青,高辉,2020. 2019 年汛期气候预测效果评述及降水预测先兆信号分析[J]. 气象,46(4):556-565. Ding T, Han R Q, Gao H, 2020. Overview of climate prediction for the summer 2019 and the precursory signals[J]. Meteor Mon, 46(4):556-565(in Chinese).
- 丁一汇,2013. 中国气候[M]. 北京:科学出版社. Ding Y H, 2013. Climate in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 丁一汇,张建云,2009. 暴雨洪涝[M]. 北京:气象出版社. Ding Y H, Zhang J Y, 2009. Heavy Rainfall and Flood[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 符淙斌,王金根,吴达铭,1980. 北半球副高带的长期变化(一)[J]. 气象,6(3):3-5. Fu C B, Wang J G, Wu D M, 1980. Long-range variation of the subtropical high belt in Northern Hemisphere (I)[J]. Meteor Mon, 6(3):3-5(in Chinese).
- 高辉,袁媛,洪洁莉,等,2017. 2016 年汛期气候预测效果评述及主要先兆信号与应用[J]. 气象,43(4):486-494. Gao H, Yuan Y, Hong J L, et al, 2017. Overview of climate prediction of the summer 2016 and the precursory signals[J]. Meteor Mon, 43(4):486-494(in Chinese).
- 国家气候中心,1998. 98 中国大洪水与气候异常[M]. 北京:气象出版社. National Climate Centre, 1998. 1998 Heavy Flood and the Abnormal Climate[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 国家气候中心,2017. 2017 年 6 月中国气候影响评价[R/OL]. [http://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni\\_china.php](http://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni_china.php). National Climate Centre, 2017. Assessment of climate impact over China in June 2017[R/OL]. [http://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni\\_china.php](http://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni_china.php) (in Chinese).
- 何金海,吴志伟,江志红,等,2006. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响[J]. 科学通报,51(23):2803-2809. He J H, Wu Z W, Jiang Z H, et al, 2006. “Climate effect” of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu[J]. Chin Sci Bull, 51(23):2803-2809(in Chinese).
- 黄刚,严中伟,1999. 东亚夏季风环流异常指数及其年际变化[J]. 科学通报,44(4):421-424. Huang G, Yan Z W, 1999. The East Asian summer monsoon circulation anomaly index and its interannual variations[J]. Chin Sci Bull, 44(4):421-424(in Chinese).
- 假拉,周顺武,丁锋,2002. 北非副高的气候特征及其对中国夏季降水的影响[J]. 南京气象学院学报,25(6):816-822. Jia L, Zhou S W, Ding F, 2002. The climatic character of North Africa subtropical high and its effect on summer precipitation in China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 25(6):816-822(in Chinese).
- 金爱浩,曾刚,余晔,等,2018. 南亚高压与西太平洋副热带高压经纬向位置配置对中国东部夏季降水的影响[J]. 热带气象学报,34(6):806-818. Jin A H, Zeng G, Yu Y, et al, 2018. Effects of latitudinal and longitudinal positions of South Asia high and western Pacific subtropical high on the summer precipitation over East China[J]. J Trop Meteor, 34(6):806-818(in Chinese).
- 雷显辉,宋敏红,张少波,2022. 夏季南亚高压和西太副高活动特征指数与中国东部降水分布的联系[J]. 高原气象,41(2):489-501. Lei X H, Song M H, Zhang S B, 2022. Association between summer activity characteristic indices of the South Asia high and the West Pacific subtropical high and precipitation distribution in eastern China[J]. Plateau Meteor, 41(2):489-501(in Chinese).
- 李维京,2012. 现代气候业务[M]. 北京:气象出版社. Li W J, 2012. Modern Climate Operation[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 刘舸,张庆云,孙淑清,2008. 澳大利亚东侧环流及海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系[J]. 大气科学,32(2):231-241. Liu G, Zhang Q Y, Sun S Q, 2008. The relationship between circulation and SST anomaly east of Australia and the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chin Atmos Sci, 32(2):231-241(in Chinese).
