

闫尊,金大超.2021年9月长江以南地区高温异常及其和南印度洋海面温度异常的联系[J].海洋气象学报,2023,43(2):42-52.
YAN Zun, JIN Dachao. High temperatures over regions south of the Yangtze River in September 2021 and their linkage with southern Indian Ocean SSTAs[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(2):42-52. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.02.004. (in Chinese)

2021年9月长江以南地区高温异常及其和南印度洋海面温度异常的联系

闫尊^{1,2}, 金大超^{1,2}

(1.南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室,江苏南京 210044;2.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏南京 210044)

摘要: 利用1979—2021年格点化数据集CN05.1月平均气温资料、欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) ERA5(ECMWF Reanalysis v5)大气再分析资料和全球范围扩展重建海面温度资料第5版本(Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5, ERSSTv5)月平均海面温度(以下简称“海温”)资料,对2021年9月长江以南地区高温异常及其和同期南印度洋海温异常的联系进行了分析。研究结果如下:2021年9月,中国东部长江以南地区出现高温异常事件,高温异常值约为3.33℃,去除长期趋势后高温异常值约为2.46℃,是近40a来9月最高值。进一步研究表明,长江以南地区温度异常和南印度洋海温异常存在联系。2021年9月南印度洋大部分区域冷海温异常,对流层低层辐散异常、高层辐合异常,海洋性大陆(Maritime Continent, MC)区域低层辐合异常、高层辐散异常,受异常上升运动控制,上述环流异常引起东亚地区局地哈得来环流增强,长江以南地区受异常下沉气流控制,高温异常。另一方面,热带东南印度洋暖海温异常,通过Matsuno-Gill响应,引起MC至热带西太平洋对流层低层东风异常,使得西北太平洋副热带高压强度偏强且范围偏西,有利于维持长江以南的异常下沉运动。非绝热加热异常的诊断结果亦显示,南印度洋的冷海温异常可通过调节MC区域的非绝热加热异常使长江以南地区的非绝热加热负异常,长江以南地区下沉运动所引起的垂直温度平流正异常对该地区高温异常作出了贡献。

关键词: 2021年9月;长江以南地区;高温异常;南印度洋;海温异常

中图分类号: P47 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)02-0042-11

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.02.004

High temperatures over regions south of the Yangtze River in September 2021 and their linkage with southern Indian Ocean SSTAs

YAN Zun^{1,2}, JIN Dachao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science &

收稿日期:2022-08-24;修回日期:2023-03-23

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42030605);国家自然科学基金青年科学基金项目(41905061);2022年度河南省科技研发计划联合基金项目(222103810087)

第一作者简介:闫尊,女,硕士研究生,主要从事热带海气相互作用研究,yz18800468545@163.com。

通信作者简介:金大超,男,博士,副教授,主要从事热带海气相互作用研究,jindc@nuist.edu.cn。

Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the CN05.1 monthly mean temperature, the ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) reanalysis, and the monthly mean SST (sea surface temperature) of ERSSTv5 (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5) from 1979 to 2021, the high temperatures over the regions south of the Yangtze River (RSYR) in September 2021 and their linkage with the SST anomalies (SSTAs) in the southern Indian Ocean (SIO) are analyzed. The results are as follows. In September 2021, abnormally high temperatures are found over the RSYR in eastern China. The high temperature anomaly over RSYR (24.2° – 30.8° N, 108.5° – 117.5° E) reaches about 3.33° C. After removing the long-term trends, it is still about 2.46° C, which is the highest in September during the past 4 decades. Further analysis shows that there is a linkage between the abnormally high temperatures over RSYR and the cooling in the SIO during September 2021. The negative SSTAs in SIO are accompanied by an anticyclonic circulation anomaly in the lower troposphere. Simultaneously, anomalous low-level divergence and high-level convergence are observed over the majority of this sea area. The SIO cooling also causes anomalous low-level convergence and anomalous high-level divergence over the Maritime Continent (MC), which is controlled by anomalous ascent motion. These large-scale circulation anomalies can strengthen the local Hadley circulation over East Asia and abnormal downdraft over RSYR, which causes high temperature weather there. Furthermore, the positive SSTAs in the tropical southeast Indian Ocean is accompanied by the non-adiabatic heating, the Matsuno-Gill response of the lower level induces the easterly anomalies prevailing from the MC to the tropical western Pacific, and the western Pacific subtropical high (WPSH) lies to the west of its normal and is slightly intensified, which is conducive to maintain the anomalous descent motion over RSYR. Large-scale heating budget analysis indicates that the negative SIO SSTAs can cause the negative non-adiabatic heating anomaly over RSYR by regulating the non-adiabatic heating anomaly over the MC region. The positive vertical temperature advection anomaly due to the descent motion contributes to the high temperatures over RSYR in September 2021.

Keywords: September 2021; regions south of the Yangtze River (RSYR); high temperatures; southern Indian Ocean (SIO); sea surface temperature anomaly

引言

长江以南地区位于东亚大陆副热带地区,受西太平洋副热带高压的影响高温异常事件频发^[1-4],给当地人民的生活及社会发展造成了严重影响。如2003年夏季,中国南方地区出现的大范围持续性异常高温天气^[1],造成水稻颖花不育而严重减产^[5];2013年夏季长江中下游地区持续高温伏旱^[2],高温热害对早稻、棉花、玉米等农作物生长不利,造成茶叶、蔬菜减产,直接经济损失达480多亿元^[3];又如2021年9月,长江以南地区高温异常,多省份温度异常大于 3° C,是近40a来9月温度的最高值。上述大范围强高温天气严重影响了人民群众的身体康及生产生活,使当地农业发展遭受巨大的经济损失。

