

长江流域2022年夏季高温过程的成因分析

张 灵,郭广芬*,熊开国,秦鹏程,吴 瑶

(武汉区域气候中心,武汉 430074)

摘 要:长江流域2022年夏季遭遇了罕见的持续性高温事件,给流域各省生活、生产等造成了严重的影响,因此,科学解析该次高温过程成因对于提升高温过程预测预警具有重要意义。论文利用NCEP/NCAR逐日再分析资料和长江流域699个站点逐日温度资料,研究了2022年夏季长江流域高温过程的环流特征及成因。结果表明:①2022年长江流域的夏季高温过程为1961年以来范围最广、强度最强、持续时间最久、综合强度指数排名第一的高温事件。②长江流域上空对流层中高层受相当正压结构的异常反气旋环流控制,是此次高温过程发生的局地环流成因。南亚高压和西太平洋副热带高压的相向运动,且在长江流域上空重叠,是导致2022年高温发生的大尺度环流成因。在高压控制下,长江流域上空的下沉运动及达地面的太阳辐射均明显偏强,下沉增温和辐射增温共同导致高温极端性强。③欧洲西部经贝加尔湖向东频散的Rossby波能量,使得欧亚地区中高纬自西向东维持两脊一槽波列分布,北半球中高纬度表现出稳定的三波型,整个副热带地区为能量辐合区,助力副高维持偏强,同时有助于长江流域上空反气旋的持续,是异常环流长时间维持的原因。

关键词:高温事件;成因分析;波能量;异常环流;长江流域

在全球气候变暖大背景下,尤其是进入21世纪以来,北半球夏季高温热浪事件频发^[1-4],如2003年欧洲高温热浪,2017年俄罗斯远东地区、西班牙和葡萄牙因持续的高温天气而引发森林火灾,2019年美国加州局地日气温达45℃,突破历史纪录等^[5]。2022年夏季,全球多地区和国家遭遇了高温热浪,多城市破高温记录,日最高气温超过40℃。受高温天气影响,中国多个省级电网用电负荷均创历史新高,叠加降水异常少,多地旱情严重,尤其是长江流域,更是经受了极端性强、持续时间长、影响范围广的极端高温干旱气候事件的考验^[6],导致湖北、重

庆等出现极端气象干旱灾害,给农业生产、人民生活带来了较大的影响。

针对长江流域高温,如2013年长江中下游历史罕见的极端高温干旱,众多学者从外强迫方面探讨^[9],并从中高纬度的极涡、阻塞高压、中纬度的西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)和南亚高压等大尺度环流系统角度及大气遥相关方面诊断分析^[8-14],指出偏强偏西的副热带高压和偏强偏东的南亚高压控制是主因^[15-16],同时东亚—西太平洋从北向南的“负—正—负”波列分布对于副高位置和强度有重要作用^[17]。2022年夏季,长江流域出现超越

收稿日期 2022-10-21;修订日期:2023-02-02。

基金项目 :中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-082);湖北省自然科学基金项目(2022CFD014);长江流域气象开放基金项目(CJLY2022Y07);中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z033);湖北省烟草公司科技项目(027Y2022-006)。

[Foundation: Review and Summary Fund of China Meteorological Administration, No. FPZJ2023-082; Natural Science Foundation of Hubei Province, No. 2022CFD014; Meteorological Open Fund Project of Yangtze River Basin, No. CJLY2022Y07; China Meteorological Administration Innovation and Development Project, No. CXFZ2021Z033; Science and Technology Project of Hubei Tobacco Company, No. 027Y2022-006.]

第一作者简介 张灵(1985—),女,湖北武汉人,硕士,高级工程师,研究方向为短期气候预测技术。

E-mail: zhanglingwh2011@163.com

*通信作者简介 郭广芬(1980—),女,内蒙古赤峰人,硕士,高级工程师,研究方向为短期气候预测及决策服务。

E-mail: 635499448@qq.com

引用格式:张灵,郭广芬,熊开国,等.长江流域2022年夏季高温过程的成因分析[J].地理科学进展,2023,42(5):971-981.[Zhang Ling, Guo Guangfen, Xiong Kaiguo, et al. Causes of the high temperature process in the Yangtze River Basin in 2022. Progress in Geography, 2023, 42(5): 971-981.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.05.011

2013年、突破历史的大范围极端高温过程,此次高温形成的大气环流及可能成因,与历史高温过程的成因是否一致,值得深入分析。因此,本文基于长江流域日气温资料和NCEP/NCAR逐日再分析资料,从大气环流角度及Rossby波能量频散角度揭示2022年长江流域高温过程的可能成因,以期进一步加深对长江流域高温过程形成机制的认识,提升长江流域夏季高温天气过程的预测能力。

1 资料和方法

1.1 资料

本文采用资料包括:① NCEP/NCAR逐日再分析资料^[18],其水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,垂直方向17层,研究所用的要素场包括高度场、风场、温度场和地表气压场,下载网址为<https://downloads.psl.noaa.gov/Datasets/ncep.reanalysis.dailyavgs/pressure/>,研究时段为1961—2022年;② 国家气象信息中心整编的699个站点逐日的日平均气温、日最高/最低气温资料,该资料经数据一致性检测与核对,时间跨度为1951—2022年。考虑到资料缺失多发生在60年代之前,为此选择研究时段为1961—2022年夏季逐日数据;③ 向下到达地面总的太阳辐射通量日资料来自NCEP/NCAR再分析资料,水平分辨率为高斯网格(192×94 个格点),研究时段为1961—2022年,下载网址为https://downloads.psl.noaa.gov/Datasets/ncep.reanalysis/Dailies/surface_gauss/。文中采用的气候平均值均指研究时段对应的1991—2020年30 a平均值,夏季均指6—8月,距平是指相对气候平均值的差值,历史年/时期均指1961—2021年。

