

谭桂容,张祎.2022年夏季中国高温的环流异常特征[J].海洋气象学报,2023,43(2):31-41.

TAN Guirong, ZHANG Yi. Characteristics of circulation anomalies associated with the heat-wave events over China in summer 2022 [J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(2): 31-41. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.02.003. (in Chinese)

2022年夏季中国高温的环流异常特征

谭桂容^{1,2}, 张祎²

(1.南京信息工程大学大气科学与环境气象国家级实验教学示范中心,江苏南京 210044;2.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)

摘要: 基于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)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),以及美国国家环境预报中心和国家大气研究中心 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)/NCAR(National Center for Atmospheric Research)逐月全球再分析资料,采用相关、回归、合成及物理量诊断等方法,对2022年夏季中国大范围高温相关环流异常的可能成因进行了分析。结果表明:(1)2022年夏季南亚高压偏强并分别向东、西方向扩展,西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)异常偏强西伸。2022夏季为拉尼娜(La Niña)年,但热带大西洋垂直上升环流相对西太平洋更强,且热带印度洋到西太平洋热带垂直上升环流异常也偏强。(2)2022年热带大西洋、印度洋到西太平洋上空垂直环流异常和 La Niña 共同作用,使得夏季南亚高压和西太平洋副高极端异常。La Niña 和印度洋到西太平洋垂直环流异常有利于南亚高压和西太平洋副高的偏强西伸;热带大西洋环流异常则既有利于南亚高压的加强及东扩,也有利于西太平洋副高偏强西伸。(3)印度洋到西太平洋垂直环流主要通过局地经向哈得来(Hadley)环流影响青藏高原到中国东部的环流异常,表现为青藏高原到中国东部中低层为显著的辐散异常;热带大西洋则通过引起纬向风异常(急流异常),激发遥相关波列并向下游传播,进而影响青藏高原到中国东部地区的环流异常。

关键词: 夏季大范围高温;南亚高压;西太平洋副热带高压;遥相关;环流异常

中图分类号: P434;P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)02-0031-11

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.02.003

Characteristics of circulation anomalies associated with the heat-wave events over China in summer 2022

TAN Guirong^{1,2}, ZHANG Yi²

(1. National Demonstration Center for Experimental Atmospheric Science and Environmental Meteorology Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ERSSTv5 (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5) and monthly reanalysis data from NCEP (National Centers for Environmental Prediction)/NCAR (National Center for Atmospheric Research), the possible

收稿日期:2022-12-09;修回日期:2023-02-23

基金项目:国家自然科学基金项目(42175035)

第一作者简介:谭桂容,女,博士,研究员,主要从事短期气候异常成因研究,tanguirong@nuist.edu.cn。

causes of the circulation anomalies related to the wide-range heat-wave events in summer (JJA, from June to August) 2022 over China are investigated by correlation, regression, composite analysis, and diagnosis of physical quantities. The results are shown below. (1) The SAH (South Asia high) in JJA 2022 is strong and extends eastward and westward, and the WPSH (western Pacific subtropical high) is also strong and extends westward. It is in phase of La Niña during summer 2022, but the vertical ascending circulations over the TA (tropical Atlantic) are stronger than those over the WP (western Pacific), and the vertical ascending circulations from the TIO (tropical Indian Ocean) to WP are also abnormally strong. (2) The combined effects of anomalous vertical circulations over TA, TIO, WP and La Niña result in the extreme abnormalities of SAH and WPSH in JJA 2022. La Niña and the abnormally strong vertical circulations from TIO to WP are helpful for the strengthening and westward expansion of SAH and WPSH. The abnormal vertical circulations over TA tend to help not only the strengthening and eastward expansion of SAH, but also the strengthening and westward expansion of WPSH. (3) The vertical circulations from TIO to WP mainly affect the circulation anomalies from the TP (Tibetan Plateau) to eastern China through local meridional Hadley circulation, characterized by the significant divergence anomaly from TP to eastern China in the mid- and low levels. However, the vertical circulations over TA can stimulate teleconnection wave train and then propagate downstream by causing zonal wind anomalies (jet stream anomalies), which then affect the circulation anomalies from TP to eastern China.

Keywords: wide-range heat-wave event in summer; South Asia high (SAH); western Pacific subtropical high (WPSH); teleconnection pattern; circulation anomaly

引言

2022年6月和8月,全国平均气温分别为 $21.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,较常年同期偏高 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,为1961年以来历史同期最高。2022年7月,全国平均气温为 $23.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,较常年同期($22.2\text{ }^{\circ}\text{C}$)偏高 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,为1961年以来历史同期第2高(仅次于2017年)。2022年6—8月,中国中东部地区($100^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$, $24^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$)极端高温事件频次明显偏多,且日最高气温超过 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温日数明显偏多,长江中下游流域最为显著^[1-2]。2022年6月中旬起西太平洋副热带高压(以下简称“西太副高”)加强西伸,与大陆高压合并;7—8月几乎一直控制整个长江流域,同时欧亚大陆中高纬西风带环流较平直,青藏高原低涡活动偏弱,导致长江流域出现持续高温少雨天气^[3-5]。

南亚高压偏东偏北、高空西风急流增强东伸、西太副高北抬西伸及其长期维持都是导致中国东部高温事件发生的原因^[6-7]。其中,西太副高是夏季中国东部其可能控制区域高温干旱最主要和最直接的影响系统,大陆高压东伸和西风带高压脊可以与西太副高合并加强,也对中国的高温有影响。南亚高压与西太副高的强度、面积指数变化均呈显著正相关,其脊点(南亚高压的东伸脊点、西太副高的西伸脊点)平均位置变化具有“相向而行、相背而去”的互动趋势,是

影响中国高温的主要系统^[5,8]。那么究竟是什么原因导致的上述环流异常呢?多圈层相互作用(如热带海-气相互作用和北极冰-气相互作用)以及可能具有不同的时间尺度^[1,7-11],包括年际、年代际甚至更长时间尺度的信号都可能造成环流异常^[8-11]。如太平洋年代际涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)负位相,会在南海和菲律宾海引起气旋异常,并在其北侧的东亚中纬度地区引起反气旋异常,导致中国东部和南方地区产生下沉运动异常和水汽辐散异常,可为2022年夏季中国中东部的高温干旱天气提供有利的年代际气候背景^[11]。赤道中东太平洋冷异常、西太平洋暖异常、北大西洋三极子型可能是导致中国高温事件发生的海面温度(以下简称“海温”)分布型^[1,7-9]。2022年中高纬度环流异常,如源自北大西洋地区的扰动异常偏强,但其在沿中高纬西风带向东传播时没有出现在东亚向长江中下游地区及东南沿海传播的特征,造成冷空气活动位置偏北、偏东^[3]。2022年夏季对流层底层或整层,热带对流区(视热源)位置异常偏南到赤道以南,造成东亚地区哈得来(Hadley)垂直经圈环流上升支异常偏南,也有利于长江中下游的高温干旱^[3]。此外,近几十年,全球表面气温迅速增加,尤其是中国地区的显著增温趋势,是2022年夏季中国中东部极端高温天气的重要气候背景^[1]。