长江以南地区气候异常影响因子众多,夏季温度异常和中纬度遥相关波列及热带海面温度(以下

简称“海温”)异常存在联系^[6]。热带印度洋海温异常会导致华南夏季气候异常^[7],东南热带印度洋海温异常对中国东部秋季气候异常也存在影响^[8]。热带印度洋海盆尺度增暖,通过东传的开尔文波(Kelvin wave)引发西北太平洋和中国南部的低层异常反气旋环流,使得长江以南地区夏末降水减少和极端高温事件增加^[9-10]。厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)通过影响春季印度洋海盆尺度增暖,并在夏季通过东传的开尔文波影响东亚地区气候异常^[11-13]。El Niño 发展阶段,西北太平洋反气旋环流异常^[14-15],南海和菲律宾周围的对流活动减弱^[16-17],副热带高压南移,进而影响长江以南地区夏季气候异常^[18]。拉尼娜(La Niña)发展年夏季,热带中东太平洋的冷海温异常对维持西北太平洋反气旋环流异常起着重要的作用^[19]。长江以南地区夏季温度异常和 ENSO 的联系还存在显著的年代际变化^[20]。长江以南地区夏季的极端

高温活动在太平洋经向模态正位相期间明显增强,反之亦然^[21]。长江以南地区的极端高温事件还和北半球夏季季节内振荡及大气环流准双周振荡存在联系^[22-23]。海洋大陆区域持续的异常热力强迫可导致长江中下游地区的辐合辐散异常,进而调节该地区的降水异常^[24]。南印度洋偶极子也可通过调节东亚地区大气环流异常,进而影响中国南方地区夏季降水异常^[25]。

长江以南地区温度异常存在显著的年际变化、年代际变化和长期变化趋势。20世纪下半叶,中国东南部地区夏季高温热浪持续时间减少^[26-27];20世纪60—70年代,除西北地区外的中国大部分地区,热日数频次较高,20世纪80年代较低^[28],年际和年代际变化较大^[29]。20世纪90年代初,长江以南地区热日数及热浪频率呈增加的趋势^[27]。20世纪90年代中期,中国极端高温日数呈增加的趋势^[30]。

如前文所述,长江以南地区温度异常和印度洋海温异常存在联系^[9]。而2021年9月南印度洋大部分海域海温负异常(具体分析见本文第3部分),这对2021年9月长江以南地区温度异常偏高存在什么样的贡献?弄清这个问题,可为深刻理解长江以南地区初秋温度异常提供科学依据,亦可为预测长江以南地区初秋温度异常及防灾减灾提供线索。

1 资料和方法

选用1979—2021年格点化数据集CN05.1水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的月平均气温资料^[31]、美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的全球范围扩展重建海面温度资料第5版本(Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5, ERSSTv5)水平分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ 的月平均海温资料^[32]及同期欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)ERA5(ECMWF Reanalysis v5)水平分辨率为 $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ 的大气再分析资料^[33]。除图1a、c外,所用资料均利用最小二乘法滤除了长期线性趋势。文中所指长江以南地区为湖北和安徽南部、贵州东部、湖南、江西西部、福建西部及两广地区的北部地区,范围为 $24.2^\circ \sim 30.8^\circ \text{N}$ 、 $108.5^\circ \sim 117.5^\circ \text{E}$ (图1b矩形框区域)。

为了分析与2021年9月长江以南地区高温异常相联系的热力学条件,还利用“倒算法”计算了大气整层的非绝热加热率^[34]:

$$q_1 = \frac{\partial T}{\partial t} + V \times \nabla T - \omega \sigma, \quad (1)$$

其中: $q_1 = Q_1 / C_p$, Q_1 为1000 hPa至100 hPa整层垂直积分的非绝热加热率, C_p 为定压比热容; T 为温度; V 为水平运动矢量; ∇ 为水平梯度算子; ω 为 p 坐标系下垂直速度;静力稳定度 $\sigma = \alpha / C_p - \partial T / \partial P$, α 为比容, P 为气压。公式(1)右侧3项分别为温度局地变化、水平温度平流项和垂直温度平流项,月时间尺度温度的局地变化项可忽略。

为了验证2021年9月南印度洋海温异常影响长江以南地区高温异常的物理机制,还使用CAM6(Community Atmosphere Model version 6)^[35]设计了控制试验和敏感性试验, CAM6为美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)通用地球系统模式(Community Earth System Model, CESM)2.1.3的大气分量。模式的水平分辨率为 $1.9^\circ \times 2.5^\circ$ (f19_g16), 32层垂直分层大气混合 σ 气压坐标(atmosphere hybrid sigma pressure coordinate),选用的组件集(compset)为F2000climo。模式设计的具体方案详见第5部分。

2 2021年9月中国东部长江以南地区高温异常特征

2021年9月长江以南地区多省出现高温异常,除两广地区南部和云南西部,长江以南大部分地区平均温度较气候平均偏高 2°C ,其中湖北、安徽、浙江、贵州、广西、湖南、广东、江西等8省(区)部分区域为温度异常的大值区,温度异常大于 3°C ,温度异常的极大值位于湖南省中部地区,大于 4°C (图1a)。滤除长期线性趋势后,2021年长江以南地区夏季温度异常仍呈类似的空间分布(图1b),温度异常大值区位于湖北和安徽南部、浙江西部、贵州东部、湖南、江西西部及两广地区北部,上述区域大部分地区温度异常超过 2°C 。湖南中部地区去趋势后仍为温度异常的极大值区,大于 3°C (图1b)。2021年9月,长江以南地区出现1979年以来温度的最高值,区域平均温度异常超过2倍标准差(图1c)。