1.2 波作用通量水平分量(T-N通量)

波作用通量是波动能量传播的一种度量,可以用来诊断波动的传播以及波流相互作用^[19-20],本文采用波作用通量水平分量(T-N通量)来诊断准常行星波扰动能量的水平传播方向和强弱^[21-22]。T-N通量在Wentzel-Kramers-Brillouin(WKB)近似下与波位相无关,且与定常Rossby波列的局地群速度方向一致。T-N通量相对于相速度分量的剩余部分为 W_r ,其在对数气压坐标中的公式为:

$$W_r = \frac{p}{2} \times \frac{1}{|U|} \times \left[u(\Psi_x'^2 - \Psi' \Psi_{xx}') + v(\Psi_x' \Psi_y' - \Psi' \Psi_{xy}') \right] + \left[u(\Psi_x' \Psi_y' - \Psi' \Psi_{xy}') + v(\Psi_y'^2 - \Psi' \Psi_{yy}') \right] \quad (1)$$

式中: p 为气压(hPa); $U=(u, v)$ 为基本流场; Ψ' 为准地转扰动流函数,其中 $\Psi' = \Phi' / f$, $f = 2\Omega \sin \phi$ 表示科氏参

数, ϕ 、 Φ' 分别表示纬度和扰动位势, Ω 表示地球自转速率, x 、 y 分别表示 x 轴、 y 轴方向。计算500 hPa上T-N通量水平分量^[21],其中将夏季平均的气候平均场作为基本流场,2022年夏季异常场作为扰动流场。

在西风条件下,T-N通量为一矢量,方向与能量传播方向相同,也与波群速矢量方向相同,向量绝对值大小与能量传送的速度成正比。

1.3 区域性高温过程

采用气象行业标准《区域性高温过程监测指标》(征求意见稿)^[24],区域性高温过程的确定如下:

(1) 某日,将日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的相邻站点(2个站点间距离 ≤ 250 km)判定为1个组群;1 d内,允许有多个组群存在;

(2) 将站点数占有效监测站数(站点不缺测)的百分比 $\geq n$ (推荐 $n=3\%$)的组群判定为1个区域性组群;1日内,允许有多个区域性组群存在;

(3) 某日某区域性组群内至少有50%的站点与前一日某区域性组群内站点重合,则判定该区域性组群持续;否则判定该组群结束;

(4) 某个区域性组群持续 m 天及以上(推荐 $m=5$),则判定其为一次区域性高温过程。

区域性高温过程开始日判定:符合区域性高温过程判定指标中(4)的区域性群组持续的首日,为区域性高温过程开始日。

区域性高温过程结束日判定:区域性高温过程开始后,符合区域性高温过程判定指标(3)中区域性组群结束的首日为区域性高温过程结束日。

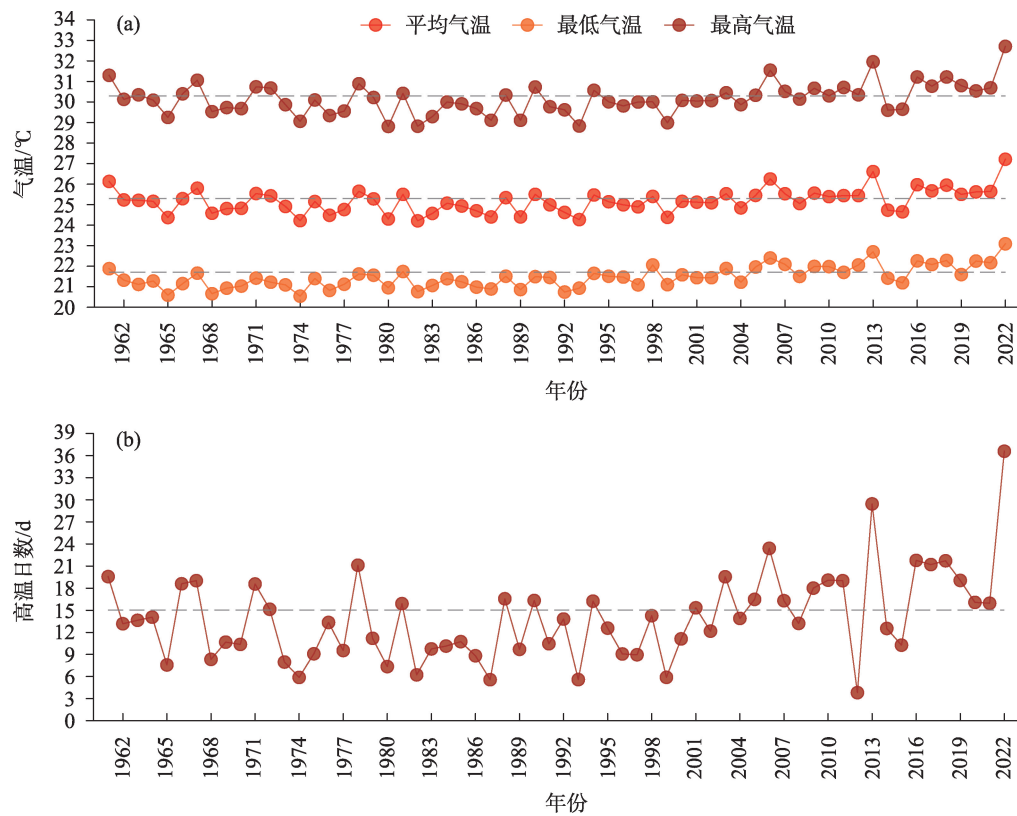
《区域性高温过程监测和评价方法》中区域性高温过程综合强度 Z 的计算方法为:

$$Z = I_a \times A_a^{0.5} \times T^{0.5} \quad (2)$$

式中: T 为区域性高温过程持续时间长度; A_a 为区域性高温过程平均范围,是某次区域性高温过程的日平均影响站数; I_a 为区域性高温过程平均强度,区域性高温过程中,构成该过程区域性组群内站点的日最高气温的平均值。