2022年夏季西太副高极端异常偏强偏西。拉

尼娜(La Niña)年,一般西太副高偏北偏弱^[12-14],虽然变暖以来,La Niña年西太副高偏强,但其对2022年夏季中国东部干旱高温有一定的贡献^[1]。已有的研究从全球变暖、年代际背景对2022年夏季高温的可能成因进行了分析^[1],从年际到次季节上强调了南海及菲律宾附近对流位置异常与源自北大西洋中纬度扰动异常的协同作用对2022年长江流域夏季出现异常的干旱高温气候事件的重要影响,但主要着重于西太副高和高温异常,对于南亚高压环流异常的研究较少^[2-5],对于西太副高的极端异常还需要进一步的研究。本文拟在以往研究的基础上,进一步探讨2022年夏季东亚环流异常的原因,为预测及防御灾害提供物理因素的参考。

1 资料和方法

使用的资料主要有:(1)美国国家环境预报中心和国家大气研究中心 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)/NCAR(National Center for Atmospheric Research)提供的1981年1月—2022年8月逐月高低层高度场、风场、垂直速度场、温度场等再分析大气环流资料,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ^[15];(2)美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration,NOAA)全球范围扩展重建海温资料第5版本(Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5,ERSSTv5),空间分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ 。文中流函数和势函数采用风场资料计算得到。

所有资料长度均为1981—2022年共42 a,取夏季6、7、8月。为了消除季节变化的影响,对所用的数据均做距平处理,处理时用1981—2020年共40 a平均作为气候场。

根据Takaya等^[16]提出的TN通量方程式计算二维波作用通量:

$$W = \frac{p \cos \varphi}{2 a^2 |\bar{U}|} \left[\begin{array}{l} \frac{\bar{u}}{\cos^2 \varphi} (\psi_\lambda'^2 - \psi' \psi_{\lambda\lambda}') + \frac{\bar{v}}{\cos \varphi} (\psi_\lambda' \psi_\varphi' - \psi' \psi_{\lambda\varphi}') \\ \frac{\bar{u}}{\cos \varphi} (\psi_\lambda' \psi_\varphi' - \psi' \psi_{\lambda\varphi}') + \bar{v} (\psi_\varphi'^2 - \psi' \psi_{\varphi\varphi}') \end{array} \right]$$

其中, ψ 表示流函数, $\bar{U}=(\bar{u},\bar{v})$ 为1981—2020年夏季平均的水平风速,'代表异常, p =气压/1000, a 为地球半径, λ 为地理经度, φ 为地理纬度。波作用通量在近似假定下与波的位相无关,而与定常罗斯贝

(Rossby)波列的局地群速度方向一致,反映了Rossby群波能量的频散方向。

为了对比分析厄尔尼诺/拉尼娜(El Niño/La Niña)年的环流,典型的El Niño/La Niña按照国家气候中心网站(http://cmdp.ncc-cma.net/download/ENSO/Monitor/ENSO_history_events.pdf)公布的历年El Niño/La Niña年事件,选取1981年以来东部型的年份,分别为1982、1986、1991、1994、1997、2006、2014/1984、1988、1995、1998、2007、2010、2017年。由于2022年海温呈现拉尼娜型特征,本文合成差值将用拉尼娜年减去厄尔尼诺年对应的异常。

热带大西洋振幅趋向指数(amplitude trend index,ATI)定义为 $10^\circ \text{S} \sim 10^\circ \text{N}$ 、 $50^\circ \text{W} \sim 0^\circ$ 区域850 hPa势函数异常的平均。因为势函数能够反映非地转强迫的源汇,所以应用该指数可以表示热带大西洋强迫异常。2022年热带大西洋强迫异常较强,故拟运用ATI指数分析热带大西洋强迫对夏季高温环流的影响。

2 环流特征

南亚高压偏东偏北、西太副高北抬西伸及长期维持导致中国东部高温事件^[7-8]。夏季西太副高控制下,晴热高温,且低层偏南气流引起的暖平流输送也有利于区域气温的异常偏高^[1,5,17-18]。2022年异常西伸的西太副高导致长江流域被下沉运动控制,造成该地区严重的高温干旱气候异常^[1-8]。南亚高压则与西太副高具有“相向而行、相背而去”的互动变化。由图1可见,2022年夏季南亚高压偏强,且范围偏大,同时向东、西方向扩展,其中16800 gpm等值线东脊点相对气候平均状况偏东 20° 左右(图1a)。西太副高的强度和范围比气候态偏大,特别在 140°E 以西的中国大部分地区为正的高度距平,5880 gpm等值线的西脊点比气候值偏西 30° 以上,青藏高原上空的大陆高压脊也异常偏强(图1b)。与正高度异常对应的中国大部分地区为异常的下沉运动(图1c),且除东南沿海外,中国大部地区850 hPa为正异常的温度平流(图1d)。该区域的负温度平流距平仅出现在2022年6月,且与该月该区域的温度负距平对应一致;2022年7、8月为显著的正温度平流,也与区域相应的气温偏高一致。由2022年中国夏季高温异常中心在长江流域的分布看,低层温度平流正异常对于2022年夏季高温异常也有较大的贡献。