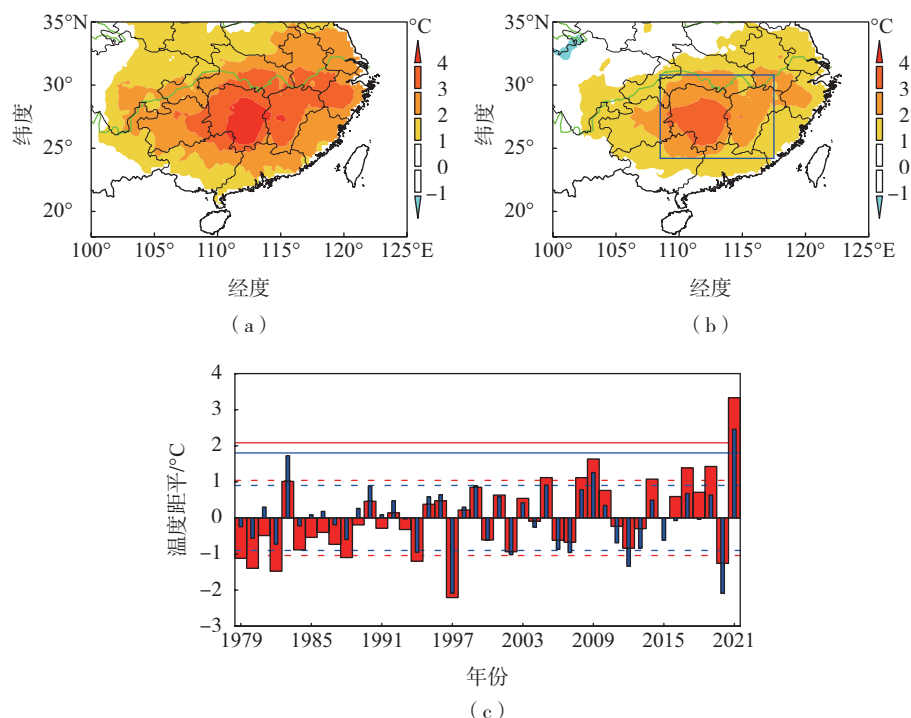


图1 2021年9月中国南方地区温度距平场(a,色阶)和去趋势的温度距平场(b,色阶;蓝色矩形框为文中所指长江以南地区)及1979—2021年长江以南地区9月温度距平原始(红色粗柱状)与去趋势(蓝色细柱状)时间序列(c;红蓝色虚线为正负1倍标准差,红蓝色实线为2倍标准差)

Fig.1 Temperature anomalies (a, color scale) and temperature anomalies with the long-term trend removed (b, color scale, the blue rectangle is RSYR (regions south of the Yangtze River)) in southern China in September 2021, and time series of RSYR original (thick red column) and detrended (thin blue column) temperature anomalies in September from 1979 to 2021 (c; the red and blue dashed lines are one and minus one standard deviation, the red and blue solid lines are two times of standard deviation)

3 大气环流异常

2021年9月850 hPa位势高度及风场异常场(图2a)显示,长江以南地区至西北太平洋位势高度正异常、反气旋环流异常,环流异常中心位于台湾岛以东的洋面上,136°E、20°N附近存在气旋式环流异常及位势高度负异常。西北太平洋至长江以南地区受纬向拉长的反气旋环流异常控制,其中2021年9月148 dagpm等值线较气候平均的148 dagpm线位置偏西约30经度,这说明西太平洋副热带高压强度偏强且范围偏西。还注意到,长江以北至黄河中下游地区受气旋式环流异常及位势高度负异常的控制。对流层低层西北太平洋地区反气旋环流异常、长江以北地区气旋式环流异常,这样的环流异常可能和太平洋-日本(Pacific-Japan, PJ)/东亚-太平洋(East Asia-Pacific, EAP)型遥相关存在联系^[36-37]。

500 hPa位势高度异常及风场异常场(图2b)显

示,东亚至135°E以西的西北太平洋区域均为位势高度正异常和反气旋环流异常。由200 hPa位势高度异常及风场异常场(图2c)可以发现,长江以南地区东北侧受西北-东南向反气旋环流异常控制,西侧受气旋式环流异常控制,长江以南地区为上述反气旋环流西南侧的异常东南风和气旋环流异常东南侧的异常西南风辐合区域。高层辐合有利于长江以南地区受异常下沉气流控制,长江以南地区总云量负异常(图2d),从而有利于长江以南地区高温异常的产生和维持。

4 海温异常

为了揭示印度洋海温异常对2021年9月长江以南地区高温异常的影响,分析了2021年9月印度洋区域海温异常(图3a),注意到除热带东南印度洋海温正异常外,南印度洋大部分海域海温负异常,其中中南印度洋存在海温负异常绝对值大值区。为弄清

南印度洋海温异常是否和长江以南地区温度异常存在联系,计算了9月长江以南地区温度异常和同期海温异常相关系数空间分布(图3b),发现长江以南温度异常与热带东南印度洋(南印度洋)海温异常存在显著的正(负)相关关系,即热带东南印度洋(南印度洋)海温正(负)异常时长江以南地区温度正异常,反之亦然。将图3b中矩形框区域 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{S}$ 、 $95.5^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 和 $15^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{S}$ 、 $70^{\circ}\sim 97^{\circ}\text{E}$ 平均的海温异常(sea surface temperature anomalies, SSTAs)差定义为和华南温度异常相联系的南印度洋偶极子指数(index of the Southern Indian Ocean dipole, 简记为“ I_{SIOD} ”)。长江以南地区9月温度距平与 I_{SIOD} 相关系数为0.49,通过了95%置信度水平的显著性检验,进一步表明热带南印度洋海温异常可能和长江以南地区温度异常存在

联系。注意到,2021年9月 I_{SIOD} 指数为0.8倍标准差,这暗示2021年9月南印度洋海温异常可能对同期长江以南地区的高温异常存在一定的贡献。

有研究表明,南印度洋海温异常可通过调节东亚地区局地哈得来(Hadley)环流异常影响华南地区气候异常^[25,38]。而2021年9月,南印度洋海温异常对同期长江以南地区温度异常的影响机理如何?