2 长江流域夏季高温过程特征

2022年长江流域夏季平均气温、最高气温、最低气温分别是 27.2 、 32.7 、 23.1°C ,相对各自历史同期偏高 1.9 、 2.4 、 1.4°C ,都居于历史同期第一位(图1a)。长江流域日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 高温日数历史同期为15 d,2022年为36.1 d,突破2013年的29.4 d,



注:图a、b中虚线均为平均值。

图1 1961—2022年夏季长江流域夏季气温和高温日数的逐年变化

Fig.1 Temperature and days of maximum temperature in the Yangtze River Basin in summers of 1961–2022

成为1961年以来高温日数最多的一年(图1b)。

依据区域性高温过程的定义,统计出长江流域1961—2022年共出现145次高温过程。基于定义,判断出2022年长江流域高温过程开始日为6月21日,结束日为8月29日,本次高温过程无中断地持续70 d,为1961年以来持续时间最长的。

从极端性看,2022年高温过程期间,平均最高气温共有607个站点排历史同期首位,其中重庆北碚(45.0℃)、江津(44.7℃),湖北竹山(44.6℃)等8站日最高气温达44℃及以上。日最高气温

≥35℃、≥37℃、≥40℃的日数主要分布在四川盆地至长江中、下游(图2),其中≥40℃的日数10 d以上的主要位于川东南、重庆和鄂西北(图略)。

从范围上看,2022年高温过程期间,长江流域日最高气温≥35℃区域覆盖流域站数的89.3%,≥37℃的区域占83.4%(图3),日最高气温≥40℃的有384个站点,占54.9%,均为1961年以来最广,特别是40℃以上覆盖范围远远高于历史时期次高年(2013年,31%)。

综上,2022年长江流域高温过程持续时间最

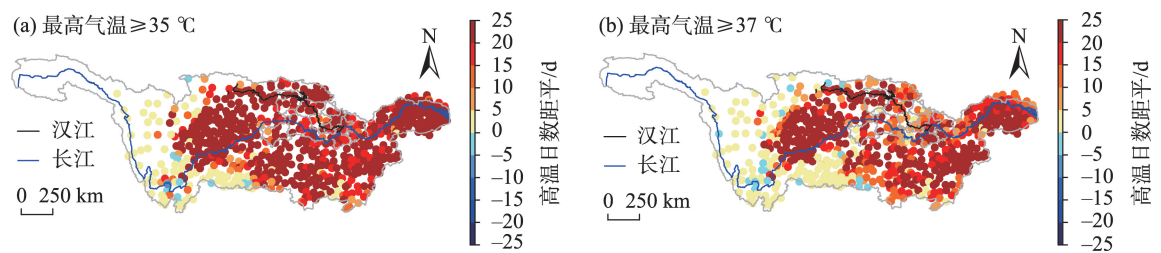


图2 长江流域2022年夏季高温过程期间日数距平分布

Fig.2 Average days of anomaly of maximum temperature in the Yangtze River Basin during the regional high temperature process in 2022

久、极端性最强、高温控制范围最广,对比历次高温过程综合强度发现,2022年的高温过程综合强度超越2013年,排名第一。

图3为2022年和历史年夏季长江流域高温天气过程期间平均最高气温空间分布。可明显看出,高温过程的平均最高气温都呈现出西低东高,且在四川盆地东部、长江中下游都存在异常中心。但2022年对历史年明显偏高,且前者相对后者偏高 1°C 以上站点达466个,其中偏高 2°C 以上站数为245个。NCEP再分析资料的1000 hPa温度距平合理地反映出了长江流域区域性高温过程期间平均气温异常高(图4),同时也反映出了2022年和历史时期高温过程的平均温度差异较大,2022年温度大部偏高 2°C 以上,长江中下游沿江地区甚至超过 3°C ,但历史高温过程的温度距平仅为 1°C 。由此可见,2022年高温过程相较历史高温过程的异常程度偏大。

3 高温过程的大气环流及成因分析

3.1 大气环流系统配置

图5a、5c、5e为2022年长江流域高温过程出现

时的大气环流系统。同期对流层中高层在整个长江流域上空为异常明显的反气旋距平环流(反气旋环流),但在垂直结构上存在差异。对流层高层200 hPa上,强大的反气旋位于长江流域的北部上空(图5a);对流层500 hPa上的反气旋相对高层有所减弱且南移,控制长江流域上游东部至下游(图5c);至对流层低层850 hPa上反气旋强度进一步减弱,且中心东移南下,长江流域下游位于反气旋的西北侧,长江中游北部位于高度负异常区,位于气旋性环流南侧(图5e)。东北半球上空的大气环流在中高纬度位势高度距平场呈现出较为明显的两脊一槽型分布,欧洲北部、东西伯利亚为明显的反气旋,贝加尔湖至巴尔喀什湖为明显的气旋,且这种波列自对流层高层至低层都较为稳定,表现出明显的正压结构。

对比2022年高温过程的大气环流系统图,历史年(图5b、5d、5f)与2022年高温过程的大气环流系统(5a、5c、5e)极其类似,高低层的异常中心、气旋、反气旋位置都较为一致,但历史年高温过程期间大气环流高层至低层异常中心的异常程度远远小于2022年的,这也是2022年高温过程综合强度排名第一的直接原因。