- 苗长明,丁一汇,郭品文,等,2015. 水汽输送与江南南部初夏雨季及降水变化的联系[J]. 气象学报,73(1):72-83. Miao C M, Ding Y H, Guo P W, et al, 2015. Linkage of the water vapor transport distribution with the rainy season and its precipitation in the southern regions south of the Yangtze River during the early summer[J]. Acta Meteor Sin, 73(1):72-83(in Chinese).

- 苗长明,郭品文,丁一汇,等,2014.江南南部初夏雨季的降水和环流气候特征[J].大气科学,38(2):285-296. Miao C M, Guo P W, Ding Y H, et al, 2014. Climatic characteristics of rainfall and atmospheric circulation during the early summer rainy season in the south part of Jiangnan[J]. Chin J Atmos Sci, 38(2):285-296 (in Chinese).
- 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. Ren Z H, Yu Y, Zou F L, et al, 2012. Quality detection of surface historical basic meteorological data[J]. J Appl Meteor Sci, 23(6):739-747 (in Chinese).
- 谭桂容,王一舒,2016.中高纬度与热带大气的共同作用对江南4—6月低频降水的影响[J].气象学报,74(3):335-351. Tan G R, Wang Y S, 2016. Combined effects of mid- to high-latitudes and the tropic on the low-frequency precipitation in Jiangnan from April to June[J]. Acta Meteor Sin, 74(3):335-351 (in Chinese).
- 谢安,宋焱云,毛江玉,等,2001.南海夏季风期间水汽输送的气候特征[J].气候与环境研究,6(4):425-434. Xie A, Song Y Y, Mao J Y, et al, 2001. Climatological characteristics of moisture transport during summer monsoon over South China Sea[J]. Clim Environ Res, 6(4):425-434 (in Chinese).
- 袁媛,高辉,李维京,等,2017a. 2016年和1998年汛期降水特征及物理机制对比分析[J].气象学报,75(1):19-38. Yuan Y, Gao H, Li W J, et al, 2017a. Analysis and comparison of summer precipitation features and physical mechanisms between 2016 and 1998[J]. Acta Meteor Sin, 75(1):19-38 (in Chinese).
- 袁媛,高辉,柳艳菊,2017b. 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, 2017b. 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).
- 赵俊虎,陈丽娟,王东阡,2018. 2016年我国梅雨异常特征及成因分析[J].大气科学,42(5):1055-1066. Zhao J H, Chen L J, Wang D Q, 2018. Characteristics and causes analysis of abnormal Meiyu in China in 2016[J]. Chin J Atmos Sci, 42(5):1055-1066 (in Chinese).
- 赵振国,1999.中国夏季旱涝及环境场[M].北京:气象出版社. Zhao Z G, 1999. Summer Drought and Flood in China and the Circulation Patterns[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 郑国光,2019.中国气候[M].北京:气象出版社. Zheng G G, 2019. Climate in China[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- Hu K M, Huang G, Huang R H, 2011. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China[J]. J Climate, 24(20):5365-5377.
- Huang R H, Wu Y F, 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism[J]. Adv Atmos Sci, 6(1):21-32.
- Jiang S, Zhu C W, Hu Z Z, et al, 2023. Triple-dip La Nina in 2020—23: understanding the role of the annual cycle in tropical Pacific SST[J]. Environ Res Lett, 18(8):084002.
- 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.
- Kistler R, Collins W, Saha S, et al, 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation[J]. Bull Amer Meteor Soc, 82(2):247-268.
- Klein S A, Soden B J, Lau N C, 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge[J]. J Climate, 12(4):917-932.
- Lau N C, Nath M J, 2000. Impact of ENSO on the variability of the Asian-Australian monsoons as simulated in GCM experiments[J]. J Climate, 13(24):4287-4309.
- Meyers G, 1996. Variation of Indonesian throughflow and the El Niño-Southern Oscillation[J]. J Geophys Res, 101(C5):12255-12263.
- Reynolds R W, Smith T M, Liu C Y, et al, 2007. Daily high-resolution blended analyses for sea surface temperature[J]. J Climate, 20(22):5473-5496.
- Xie S P, Hu K M, 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):730-747.
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al, 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon[J]. Geophys Res Lett, 34(2):L02708.
- Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al, 2013. Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon[J]. Adv Atmos Sci, 30(4):1173-1186.

(本文责编:侯翠梅)