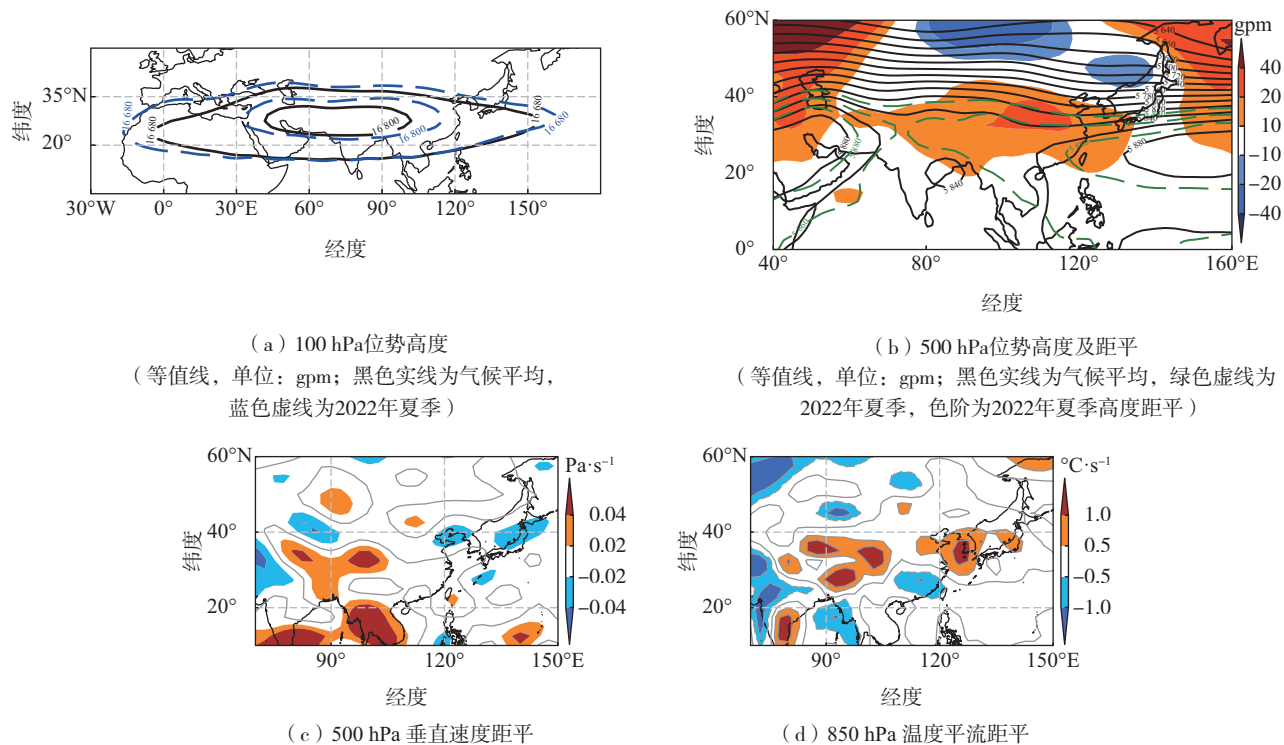
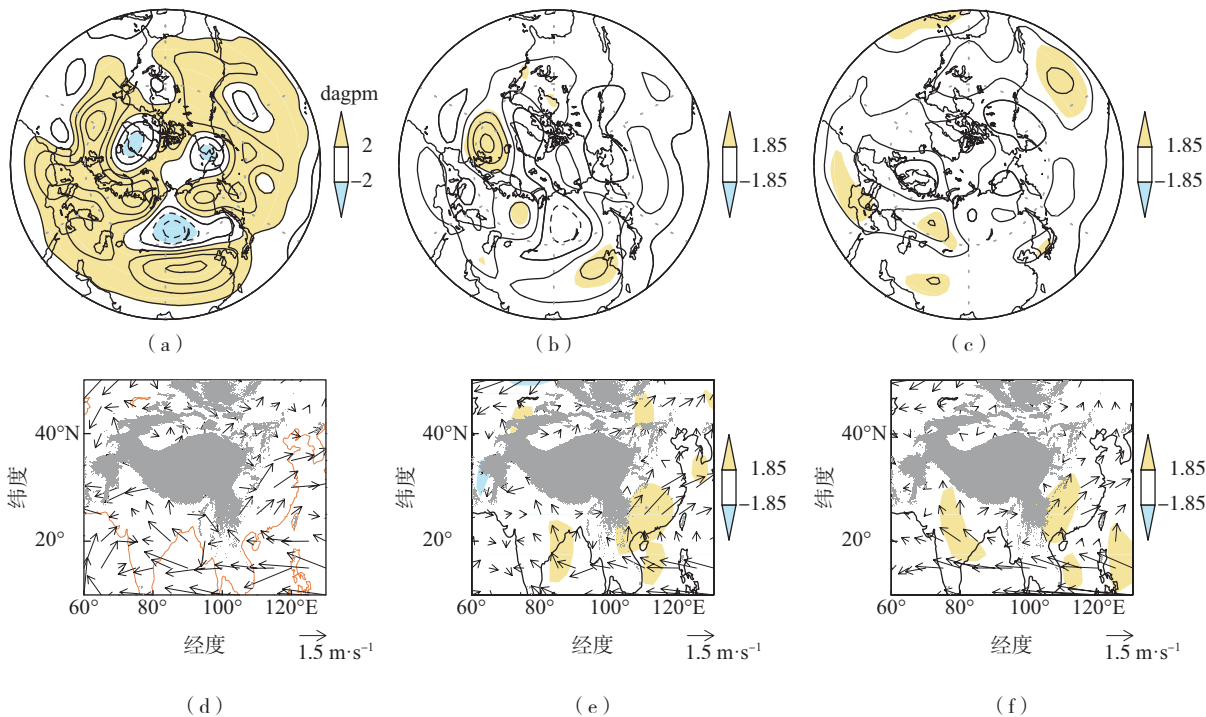


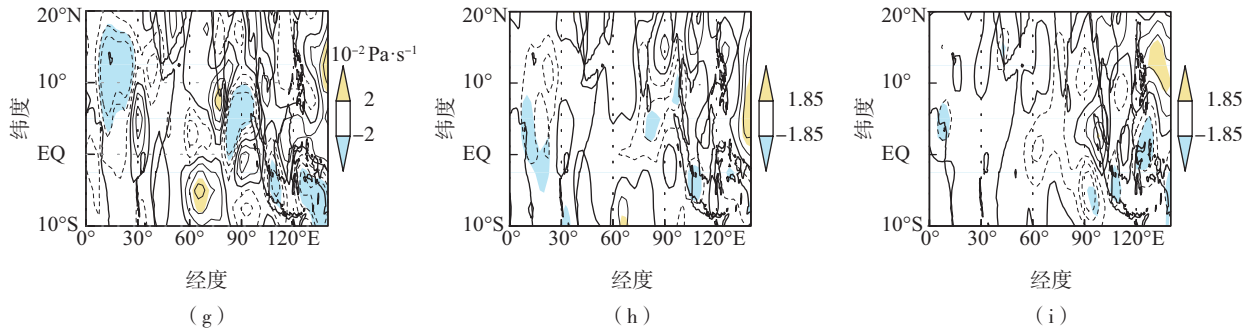
图1 2022年夏季东亚环流异常

Fig.1 Circulation anomaly in East Asia in JJA 2022

由北半球 300 hPa 高度场(图 2a)看,2022 年夏季欧亚中高纬存在一个从北大西洋到青藏高原及中国东部上空的距平波列,对应在青藏高原到中国东部为强的正异常中心。在低层 850 hPa(图 2d),青

藏高原南侧为东风异常,中国东部为显著的南风异常,即对应南亚季风偏弱,东亚夏季风偏强。中国东部的南风异常与图 1d 中国东部大部分区域的正温度平流对应一致。





a、d、g—2022年夏季距平,b、e、h—ATI典型正负异常年合成,c、f、i—La Niña/El Niño年合成差值;
a、b、c—等值线间隔为2 dagpm,g、h、i—等值线间隔为 $10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$;b、c、e、f、h、i中色阶区为
显著性水平超过0.05的区域,a、g中色阶区为距平绝对值超过2的区域。

图2 夏季300 hPa高度场(a—c;等值线,单位:dagpm)、850 hPa风场(d—f;箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、500 hPa垂直速度异常(g—i;等值线,单位: $10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.2 Geopotential height anomaly (a/b/c; contour, units: dagpm) at 300 hPa, wind anomaly (d/e/f; vector, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 850 hPa, and vertical velocity anomaly (g/h/i; contour, units: $10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) at 500 hPa in JJA