通过长江流域高温过程期间 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 平均纬

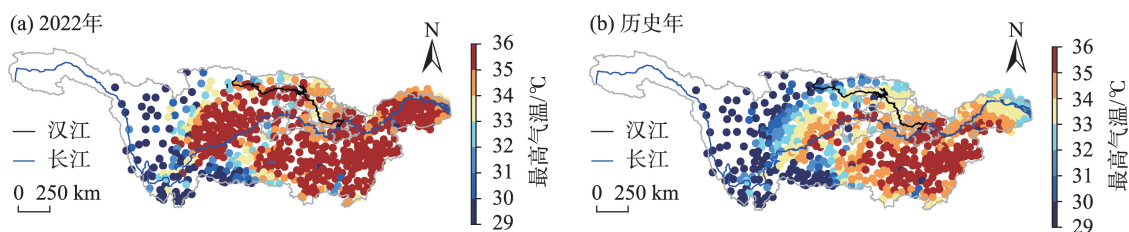


图3 区域性高温过程期间平均最高气温

Fig.3 Average maximum temperature during the regional high temperature process

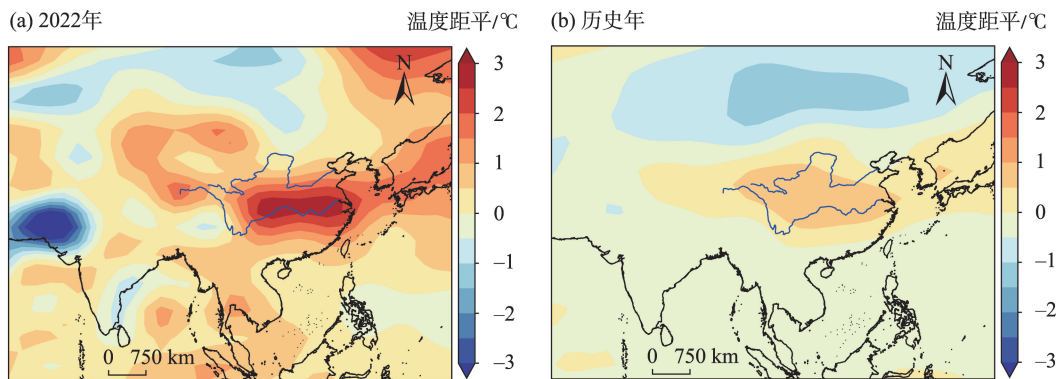
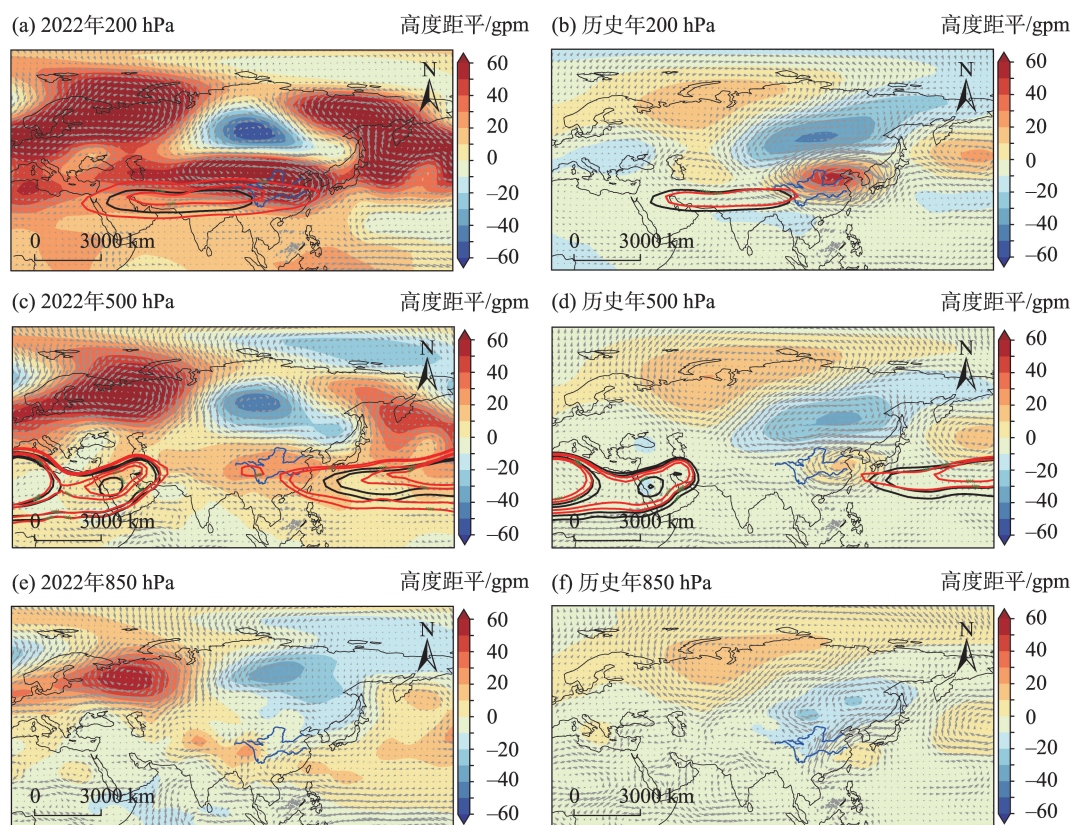


图4 NCEP/NCAR再分析资料在区域性高温过程期间的1000 hPa日平均温度距平

Fig.4 Average temperature anomaly on NCEP/NCAR 1000 hPa during the regional high temperature process



注:图a、b中红线为南亚高压12560 gpm线,黑线为南亚高压30年均值12560 gpm线;图c、d中红线为西太副高5880 gpm线,黑色为西太副高30年均值5880 gpm线。填色为高度距平场(gpm),矢量为风(m/s)。