5 南印度洋海温异常对长江以南地区高温异常的影响机制

前文分析表明,2021年9月长江以南地区高温异常事件可能受南印度洋海温异常的影响,下文将从环流异常和非绝热加热异常着手,揭示二者联系的物理机制。

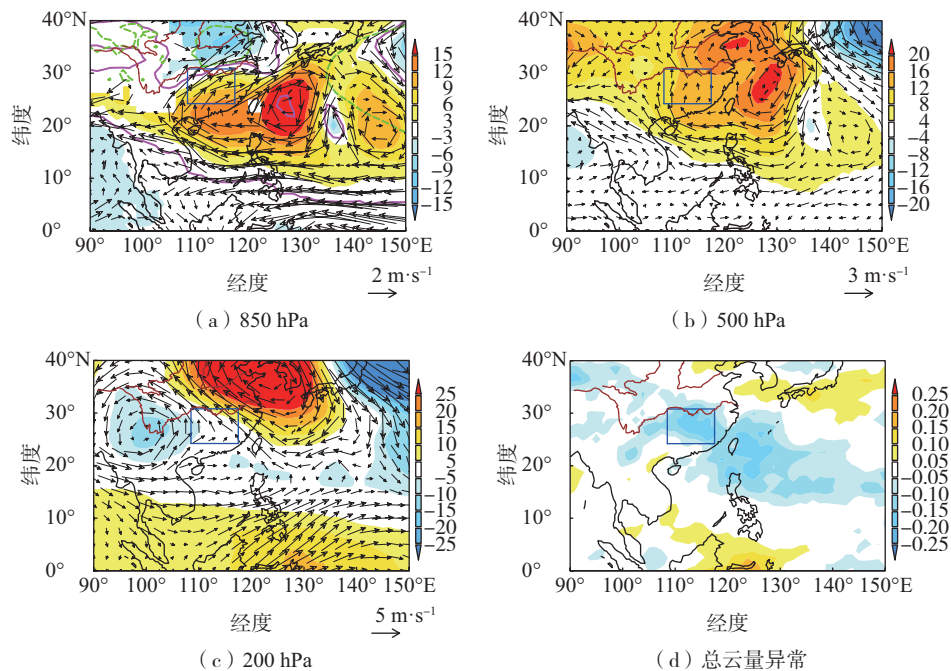
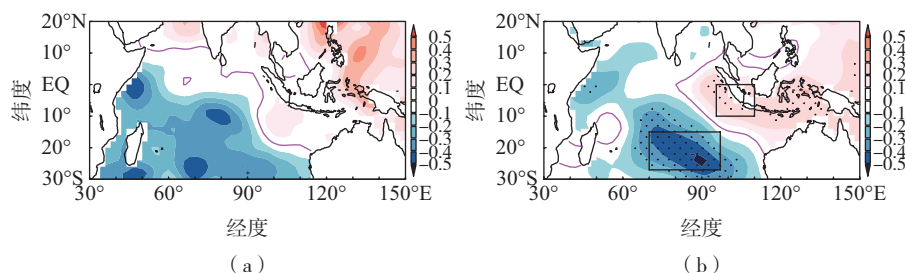


图2 2021年9月位势高度(色阶,单位:dagpm)、风场异常场(箭头)及总云量异常(色阶)分布(a中洋红色实线和绿色虚线分别为2021年和气候平均的148 dagpm等值线,蓝色矩形框为文中所指长江以南地区)

Fig.2 Geopotential height anomalies (color scale, units: dagpm), wind anomalies (vector), and anomalous total cloud cover during September 2021 (the magenta solid and green dashed lines in Fig.2a are 2021 and climatological mean 148 dagpm contours, respectively; the blue rectangle is RSYR)



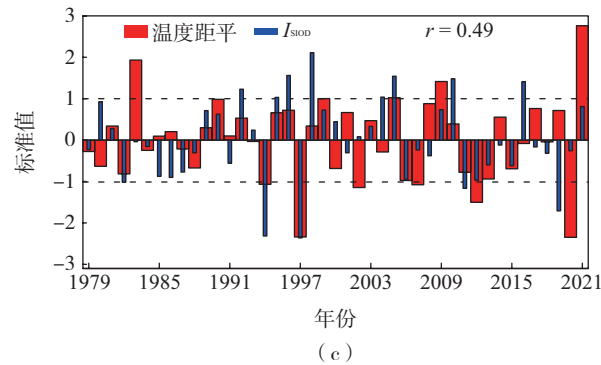


图3 2021年9月印度洋区域海温距平(a,色阶)及其与长江以南地区温度异常相关系数(色阶)空间分布(b,点阴影表示通过90%显著性检验)和1979—2021年标准化的长江以南地区9月温度距平及 I_{SIOD} 时间序列(c;虚线为正负1倍标准差,右上角数值为两者的相关系数)

Fig.3 SSTAs (a, color scale) in the Indian Ocean in September 2021, spatial distribution of correlation coefficient (color scale) between temperature anomalies over RSYR and SSTAs (b, the dotted areas denote the correlation coefficients statistically significant above the 90% confidence level), and normalized time series of September temperature anomalies over RSYR and I_{SIOD} from 1979 to 2021 (c; the dashed line is one and minus one standard deviation, and the value on the upper right corner is the correlation coefficient between the two)

由于2021年9月热带东南印度洋暖海温异常、南印度洋冷海温异常(图3a),与之相联系的850 hPa流函数及旋转风距平场(图4a)显示,热带印度洋沿赤道存在一对气旋式环流异常,海洋性大陆(10°S~20°N, 90°E~150°E; Maritime Continent, MC)^[39]至热带中太平洋东风异常。进一步分析表明,热带东南印度洋非绝热加热正异常(图5a),可通过Matsuno-Gill响应^[40-41]激发大气对流层低层产生上述环流异常。850 hPa和200 hPa速度势和辐散风距平场(图4b、c)显示,南印度洋冷海温异常(图3a)引起该海域上空对流层低层异常辐散、高层异常辐合,伴随异常下沉运动(图4d)。南印度洋上空的辐合辐散异常引起MC区域低层辐合(图4b)、高层辐散(图4c),受异常上升运动控制(图4d)。MC区域低层辐合还引起印度洋赤道两侧存在一对气旋式环流异常,热带西太平洋东风异常^[40]。热带西太平洋的东风异常增强了西太平洋副热带高压(图2a和图4a),西太平洋副热带高压的增强使得长江以南地区高温异常。另一方面,MC区域的辐合辐散异常增强了东亚地区局地哈得来环流,长江以南地区下沉运动增强(图4d)、总云量减少(图2d),也有利于长江以南地区接收更多的太阳辐射(图略),引起长江以南地区高温异常的产生。

非绝热加热异常(图5a)显示,长江以南至西北太平洋地区非绝热冷却、垂直温度平流正异常(图5b),并无显著的水平温度平流(图5c)。这表明长江以南地区

异常下沉气流的动力加热作用是造成2021年9月长江以南地区高温异常的主要原因。而MC区域和长江以北至黄河中下游地区的非绝热加热正异常(图5a),则由上升气流的动力冷却(图5b)所平衡。这说明中高纬度地区的环流异常可能也和2021年9月长江以南地区的高温异常事件存在联系,但是本文主要讨论南印度洋海温异常对长江以南地区此次高温异常事件的影响及机理,故不对上述问题进行深入讨论。同时注意到,南印度洋非绝热冷却(图5a)及弱的冷平流(图5c)抵消了下沉气流引起的动力加热(图5b)。上述分析表明,南印度洋冷海温异常还可通过垂直方向上的动力加热调节长江以南地区的温度异常。