3 热带强迫

2022年夏季西太副高异常偏强和西伸,南亚高压异常偏强并向东扩展。那么造成2022年夏季西太副高和南亚高压如此异常的原因是什么呢?由图3a可见,2022年夏季海温在热带东太平洋、西印度洋偏低,而在热带大西洋和西太平洋到东印度洋为正异常。2022年1—8月,热带太平洋呈现La Niña型海温异常。拉尼娜年西太副高一般偏北偏弱,虽然暖背景下La Niña年西太副高也偏强偏西(西伸脊点大约在 120°E),但2022年夏季西太副高加强,异常西伸 30° 以上(西伸脊点大约在 100°E),导致长江及华南地区大范围的高温干旱。由2022年夏季热带大气大尺度响应异常(图3)看,850 hPa势函数异常主要在热带大西洋和东太平洋,热带西太平洋的势函数异常相对较弱;而在200 hPa,热带大西洋、西太平洋和东太平洋的势函数异常都明显。有研究表明北大西洋与中国夏季极端高温存在密切关系^[19],其实热带大西洋异常可以引起北大西洋涛动(North Atlantic Qscillation, NAO)型环流异常^[20-23],进而通过遥相关影响到东亚环流和气候异常。计算850 hPa热带区域($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}, 50^{\circ}\text{W}\sim 0^{\circ}$)平均的势函数异常作为热带对大气强迫作用的指数,可得到热带大西洋指数,记为ATI。由图4可见,ATI存在较大的年际变化,特别是2017年以来的变幅增大明显。根据标准化ATI绝对值大于1.0的年份,选取典型的正负异常年,分别为:1989、1995、1999、2008、2020、2021、2022/1992、

2001、2002、2004、2012、2014、2015年。

为进一步分析2022年夏季环流异常的成因,对ATI典型正负异常年和La Niña/El Niño年的环流进行合成分析。在300 hPa正负ATI典型年合成的位势高度差值图(图2b)上,从北大西洋到中国东部上空存在显著的波列结构异常,其中在中国东部到青藏高原的正高度异常有利于夏季南亚高压的偏强东伸。850 hPa风场(图2e)上,在中国东部为显著的南风异常,反映东亚夏季风偏强;在南亚的低纬度地区为明显的东风异常,表明南亚夏季风偏弱。La Niña/El Niño年合成的300 hPa位势高度差值图(图2c)上,北大西洋到亚洲同样存在波列型环流异常,但在东亚不明显;850 hPa风场(图2f)上,其环流异常特征与ATI典型年合成差值(图2e)很相似,在中国东部也为显著的南风异常,在南亚的低纬度地区为明显的东风异常。与2022年夏季300 hPa高度场和850 hPa风场(图2a、d)对比可见:2022年高层高度场异常与ATI典型年合成差值的分布相似,只是强度更强;但与La Niña/El Niño年合成差值差别较大;850 hPa风场上,2022年夏季风场在南亚及中国东部与ATI及La Niña/El Niño年合成差值都类似,反映东亚夏季风偏强,南亚夏季风偏弱。由500 hPa垂直速度场(图2g)可见,2022年热带大西洋、印度洋到热带西太平洋存在异常的上升运动,ATI典型年(图2h)和La Niña/El Niño年(图2i)合成差值场表现出类似的特征,但La Niña/El Niño年合成差值显著区主要在 90°E 以东的印度洋到西太平洋。三者 90°E 以东的

热带垂直环流相似,其对南亚到中国东部的低层环流的影响也类似;但2022年夏季及ATI典型年在青藏

高原南侧的 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$ 附近存在较强的垂直上升运动,其可能对南亚高压异常偏强有重要作用。

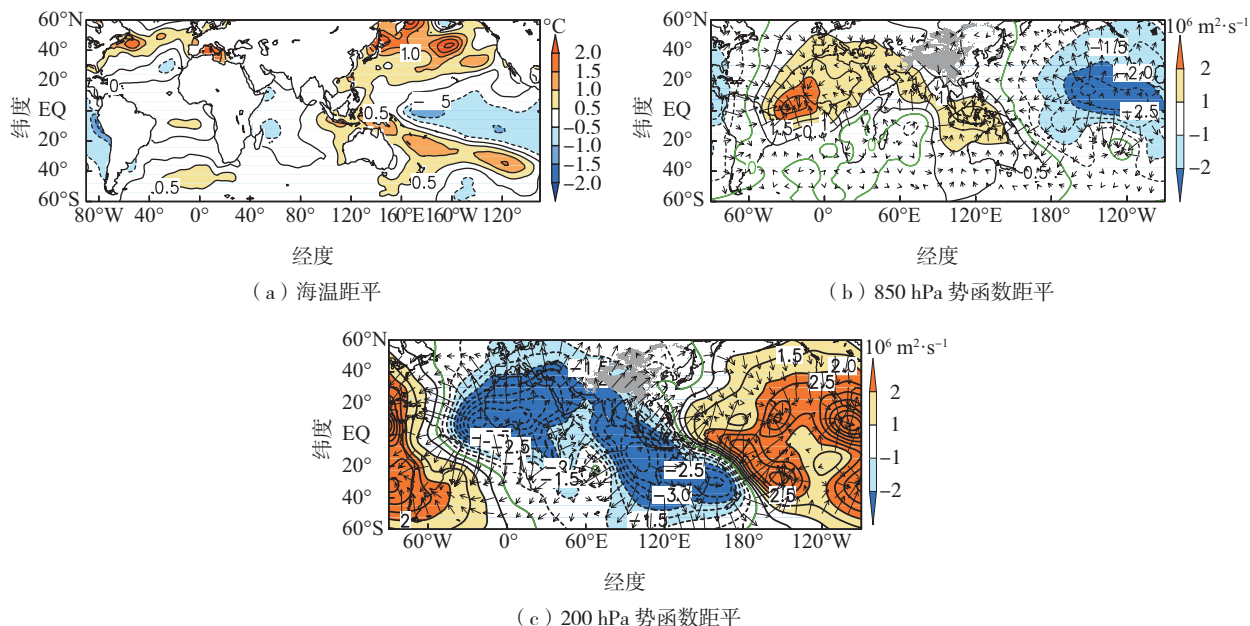


图3 2022年夏季海温(a)和850 hPa(b)、200 hPa(c)势函数距平

Fig.3 Sea surface temperature (a) and potential function anomaly at 850 hPa (b) and 200 hPa (c) in JJA 2022

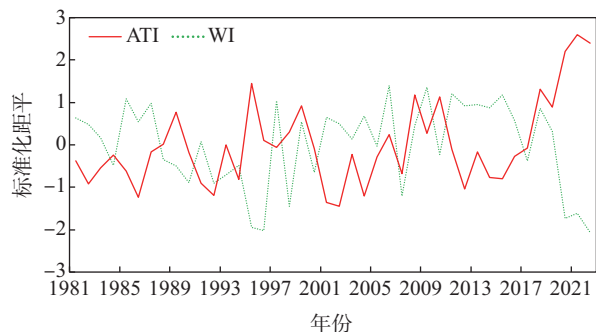


图4 夏季热带大西洋环流指数ATI、($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$)垂直速度指数WI的年变化