图5 长江流域高温过程大气环流系统配置特征

Fig.5 Atmospheric circulation structure for the regional high temperature process in the Yangtze River Basin

向的垂直运动合成图(图6a、6b)和 $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均垂直运动合成图(图6c、6d)可知,长江流域上空以下沉运动为主,且相较历史高温过程,2022年长江流域上空的下沉运动更为明显。这种运动与长江流域上空异常的反气旋对应,即在长江流域上空异常的反气旋控制下,对地面温度有2个方面的作用:一是大气的下沉运动会异常强,而下沉运动会使得大气绝热增温;二是反气旋控制时,空中云量会明显减少,大大减弱了云对太阳的反射作用,从而影响到达地面的太阳辐射,使得到达地面的太阳短波辐射增加(图7)。长江流域2022年高温过程期间平均到达地面的总向下太阳辐射通量增加明显,且流域上空下沉运动异常偏强。对比历史年高温过程与2022年到达地面总的向下太阳辐射通量(图7a、7b),两者差异并不大,但两者的上升、下沉运动的差异较大,即2022年长江流域上空的下沉运动远强于历史年,可见,反气旋控制下的下沉运动使得大气绝热加温对于2022年的高温极端性贡献更大。

3.2 西太副高及南亚高压的逐日变化

从副热带地区来看,历史上高温过程发生时,200 hPa上空的南亚高压东伸脊点相对常年同期偏东,伸至长江上游西部上空,且脊线的东段相对常年同期偏北(图5b)。而2022年长江流域的高温过程发生时,南亚高压异常强大,呈现出3个特点:一是异常偏强,中心强度已达12600 gpm;二是东伸脊点(12560 gpm线)异常偏东,已东伸至中国东海;三是控制范围广且偏北,西伸脊点相对常年同期明显偏西,南界偏南,北界偏北,12560 gpm线控制整个亚洲中南部(图5a)。

此外,与历史相比,2022年长江流域高温天气过程期间,对流层中层500 hPa上(图5c),副热带地区高压也类似于南亚高压,5880 gpm线呈现出2个特点:强度异常强,中心达到5905 gpm;西太副高偏北、西伸脊点异常偏西,北非副高、伊朗高压东伸脊点明显偏东。此外,副高体庞大,控制范围广,尤其是西太副高,控制了长江中下游,5880 gpm线闭合

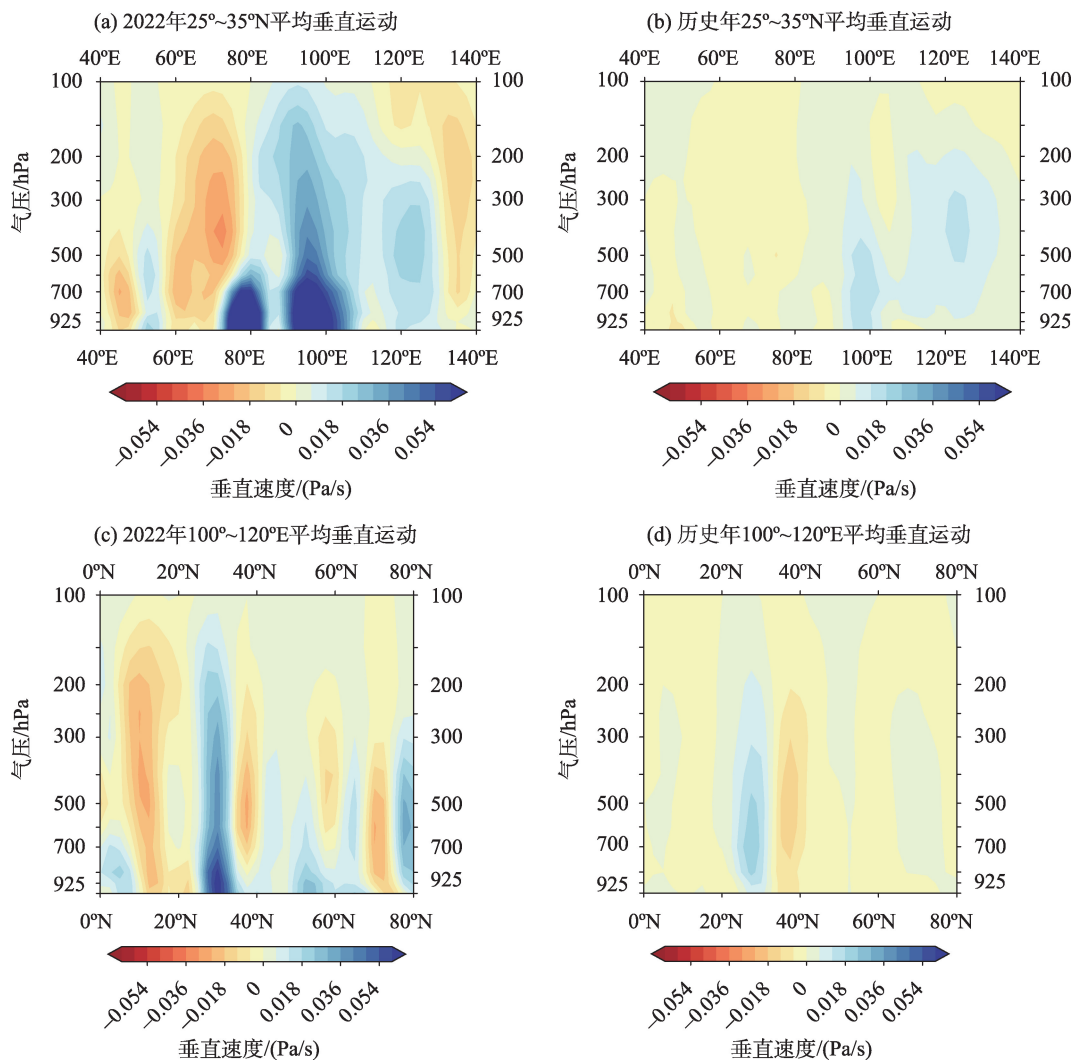


图6 长江流域区域性高温过程垂直运动的异常平均垂直剖面图

Fig.6 Vertical cross-section of omega anomalies for the regional high temperature process in the Yangtze River Basin