6 数值试验结果

为了验证2021年9月南印度洋海温异常通过影响MC区域的环流异常,进而调节长江以南地区高温异常的物理机制,设计了2组数值试验。一组为控制试验,利用8—9月气候平均的海温场强迫模式积分2个月;另一组为敏感性试验,将南印度洋(0°~30°S, 30°~120°E)2021年9月海温异常叠加在模式自带的当月气候平均海温场上,并用其强迫模式从8月开始积分至9月。控制试验和敏感性试验各有15个成员,每个成员的初始条件略微存在差异,将敏感性试验和控制试验9月集合平均的结果进行差值合成分析,以验证通过观测资料所得结论。

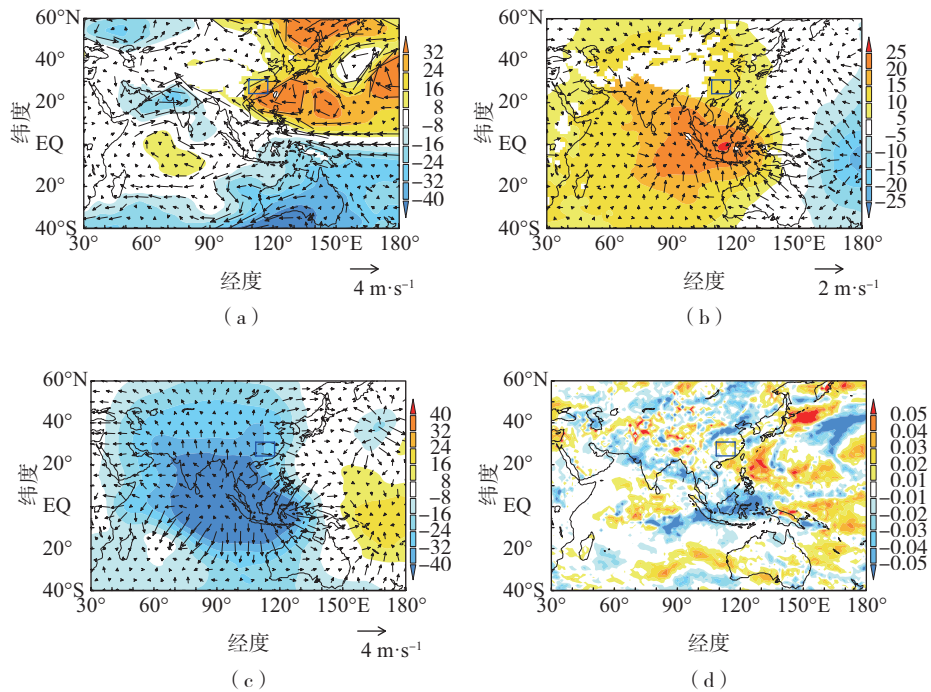


图4 850 hPa 流函数(色阶,单位: $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)及旋转风距平场(箭矢)(a),850 hPa(b)和200 hPa(c)速度势(色阶,单位: $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)及辐散风距平场(箭矢)和500 hPa 垂直速度距平场(d,色阶,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) (蓝色矩形框为文中所指长江以南地区)

Fig.4 Anomalous stream function (color scale, units: $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) and rotating wind (vector) at 850 hPa (a); anomalous velocity potential (color scale, units: $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) and divergent wind (vector) at 850 hPa (b) and 200 hPa (c); anomalous vertical velocity (d, color scale, units: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 500 hPa (the blue rectangle is RSYR)

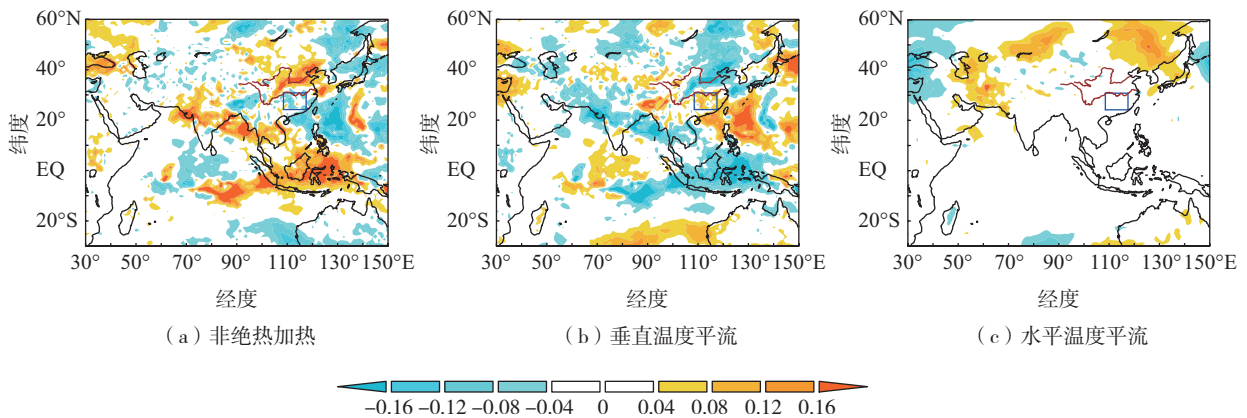


图5 1 000 hPa 至 100 hPa 的整层垂直积分异常场(色阶,单位: $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$;蓝色矩形框为文中所指长江以南地区)
Fig.5 Vertically integrated anomaly from 1 000 hPa to 100 hPa (color scale, units: $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$; the blue rectangle is RSYR)

敏感性试验和控制试验的表面温度差值合成场(图6)显示,尽管温度正异常的数值小于观测值,但长江以南地区温度正异常分布和观测的温度异常空间分布(图1b)一致,长江以南大部分地区表面温度偏高 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$,温度异常的极大值位于湖南中部地区,

大于 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。敏感性试验和控制试验的850 hPa 位势高度差值合成场(图7a)显示,当热带东南印度洋暖海温异常时,大气的罗斯贝(Rossby)波响应引起南印度洋和孟加拉湾至印度次大陆存在一对气旋式环流异常,且南印度洋的气旋式环流异常位置和观测(图