Fig.4 Annual variation of ATI for circulation over the tropical Atlantic and vertical velocity index WI for the area ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$) in summer

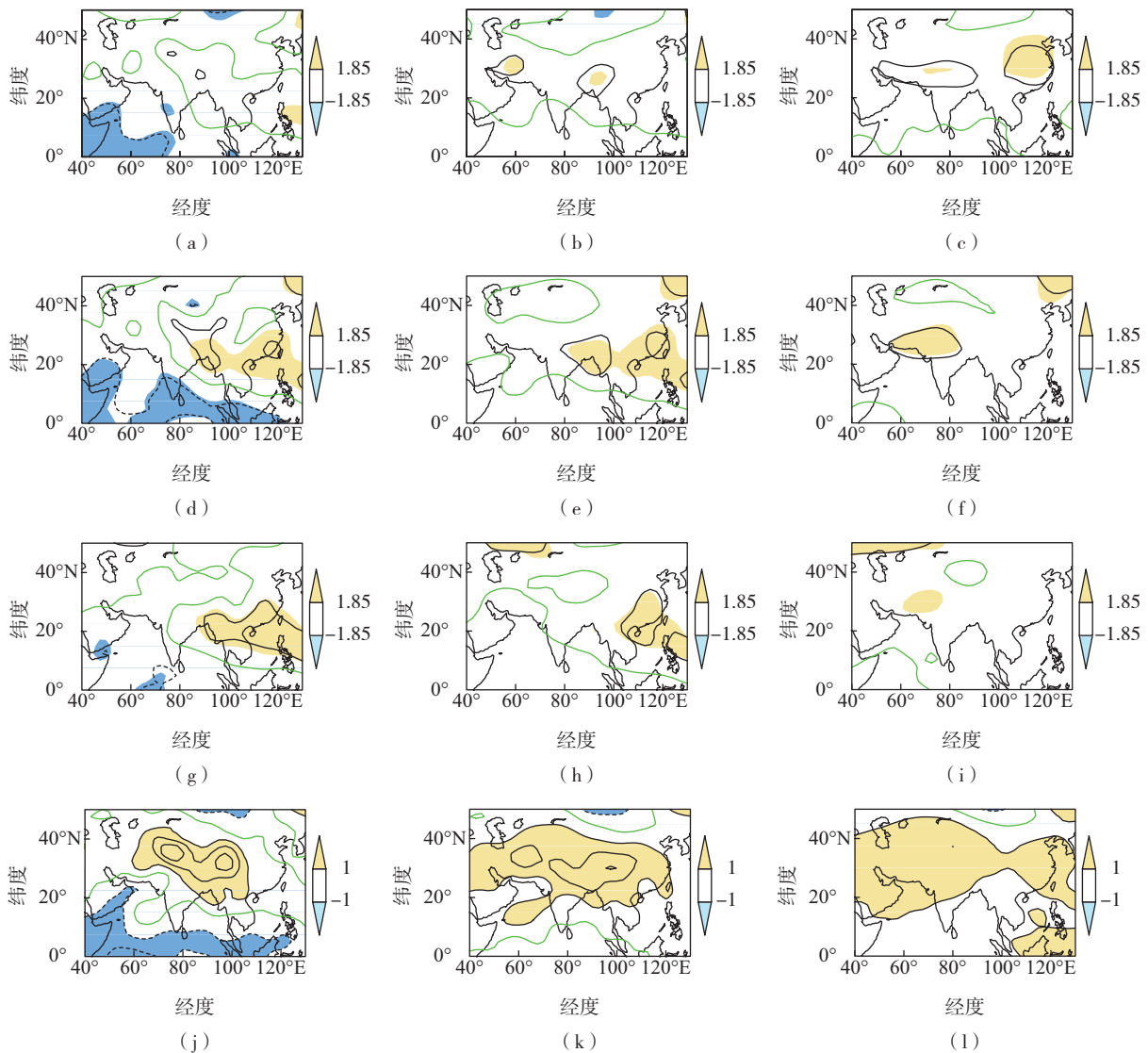
4 环流异常的成因

2022年夏季南亚高压和西太副高异常可能与热带大西洋、印度洋到西太平洋的异常垂直环流有关。其中热带大西洋环流异常可引起NAO型环流异常,再通过遥相关波列经北大西洋、欧亚中高纬度影响青藏高原到中国东部的环流;而热带印度洋到西太平洋上的垂直环流异常则可以通过经向环流直接影响到西太副高及南亚高压。为进一步分析热带印度洋到西太平洋上空垂直环流对南亚高压及西太

副高的影响,计算500 hPa上 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 、 $60^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 区域的垂直速度指数,简记为WI(图4)。依据标准化WI序列绝对值大于1.0的年份为典型正/负异常年(为保持与垂直运动方向一致,这里的指数取负号),分别为:1995、1996、1998、2007、2020、2021、2022/1985、1987、1997、2006、2009、2011、2015。而后对ATI、WI典型年、La Niña/El Niño年700 hPa、500 hPa、200 hPa高度场进行合成分析。由图5a、d、g可见,700 hPa中以上合成差值在青藏高原到中国东部、南部地区都是正异常,尤以WI典型年(图5g)、La Niña/El Niño年(图5d)差值显著。2022年夏季700 hPa(图5j),在青藏高原到中国东南部同样为高度正距平,但正异常中心在高原上。500 hPa,ATI典型年合成差值(图5b)正异常范围向北向西扩展,显著区增大;La Niña/El Niño年合成差值图(图5e)上的显著正异常区向东收缩;而WI典型年合成差值的范围与低层差不多,其在中国东部地区略有北抬(图5h)。2022年夏季500 hPa,正高度场异常范围向东向北扩展,正异常中心仍在青藏高原上(图5k)。200 hPa,ATI典型年合成差值正异常范围进一步向北向西扩展,显著区增大,特别在中国东部地区出现显著的正异常(图5c);La Niña/El

Niño 年合成差值图上只在伊朗高原和中国东北地区存在显著正异常(图 5f);而 WI 典型年合成差值在高原西部到伊朗高原存在显著正异常(图 5i)。2022 年夏季 200 hPa,正高度场异常分别在青藏高原西部经伊朗高原到阿拉伯海、中国东部上空存在

中心(图 5l)。综上,2022 年夏季青藏高原到中国东部的高度异常在低层 700 hPa 主要与 WI、La Niña/El Niño 年的环流异常相似;中层 500 hPa 则主要与 ATI 和 WI 典型年对应的高度场相似;高层 200 hPa 则主要与 ATI 典型年对应的高度场相似。



a、d、g、j—700 hPa 高度场,b、e、h、k—500 hPa 高度场,c、f、i、l—200 hPa 高度场;色阶区为显著性水平超过 0.05 的区域,但 j、k、l 中色阶区为距平绝对值超过 1 的区域;黑色实(虚)等值线为标准化的高度正(负)距平,绿色等值线为零线。