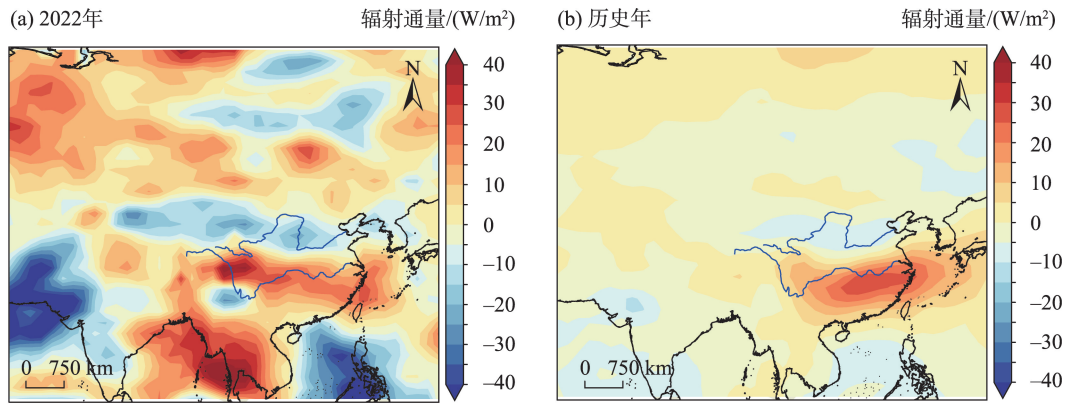


图7 长江流域区域性高温天气过程期间平均到达地面的总向下太阳辐射通量距平合成
Fig.7 Anomalies for the average downward solar radiation flux reaching the Earth's surface
during the regional high temperature process in the Yangtze River Basin

线甚至出现在长江上游局部,这足以说明2022年西太副高的强盛。

副高的东西活动与南亚高压的东西进退有着“相向而行、相背而去”的关系^[25-26],在此分析副高和南亚高压在高温过程期间逐日的演变情况、高温的逐日发展(图8)。从6月14日左右,200 hPa上南亚高压12560 gpm线开始出现,6月19日后12560 gpm线持续东扩,中心强度增强,至6月底南亚高压中心已达12600 gpm,南亚高压持续东扩,至7月底8月初最东扩至140°E。与此同时,500 hPa上5880 gpm线分为两路,其中一路(北非副高及伊朗高压的东段)自西向东逐渐发展,另一路(西太副高的西段)自东向西发展,两者在7月中旬中后期5880 gpm线形成短暂的合体,7月末至8月底,5880 gpm线稳定而持续地控制长江流域上空,形成环北半球高压带。

从强度上和持续性上看,对流层高层至低层都在7月上旬末至中旬、7月下旬至8月南亚高压及副热带高压强度达到最大,对应逐日高温站数超过400个站,这也是2022年长江流域高温峰值破纪录、过程持续最久、范围控制最广的直接原因。

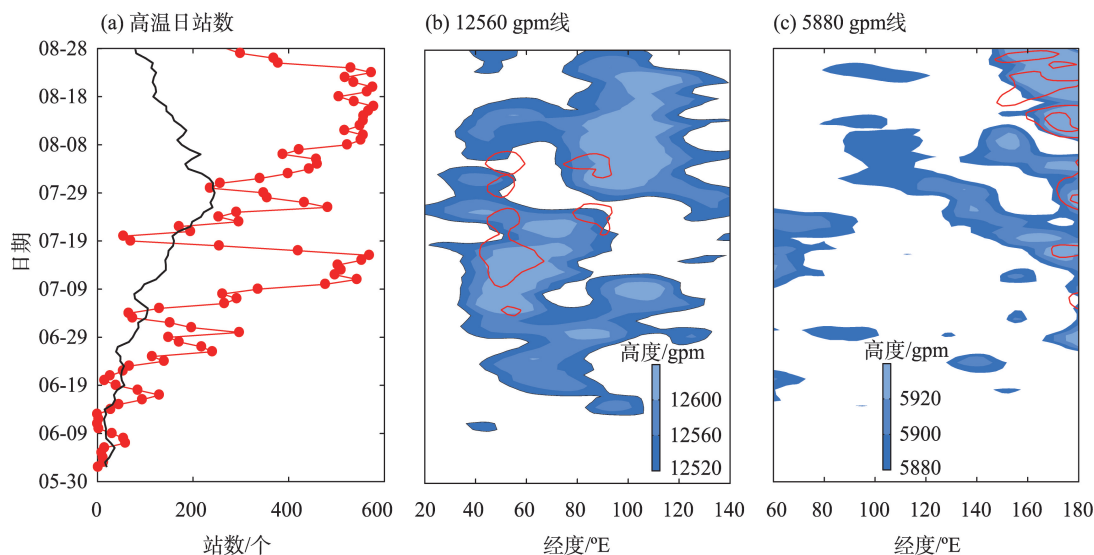
3.3 波作用量通量频散

北半球夏季对流层的Rossby波能量频散与大气的遥相关相联系,同时也对影响中国的关键环流系统的形成、维持及极端气候事件的发生具有重要作用^[27]。本文通过分析500 hPa上的T-N通量,来研