4a) 较为吻合。菲律宾群岛至南海地区东风异常,西北太平洋反气旋环流异常,东北亚地区气旋式环流异常,长江以南地区位于反气旋环流西北侧,西风异常显著,长江以南地区为位势高度正异常,这与西北太平洋地区的大气环流异常(图 2a)较为相似。

敏感性试验和控制试验的 850 hPa 速度势及辐散风的差值合成场结果(图 7b)显示,南印度洋冷海温异常引起低层异常辐散(图 7b)、高层异常辐合(图 7c),并引起苏门答腊岛以南至澳大利亚西侧海域低层辐合异常(图 7b)、高层辐散异常(图 7c),受异常上升运动控制(图 7d)。而 MC 区域的异常上升运动和西北太平洋地区的异常下沉运动(图 7d)则增强了东亚地区的局地哈得来环流,也有利于长江以南地区受异常下沉气流控制。同时,西北太平洋及长江以南地区受异常反气旋环流(图 7a)控制,低层异常辐散(图 7b)、高层异常辐合(图 7c),上述环流异常均有利于长江以南地区高温异常。尽管数

值试验部分区域的环流异常位置和观测存在一定的偏差,但是其结果基本可以再现南印度洋海温异常对长江以南地区高温异常事件影响的物理机制。

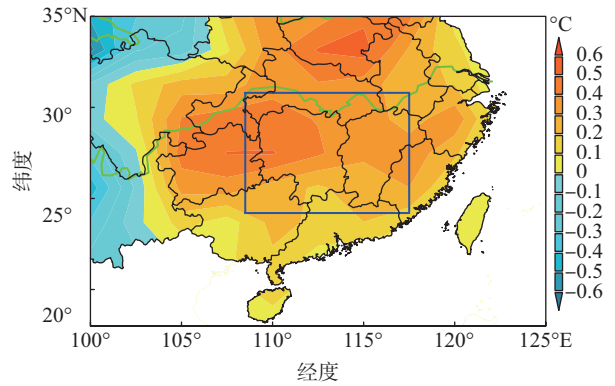


图 6 敏感性试验和控制试验的表面温度差值(色阶)合成场(蓝色矩形框为文中所指长江以南地区)

Fig.6 Composite variables of surface temperature difference (color scale) between sensitivity experiments and control experiment (the blue rectangle is RSYR)

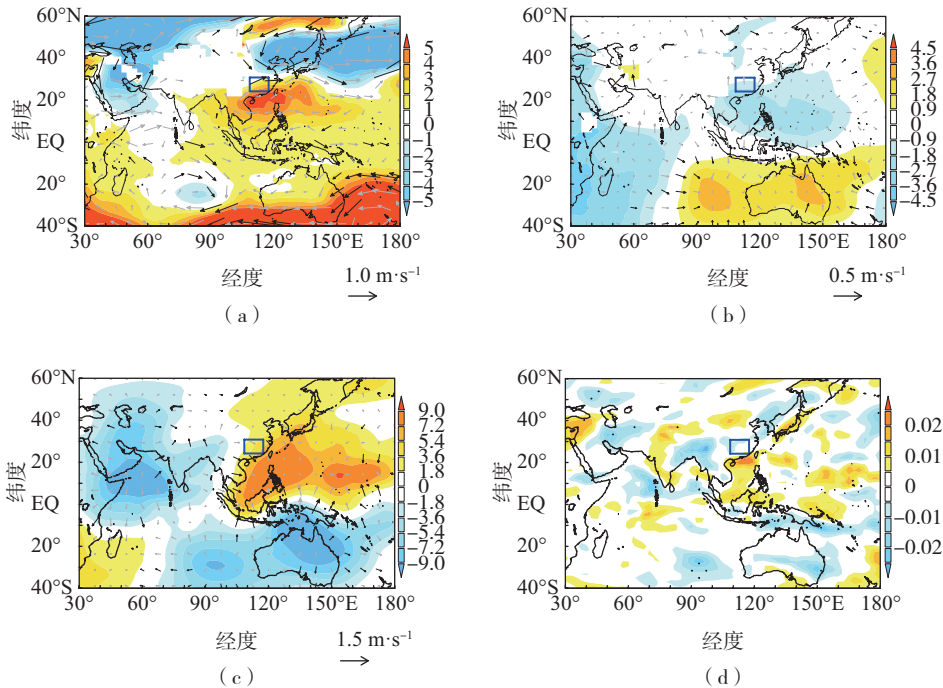


图 7 敏感性试验和控制试验的 850 hPa 位势高度(色阶,单位:dagpm)及风场差值合成场(箭头)(a),850 hPa(b)和 200 hPa(c)速度势(色阶,单位: $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)及辐散风差值合成场(箭头)和 500 hPa 垂直速度差值合成场(d,色阶,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)(蓝色矩形框为文中所指长江以南地区)

Fig.7 Composite variables of geopotential height difference (color scale, units: dagpm) and wind difference (vector) at 850 hPa (a); composite variables of velocity potential difference (color scale, units: $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) and divergent wind difference (vector) at 850 hPa (b) and 200 hPa (c); composite variables of vertical velocity difference (color scale, units: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 500 hPa (d) between sensitivity experiments and control experiment (the blue rectangle is RSYR)

观测结果和数值试验结果均显示,南印度洋海温异常时,该区域对流层低层异常辐散、高层异常辐合,并引起 MC 区域低层异常辐合、高层异常辐散。MC 区域上空的异常上升运动有利于东亚地区局地哈得来环流增强,长江以南地区受异常下沉气

流控制,高温异常。热带东南印度洋正 SSTAs 通过 Matsuno-Gill 响应,引起 MC 区域至热带西太平洋对流层低层东风异常,西北太平洋反气旋环流异常,使得西北太平洋副热带高压强度偏强且范围偏西,有利于维持长江以南的异常下沉运动(图 8)。