图 5 典型 ATI(a—c)、La Niña/El Niño(d—f)、WI(g—i)高低年合成高度场差值和 2022 年夏季标准化高度距平(j—l)

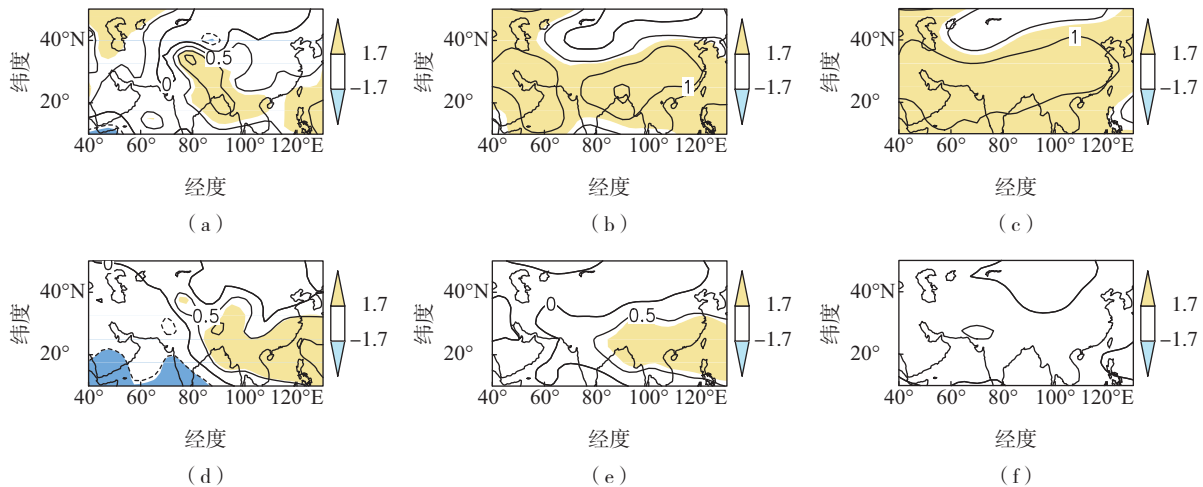
Fig.5 Composite differences of standard height anomalies at 700 hPa, 500 hPa and 200 hPa for typical events defined by ATI (a/b/c), La Niña/El Niño (d/e/f), WI (g/h/i) and the anomalies of JJA 2022 (j/k/l)

以上分析表明 WI、La Niña/El Niño 年对应对流层中低层青藏高原到中国东部的正高度异常,高层青藏高原以西为高度正异常;ATI 典型年则对应整层青藏高原到中国东部为正高度异常,尤其中国东部地区

高层的正异常。如果把高度场回归到 ATI 和 WI,并应用 2022 年夏季 ATI 和 WI 乘以回归系数,可得到指数拟合的相应高度值。考虑到 La Niña/El Niño 年情况类似 WI 典型年,这里只给出回归到 ATI 和 WI 的

值(图6)。印度洋到西太平洋的垂直环流异常对高度异常的贡献仍体现在中下层青藏高原到中国东部(图6d—f);热带大西洋对高度异常的贡献在整个对流层都明显,在中高层更强(图6a—c)。对照2022年夏季高度距平(图5j—l)可见,其与ATI回归的高度分布更相似。如果仅考虑La Niña年夏季,南亚高

压可能偏强偏西,西太副高偏强但西伸不明显。如果仅考虑印度洋到西太平洋垂直环流异常的影响,西太副高易偏强西伸,但南亚高压不易向东扩展。如果仅考虑热带大西洋异常环流的影响,南亚高压和西太副高都可能发生有利于中国东部高温的异常,即南亚高压偏强东扩、西太副高偏强西伸。



色阶区—线性回归 t 检验显著性达到 95% 的区域。

图6 2022年夏季700 hPa、500 hPa、200 hPa高度场分别对ATI(a—c)、WI(d—f)回归的标准化距平

Fig.6 The 700-hPa, 500-hPa, and 200-hPa geopotential height anomalies of JJA 2022 regressed onto ATI (a/b/c) and WI (d/e/f)

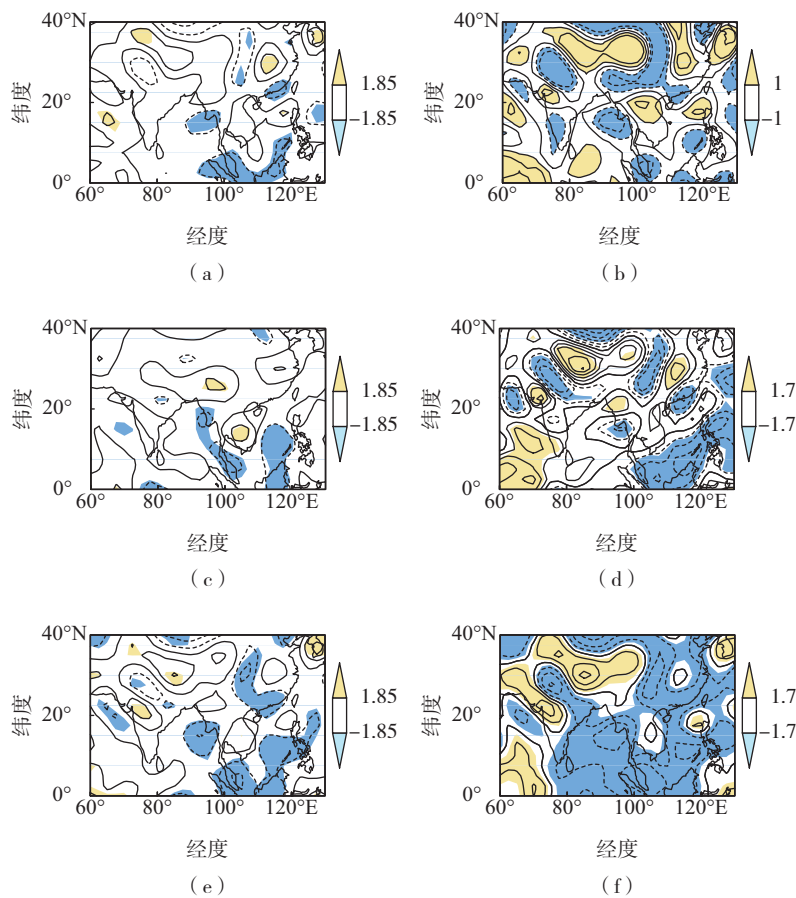
上述分析表明,热带大西洋及印度洋到西太平洋海洋强迫的异常环流共同导致2022年夏季南亚高压和西太副高的异常。其中热带大西洋可通过中高纬遥相关波列的传播影响青藏高原到中国东部,且其对高层的影响更显著;热带印度洋到西太平洋垂直上升运动对中国东部正高度异常的影响主要表现在中低层。由大尺度涡度方程 $\partial \zeta / \partial t + u \partial \zeta / \partial x + v \partial \zeta / \partial y + \beta v + fD = 0$,可知局地涡度的异常变化包括平流项和水平散度项,其与辐散异常的关系为: $\partial \zeta' / \partial t \sim -fD'$ 。局地水平散度可引起局地涡度的变化,即环流的变化。由于辐散和辐合要么在高层,要么在低层。为了诊断热带印度洋到西太平洋垂直环流异常的影响,对ATI、WI典型年和La Niña/El Niño年的700 hPa散度进行合成和回归分析。由图7可见,热带印度洋到西太平洋的辐合辐散异常可以影响到低纬度地区。ATI、WI典型年和La Niña/El Niño年及2022年夏季都存在一个自西印度洋垂直下沉异常到青藏高原中西部地区下沉的波列型异常,其中ATI、WI典型年该波列相对于La Niña/El Niño年要强,波列向东与东印度洋到西太平洋的异常相连,这与2022年夏