究Rossby波能量频散与大气环流演变。

由2022年高温天气过程期间500 hPa扰动流函数及波作用通量可见(图9a),北半球中高纬度呈现出明显的三波型,中高纬度地区反气旋分别位于西欧、东西伯利亚、北美地区,气旋分别位于格陵兰、贝加尔湖至巴尔喀什湖、东西伯利亚,与欧亚地区上空200 hPa、500 hPa(图5a、5c)高度距平场的正负异常中心对应较好,高温过程期间,相对夏季四波型环流,中高纬度的这种三波型更为稳定。此外,整个北半球副热带地区有西太副高、北美副高、北非副高等3个明显的反气旋中心,整个北半球的环流稳定,且西太平洋至长江流域上游整个为反气旋控制。

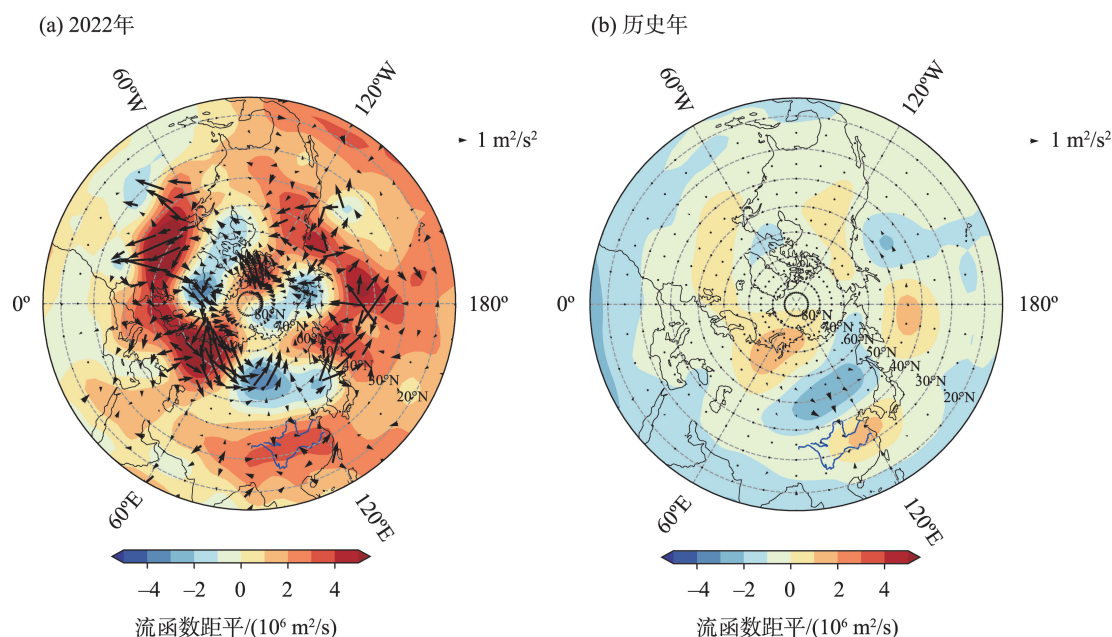
从波作用量通量可见,Rossby波能量在西欧上空集聚并向东传播,不仅使得西欧地区位势高度场异常增强,同时随着Rossby波能量沿西风波导区向下游频散,特别是在东西伯利亚,使得东西伯利亚高度正高度异常维持与增强。可见,源自欧洲西部经贝加尔湖向东频散的Rossby波能量,对欧亚地区中高纬自西向东“正—负—正”高度距平场异常中心的形成与维持起重要的作用。同时注意到,在副热带地区,尤其是长江流域上空以北受到来自偏北和偏西的能量频散维持,而长江以南受到来自偏南地区的能量频散,由此可见,长江流域上空有Rossby波能量的异常辐合,这为长江流域上空反气旋环流



注:图a中红线为2022年,黑线为气候平均;图b和c中红色表示气候平均,蓝色填色为2022年。

图8 2022年6月1日—8月28日逐日高温日站数及27.5°~40°N平均纬向平均的12560 gpm线和5880 gpm线的逐日演变

Fig.8 Daily number of high temperature stations and changes of averaged lines along 27.5°~40°N of 12560 gpm and 5880 gpm from 1 June to 28 August in 2022



注:矢量为波作用通量($10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$),填色为流函数($10^6 \text{ m}^2/\text{s}$)。

图9 长江流域区域性高温天气过程期间高温过程500 hPa波作用通量和流函数距平

Fig.9 Atmospheric circulation structure for the 500 hPa wave activity flux and related stream function anomalies during the regional high temperature process in the Yangtze River Basin

异常维持与增强提供能量,促使西太副高异常发展、持续控制长江流域,进而导致极端高温事件的发生及持续。

4 结论与讨论

本文基于NCEP/NCAR逐日再分析资料和长江流域699个站点逐日温度资料,诊断分析了2022年夏季长江流域高温过程的环流特征及成因。得到以下结论:

(1) 2022年夏季长江流域发生了1961年以来范围最广、强度最强、持续时间最久、强度指数排名第一的高温过程事件。

(2) 造成长江流域高温过程发生的范围大、时间长、极端性强的直接原因主要是东亚大气环流持续异常,最直接表现为南亚高压异常偏东偏强,同时西太平洋副热带高压异常偏西偏强,两者相向运动,打通连接,形成深厚的暖高压,长时间控制了长江流域上空。在高压控制下,长江流域上空的下沉运动异常强,配合到达地面的太阳辐射相对历史同期增加明显,即下沉运动的绝热加热和太阳辐射加热偏强,使得长江流域高温过程发生期间,高温极端性强。