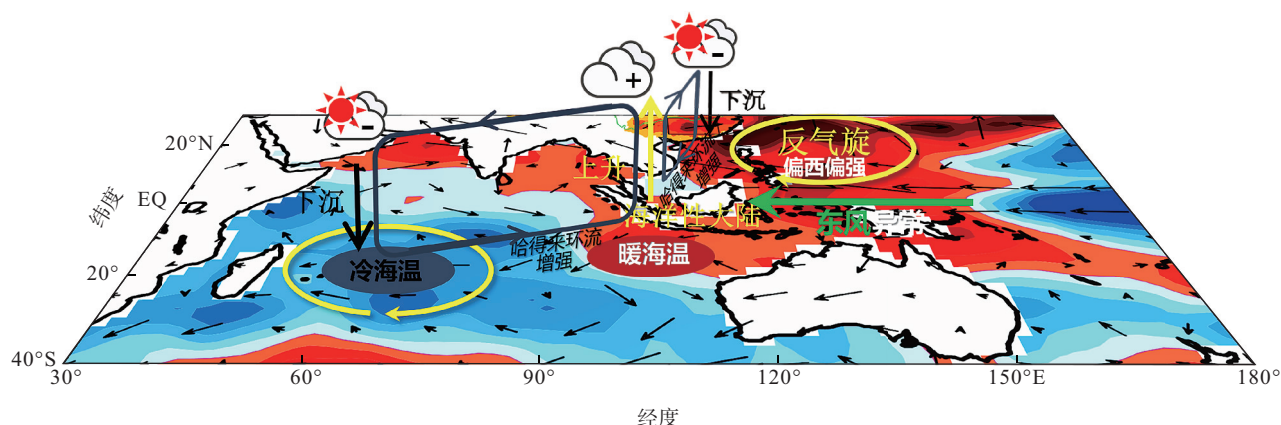


图 8 南印度洋海温异常对 2021 年 9 月长江以南地区高温异常的影响机制示意图

Fig.8 Schematic diagram of influencing mechanism of the southern Indian Ocean SSTAs on RSYR high temperatures in September 2021

7 结论

利用格点化数据集 CN05.1 高分辨率月平均温度资料、ERSSTv5 月平均海面温度资料和 ERA5 大气再分析资料分析了 2021 年 9 月长江以南地区高温异常及其和南印度洋海温异常的联系及机理,得到以下结论:

(1) 2021 年 9 月长江以南地区出现 1979 年以来温度的最高值,长江以南地区区域平均温度异常约为 3.33 °C,超过 2 倍标准差。去除长期线性趋势后,2021 年 9 月长江以南地区区域平均温度异常约为 2.46 °C,超过 2 倍标准差。

(2) 长江以南地区 2021 年 9 月温度异常和南印度洋海温异常存在密切联系。9 月热带东南印度洋暖海温异常、南印度洋大部分海域冷海温异常,分析表明 9 月南印度洋上述海温偶极型异常和长江以南同期温度正异常存在联系。

(3) 2021 年 9 月,南印度洋海温异常偏冷引起该海域上空对流层低层异常辐散、高层异常辐合,并引起 MC 区域低层辐合异常、高层辐散异常,受异常上升运动控制及东亚地区局地 Hadley 环流异常增强,有利于长江以南地区受异常下沉气流控制。另一方面,热带东南印度洋暖海温异常伴随着该区域

非绝热加热正异常,通过 Matsuno-Gill 响应引起热带印度洋沿赤道存在一对气旋式环流异常,MC 地区至热带西太平洋东风异常,增强了西北太平洋反气旋环流异常,也有利于维持长江以南的异常下沉运动。南印度洋的冷海温异常还可通过调节 MC 区域的非绝热加热异常进而引起长江以南地区的非绝热加热负异常。上述原因共同作用,造成了长江以南地区高温异常事件。同时,数值试验结果也验证了上述机制。

需要说明的是,本文仅分析了 2021 年 9 月南印度洋冷海温异常和热带东南印度洋暖海温异常对长江以南地区高温异常事件的影响机理,有研究指出印度洋海温异常和 ENSO 事件存在密切联系^[12,42]。而 2021 年秋季为拉尼娜事件发展期^[43-44],2021 年 9 月热带太平洋海温异常对长江以南地区高温异常是否有作用,南印度洋海温异常和热带太平洋海温异常是否对长江以南地区温度异常存在协同作用,另外北半球中高纬度地区的环流异常在此次长江中下游地区的高温异常事件中起到何种作用,本文所揭示的和长江以南地区温度异常存在联系的南印度洋偶极型海温异常和 Behera 等^[45]提出的南印度洋偶极子是否存在联系,上述问题未来均需要进行深入研究。

致谢:本论文的数值计算得到了南京信息工程大学高性能计算中心的计算支持和帮助。

参考文献:

- [1] 杨辉,李崇银.2003年夏季中国江南异常高温的分析研究[J].气候与环境研究,2005,10(1):80-85.
- [2] 王文,许金萍,蔡晓军,等.2013年夏季长江中下游地区高温干旱的大气环流特征及成因分析[J].高原气象,2017,36(6):1595-1607.
- [3] 张剑明,段丽洁.2013年夏季湖南省持续高温干旱变化特征及其成因分析[J].气象与环境学报,2018,34(4):45-51.
- [4] 王静文,孙即霖,宁方悦.2018年盛夏副热带高压极端偏北的原因分析[J].海洋气象学报,2021,41(2):14-23.
- [5] ZHAO L, KOBAYASI K, HASEGAWA T, et al. Traits responsible for variation in pollination and seed set among six rice cultivars grown in a miniature paddy field with free air at a hot, humid spot in China[J]. Agric Ecosyst Environ,2010,139(1/2):110-115.
- [6] CHEN R D, WEN Z P, LU R Y. Interdecadal change on the relationship between the mid-summer temperature in South China and atmospheric circulation and sea surface temperature[J]. Climate Dyn,2018,51(5):2113-2126.
- [7] GUAN Z Y, YAMAGATA T. The unusual summer of 1994 in East Asia; IOD teleconnections[J]. Geophys Res Lett,2003,30(10):1544.
- [8] HUO L W, GUAN Z Y, JIN D C, et al. The interdecadal variations and causes of the relationship between autumn precipitation anomalies in eastern China and SSTA over the southeastern tropical Indian Ocean[J]. Climate Dyn, 2023,60(3/4):899-911.
- [9] HU K M, HUANG G, HUANG R H. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China [J]. J Climate, 2011, 24(20): 5365-5377.
- [10] HU K M, HUANG G, QU X, et al. The impact of Indian Ocean variability on high temperature extremes across the southern Yangtze River valley in late summer[J]. Adv Atmos Sci,2012,29(1):91-100.
- [11] LIU G, WU R G, WANG H M, et al. Effect of tropical Indian Ocean thermal condition during preceding winter on summer high temperature anomalies over the southern Yangtze River valley[J]. Int J Climatol,2017,37(8): 3478-3490.
- [12] XIE S P, HU K M, HAFNER J, et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. J Climate, 2009, 22(3):730-747.
- [13] XIE S P, KOSAKA Y, DU Y, et al. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: a review[J]. Adv Atmos Sci,2016, 33(4):411-432.
- [14] WANG B, WU R G, FU J X. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? [J]. J Climate,2000,13(9):1517-1536.
- [15] CHEN W, LU R Y, DONG B W. Intensified anticyclonic anomaly over the western North Pacific during El Niño decaying summer under a weakened Atlantic thermohaline circulation[J]. J Geophys Res: Atmos,2014,119(24): 13637-13650.
- [16] HUANG R H, WU Y F. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism[J]. Adv Atmos Sci,1989,6(1):21-32.
- [17] 吴胜安,邢彩盈,朱晶晶.南海区域对流活动的气候特征及其与 ENSO 的关系[J].海洋气象学报,2019, 39(4):75-82.
- [18] LU R Y. Interannual variability of the summertime North Pacific subtropical high and its relation to atmospheric convection over the warm pool[J]. J Meteor Soc Japan Ser II,2001,79(3):771-783.
- [19] CHEN Z S, WEN Z P, WU R G, et al. Relative importance of tropical SST anomalies in maintaining the western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño to La Niña transition years[J]. Climate Dyn,2016, 46(3):1027-1041.
- [20] HU K M, HUANG G, WU R G. A strengthened influence of ENSO on August high temperature extremes over the southern Yangtze River valley since the late 1980s[J]. J Climate,2013,26(7):2205-2221.
- [21] LUO M, LAU N C, ZHANG W, et al. Summer high temperature extremes over China linked to the Pacific meridional mode[J]. J Climate,2020,33(14):5905-5917.
- [22] CHEN R D, WEN Z P, LU R Y. Evolution of the circulation anomalies and the quasi-biweekly oscillations associated with extreme heat events in southern China [J]. J Climate,2016,29(19):6909-6921.
- [23] CHEN Y, ZHAI P M. Simultaneous modulations of precipitation and temperature extremes in southern parts of China by the boreal summer intraseasonal oscillation [J]. Climate Dyn,2017,49(9):3363-3381.

- [24] JIN D C, GUAN Z Y, TANG W Y. The extreme drought event during winter-spring of 2011 in East China: combined influences of teleconnection in midhigh latitudes and thermal forcing in Maritime Continent region [J]. *J Climate*, 2013, 26(20): 8210-8222.
- [25] JIN D C, GUAN Z Y, HUO L W, et al. Possible impacts of spring sea surface temperature anomalies over South Indian Ocean on summer rainfall in Guangdong-Guangxi region of China [J]. *Climate Dyn*, 2017, 49(9): 3075-3090.
- [26] FRICH P, ALEXANDER L V, DELLA-MARTA P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century [J]. *Clim Res*, 2002, 19(3): 193-212.
- [27] HU L S, HUANG G, QU X. Spatial and temporal features of summer extreme temperature over China during 1960-2013 [J]. *Theor Appl Climatol*, 2017, 128(3): 821-833.
- [28] 邓悦, 屈文军. 中国夏季干湿型热浪天气时空分布及环境舒适度评价 [J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(2): 34-45.
- [29] DING T, QIAN W H, YAN Z W. Changes in hot days and heat waves in China during 1961-2007 [J]. *Int J Climatol*, 2010, 30(10): 1452-1462.
- [30] WEI K, CHEN W. An abrupt increase in the summer high temperature extreme days across China in the mid-1990s [J]. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(5): 1023-1029.
- [31] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1102-1111.
- [32] HUANG B Y, THORNE P W, BANZON V F, et al. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons [J]. *J Climate*, 2017, 30(20): 8179-8205.
- [33] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [34] YANAI M, ESBENSEN S, CHU J H. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets [J]. *J Atmos Sci*, 1973, 30(4): 611-627.
- [35] BOGENSCHUTZ P A, GETTELMAN A, HANNAY C, et al. The path to CAM6: coupled simulations with CAM5.4 and CAM5.5 [J]. *Geosci Model Dev*, 2018, 11(1): 235-255.
- [36] 黄荣辉, 沈如金, 吴津生. 东亚大气环流国际讨论会 [J]. *中国科学院院刊*, 1987, 2(3): 276-277.
- [37] NITTA T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 1987, 65(3): 373-390.
- [38] HUO L W, JIN D C. The interannual relationship between anomalous precipitation over southern China and the south eastern tropical Indian Ocean sea surface temperature anomalies during boreal summer [J]. *Atmos Sci Lett*, 2016, 17(11): 610-615.
- [39] RAMAGE C S. Role of a tropical "maritime continent" in the atmospheric circulation [J]. *Mon Wea Rev*, 1968, 96(6): 365-370.
- [40] MATSUNO T. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area [J]. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 1966, 44(1): 25-43.
- [41] GILL A E. Some simple solutions for the heat-induced tropical circulation [J]. *Q J Roy Meteor Soc*, 1980, 106(449): 447-462.
- [42] ZHANG W J, YU Z L, JIANG F, et al. Important role of the ENSO combination mode in the maintenance of the anomalous anticyclone over the western North Pacific in boreal summer [J]. *Sci China Earth Sci*, 2022, 65(7): 1379-1387.
- [43] SUN B, WANG H J, LI H X, et al. A long-lasting precipitation deficit in South China during autumn-winter 2020/2021: combined effect of ENSO and Arctic sea ice [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2022, 127(6): e2021JD035584.
- [44] FANG X H, ZHENG F, LI K X, et al. Will the historic southeasterly wind over the equatorial Pacific in March 2022 trigger a third-year La Niña event? [J]. *Adv Atmos Sci*, 2023, 40(1): 6-13.
- [45] BEHERA S K, YAMAGATA T. Subtropical SST dipole events in the southern Indian Ocean [J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(2): 327-330.