季的散度异常分布(图7b)类似。虽然La Niña/El Niño年的波列型异常不明显,但其与ATI、WI典型年都在青藏高原上空主要为辐散异常,高原周围为辐合异常;在中南半岛到南海基本为正的散度异常,对应图2中国东部反气旋的异常。由回归到ATI、WI的700 hPa散度场(图7d、f)可见,自西印度洋垂直下沉异常到青藏高原中西部地区的正负相间的波列型异常更清楚,且与2022年夏季的异常分布(图7b)非常相似。以上分析表明,由低层看,ATI、WI典型年和La Niña/El Niño年三者都反映了西印度洋及东印度洋到西太平洋区域的异常强迫对2022年夏季影响中国高温异常环流的贡献,只是ATI、WI典型年在青藏高原南侧的垂直上升运动更强,其对青藏高原正高度异常的贡献更大。

由高层看,热带北大西洋异常强迫是如何影响青藏高原到中国东部环流的呢?图8给出了2022年夏季200 hPa风场和250 hPa流函数。由图可见,从热带大西洋到欧亚在中低纬度、中高纬度分别存在波列结构的异常环流型。热带大西洋垂直环流的异常首先引起副热带纬向风的加强(副热带急流的异常),异

常纬向风切变产生异常的气旋性环流,并向下游传播,到青藏高原以西为一反气旋性环流异常,有利于南亚高压向西扩展;另一波列通过引起副热带急流的变化向北引起 NAO 型环流异常,导致极地急流异常,在北大西洋中高纬度形成异常的气旋,并向下游传播,在青藏高原到中国东部地区为异常的反气旋环流,有利于南亚高压的加强和向东扩展。由纬向风速大于 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的等值线可见,典型 ATI 年纬向风速大于 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的等值线相对于气候值向东、西方向扩展,尤其是向东扩展(图 8a)。2022 年夏季纬向风速大于 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的等值线向东扩展的范围最大,表明热带大西洋垂直环流异常可以导致东亚急流的增强和向东扩展,但其不是唯一的影响因素。由 2022 夏季流函数及波作用量图(图 8b)可见,从北大西洋中纬

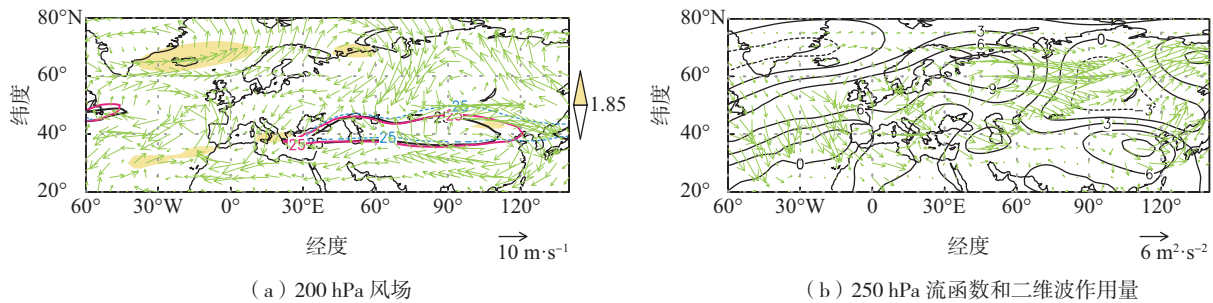
度经欧亚中低纬度、中高纬度分别存在波列及相应的波作用量异常,并向东传播。其中经欧亚中低纬度传播的波列到黑海附近,为异常的波矢量辐合,不再向东传播;而经欧亚中高纬的波列主要在贝加尔湖附近达到较强的辐合。由典型 ATI 年合成的波矢量图(图略)可见,经欧亚中高纬的波列可以明显地传播到贝加尔湖南侧中国东部上空的流函数正异常中心。这正如 T-N 波活动通量所揭示的那样,气旋/反气旋区域构成了 Rossby 波从热带向温带耗散能量的关键路径^[24]。始于亚热带大西洋,北向传播路径经西欧到达中国东部地区;而向南传播的路径经地中海向黑海传播。Rossby 波列允许能量传播到中国东部区域,波通量辐合导致异常的反气旋环流,从而有利于南亚高压的加强和分别向东、向西扩展。



a、c、d、e、f—等值线间隔为 0.5,粗实线为零值等值线,色阶区分别为合成、回归 t 检验显著性水平超过 0.05 的区域;b—色阶区为距平绝对值超过 1 的区域。

图 7 典型 ATI(a)、La Niña/El Niño(c)、WI(e) 高低年合成的标准化 700 hPa 散度差值和 2022 年夏季相应距平(b)、2022 年夏季 700 hPa 散度分别对 ATI(d)、WI(f) 回归的标准化距平

Fig.7 Composite differences of the standard divergence anomalies at 700 hPa for typical events defined by ATI (a), La Niña /El Niño (c), and WI (e) and the anomalies of JJA 2022 (b) and the regressed onto ATI (d) and WI (f)



a—黄色区为 ATI 典型年合成纬向风场通过 95% 信度显著性检验的区域, 黑色粗等值线为 200 hPa 气候平均纬向风速达到 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的等值线, 红色等值线为 ATI 典型年合成, 蓝色虚线为 2022 年夏季相应数值;
b—黑色等值线为流函数, 单位: $10^6 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$; 矢量为二维波作用量。

图 8 夏季 200 hPa 风场和 250 hPa 流函数及二维波作用量

Fig.8 JJA wind at 200 hPa, stream function at 250 hPa, and two dimensional wave flux at 250 hPa

5 结论与讨论

本文分析了 2022 年夏季引起中国大范围高温相关环流异常的成因, 主要得出以下结论:

(1) 2022 年夏季南亚高压偏强, 并分别向东、西方向扩展; 西太副高偏强, 西伸异常。2022 夏季为 La Niña 年, 但热带大西洋垂直上升环流相对西太平洋更强, 且热带印度洋到西太平洋热带垂直上升环流异常也偏强。

(2) 2022 年热带大西洋、印度洋到西太平洋上空垂直环流异常和 La Niña 共同作用, 使得夏季南亚高压和西太平洋副高极端异常。La Niña 及印度洋到西太平洋热带垂直环流异常对应对流层中低层青藏高原到中国东部的正高度异常, 高层青藏高原以西为高度正异常; 热带大西洋异常垂直环流异常对应整层青藏高原到中国东部为正高度异常, 尤其中国东部地区高层的正异常。即 2022 年, La Niña 和印度洋到西太平洋垂直环流异常有利于南亚高压和西太平洋副高的偏强西伸; 热带大西洋环流异常则既有利于南亚高压的加强及东扩, 也有利于西太平洋副高偏强西伸。

(3) 印度洋到西太平洋垂直环流主要通过局地经向 Hadley 环流影响青藏高原到中国东部的环流异常, 表现为青藏高原到中国东部中低层为显著的辐散异常; 热带大西洋则通过引起纬向风异常 (急流异常), 激发遥相关波列并向下游传播。北大西洋经欧亚中低纬度、中高纬度分别存在一波列及相应的波作用量异常。其中经欧亚中低纬度的波列传播到黑海附近, 为异常的波矢量辐合, 影响青藏高原

的西侧环流异常; 而经欧亚中高纬的波列主要在贝加尔湖附近达到较强的辐合, 可影响青藏高原到中国东部的环流异常。

热带大西洋及其上空的环流异常可以通过激发的 Rossby 波列, 一方面通过引起中东纬向风异常, 经副热带急流的波流相互作用及其能量的传播引起青藏高原以西里海附近的反气旋异常; 另一方面, 通过引起 NAO 型环流异常, 经极地急流的波流相互作用及其能量的传播, 影响青藏高原到中国东部上空的环流异常^[22-23]。热带印度洋到西太平洋上空的垂直环流异常则通过直接的局地 Hadley 环流影响到里海、青藏高原到中国东部的环流异常^[25-26]。以上因子共同作用使得 2022 年夏季南亚高压偏强, 并分别向东、西方向扩展, 高空急流也表现为加强、向东向北扩展; 西太副高偏强, 向西扩展。由于多种因素的共同作用导致了环流的极端异常, 致使中国大范围受西太副高控制, 晴空并伴有异常的下沉运动和暖平流, 气温偏高。一般 La Niña 年热带西太平洋垂直上升运动加强, 为什么 2022 年夏季热带大西洋的垂直环流更强? 在对 2021/2022 年冬季环流及华南降水异常的成因分析中同样发现了热带大西洋垂直环流的加强, 且其对青藏高原及中国气候有重要的影响^[19]。热带大西洋和印度洋垂直环流异常的幅度近 3 a 来持续增大, 其对夏季高温环流异常的影响值得关注。此外, 关于各大洋之间热带强迫年际变率的变化, 以及它们之间的联系与中高纬环流和东亚气候的关系需要进一步的研究, 且现阶段对于极端降水和干旱事件同步频发的观测、诊断和模拟等方面也需深入研究^[27-28]。

参考文献:

- [1] 孙博,王会军,黄艳艳,等.2022年夏季中国高温干旱气候特征及成因探讨[J].大气科学学报,2023,46(1):1-8.
- [2] 张强.科学解读“2022年长江流域重大干旱”[J].干旱气象,2022,40(4):545-548.
- [3] 郝立生,马宁,何雨焯.2022年长江中下游夏季异常干旱高温事件之环流异常特征[J].干旱气象,2022,40(5):721-732.
- [4] 冯宝飞,邱辉,纪国良.2022年夏季长江流域气象干旱特征及成因初探[J].人民长江,2022,53(12):6-15.
- [5] 林纾,李红英,黄鹏程,等.2022年夏季我国高温干旱特征及其环流形势分析[J].干旱气象,2022,40(5):748-763.
- [6] 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.
- [7] 郑泽华,张伟,上官志聪.我国东部高温事件环流特征及海温背景分析[J].海峡科学,2021(10):3-8.
- [8] 李忆平,张金玉,岳平,等.2022年夏季长江流域重大干旱特征及其成因研究[J].干旱气象,2022,40(5):733-747.
- [9] ZHU B Y, SUN B, WANG H J. Dominant modes of interannual variability of extreme high-temperature events in Eastern China during summer and associated mechanisms[J]. Int J Climatol,2020,40(2):841-857.
- [10] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.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,2006,2(1):3-8.
- [11] ZHU B Y, SUN B, WANG H J. Increased interannual variability in the dipole mode of extreme high-temperature events over East China during summer after the early 1990s and associated mechanisms[J]. J Climate,2022,35(4):1347-1364.
- [12] 陈烈庭.北太平洋副热带高压与赤道东部海温的相互作用[J].大气科学,1982,6(2):148-156.
- [13] 彭加毅,孙照渤.春季赤道东太平洋海温异常对西太平洋副高的影响[J].南京气象学院学报,2000,23(2):191-195.
- [14] 应明,孙淑清.西太平洋副热带高压对热带海温异常响应的研究[J].大气科学,2000,24(2):193-206.
- [15] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc,1996,77(3):437-472.
- [16] TAKAYA K, NAKAMURA H. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow[J]. J Atmos Sci,2001,58(6):608-627.
- [17] 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.
- [18] 徐成鹏,于超.2022年7月大气环流和天气分析[J].气象,2022,48(10):1354-1360.
- [19] 孙建奇.2013年北大西洋破纪录高海温与我国江淮-江南地区极端高温的关系[J].科学通报,2014,59(27):2714-2719.
- [20] TAN G R, JIN F F, REN H L, et al. The role of eddy feedback in the excitation of the NAO[J]. Meteorol Appl,2014,21(3):768-776.
- [21] TAN G R, REN H L, CHEN H S. Quantifying synoptic eddy feedback onto the low-frequency flow associated with anomalous temperature events in January over China[J]. Int J Climatol,2015,35(8):1976-1983.
- [22] TAN G R, WANG X Z, WANG Y G, et al. Possible causes of the excessive precipitation over South China in 2021/22 winter[J]. Atmos Res,2022,280:106432.
- [23] SONG Y D, CHEN H S, YANG J Q. The dominant modes of spring land surface temperature over Western Eurasia and their possible linkages with large-scale atmospheric teleconnection patterns[J]. J Geophys Res: Atmos,2022,127(4):e2021JD035720.
- [24] HOSKINS B J, KAROLY D J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing[J]. J Atmos Sci,1981,38(6):1179-1196.
- [25] 卢明,谭桂容,陈海山,等.江淮夏季降水异常与西印度洋地区大气环流异常的关系[J].气象科学,2013,33(5):510-518.
- [26] 孙鸣婧,谭桂容,卢明.西印度洋大气垂直环流与江淮夏季降水关系的年代际变化[J].热带气象学报,2016,32(2):237-245.
- [27] 薛媛,薛晓萍.极端降水与干旱同步频发的研究进展[J].海洋气象学报,2022,42(1):61-73.
- [28] 梁嘉俊,孙即霖.北美洲冬季冷空气对南美洲夏季降水异常影响的研究[J].海洋气象学报,2020,40(2):62-70.