(3) 欧洲西部经贝加尔湖向东频散的Rossby波能量,使得欧亚地区中高纬自西向东维持两脊一槽波列分布,北半球中高纬度表现出稳定的三波型,同时长江流域上空至整个副热带地区为能量辐合区,利于副高的持续发展和维持,为长江流域上空异常正高度距平、反气旋的维持提供能量。

本文分析了2022年长江流域夏季高温过程发生的大气环流背景、大气运动及波能量频散传输情况,简析了造成高温的主要原因。众所周知,异常事件的发生往往是不同纬度环流异常协同作用影响的结果,这些环流异常又与不同外强迫因子密切相关。本文仅着眼于中纬度的西太平洋副热带高压及南亚高压,没有从高、低纬度的环流系统出发,探寻不同纬度的环流协同作用,也没有从海温、积雪等下垫面外强迫的角度深入挖掘,进一步探寻引发环流异常的原因,在未来研究中尚需进一步深入、加强,以期提升高温过程的预测能力。

参考文献(References)

- [1] 马双梅, 祝从文, 刘伯奇. 2019年4~6月云南持续性高温天气的大气环流异常成因 [J]. 大气科学, 2021, 45(1): 165-180. [Ma Shuangmei, Zhu Congwen, Liu Boqi. Possible causes of persistently extreme-hot-days-related circulation anomalies in Yunnan from April to June 2019. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(1): 165-180.]

- nese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(1): 165-180.]
- [2] Wang H J, He S P. The North China/northeastern Asia severe summer drought in 2014 [J]. Journal of Climate, 2015, 28(17): 6667-6681.
- [3] 孙艺杰, 刘宪锋, 任志远, 等. 1960—2016年黄土高原干旱和热浪时空变化特征 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 591-601. [Sun Yijie, Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, et al. Spatiotemporal changes of droughts and heatwaves on the loess plateau during 1960–2016. Progress in Geography, 2020, 39(4): 591-601.]
- [4] 李双双, 延军平, 杨赛霓, 等. 1960—2016年秦岭—淮河地区热浪时空变化特征及其影响因素 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(4): 504-514. [Li Shuangshuang, Yan Junping, Yang Saini, et al. Spatiotemporal variability of heat waves and influencing factors in the Qinling-Huaihe region, 1960–2016. Progress in Geography, 2018, 37(4): 504-514.]
- [5] 我国及北半球多地遭遇极端高温 [N]. 长江日报, 2022-07-15(9). [China and many places in the northern hemisphere have suffered from extreme high temperatures. Yangtze River Daily, 2022-07-15(9).]
- [6] 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. [Sun Bo, Wang Huijun, Huang Yanyan, et al. Characteristics and causes of the hot-dry climate anomalies in China during summer of 2022. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(1): 1-8.]
- [7] Chen X L, Zhou T J. Relative contributions of external SST forcing and internal atmospheric variability to July–August heat waves over the Yangtze River Valley [J]. Climate Dynamics, 2018, 51: 4403-4419.
- [8] 李瞳, 王文, 蔡晓军. 2013年长江中下游夏季高温干旱演变过程及环流异常成因简析 [J]. 气象科学, 2017, 37(4): 505-513. [Li Tong, Wang Wen, Cai Xiaojun. Evolution and abnormal causes for high temperature and drought in the middle and lower reaches of Yangtze River in summer of 2013. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(4): 505-513.]
- [9] 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. [Wang Wen, Xu Jinping, Cai Xiaojun, et al. Analysis of atmospheric circulation characteristics and mechanism of heat wave and drought in summer of 2013 over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin. Plateau Meteorology, 2017, 36(6): 1595-1607.]
- [10] 许金萍, 王文, 蔡晓军, 等. 长江中下游地区2011年冬春连旱及2013年夏季高温干旱环流特征及其与Rossby波活动的联系对比分析 [J]. 热带气象学报, 2017, 33(6): 992-999. [Xu Jinping, Wang Wen, Cai Xiaojun, et al. A comparison of the Rossby wave activities and circulation features of the drought in winter-spring of 2011 and in summer of 2013 over mid-lower reaches of the Yangtze River Basin. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(6): 992-999.]
- [11] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter [J]. Monthly Weather Review, 1981, 109(4): 784-812.
- [12] Nitta T. Convective activities in the tropical Western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1987, 65(3): 373-390.
- [13] Huang R H. The east Asia/Pacific pattern teleconnection of summer circulation and climate anomaly in East Asia [J]. Journal of Meteorological Research, 1992, 6(1): 25-37.
- [14] Zhou T J, Ma S M, Zou L W. Understanding a hot summer in central eastern China: Summer 2013 in context of multi-model trend analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95(9): S54-S57.
- [15] 张小泉, 王文, 傅帅. 2013年浙江省夏季异常高温天气特征及其成因分析 [J]. 气象与环境学报, 2017, 33(1): 80-86. [Zhang Xiaoquan, Wang Wen, Fu Shuai. Characteristics and causes of an extremely high-temperature event in the summer of 2013 in Zhejiang Province. Journal of Meteorology and Environment, 2017, 33(1): 80-86.]
- [16] 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. [Zhang Jianming, Duan Lijie. Characteristic and formation analysis of a persistent high temperature and drought event in Hunan Province during summer season in 2013. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(4): 45-51.]
- [17] 吴贤云, 丁一汇, 叶成志. 两湖流域盛夏持续性旱涝过程诊断分析 [J]. 热带气象学报, 2012, 28(1): 12-22. [Wu Xianyun, Ding Yihui, Ye Chengzhi. Diagnosis of persistent drought/flood events in Two Inner Lakes' region of China. Journal of Tropical Meteorology, 2012, 28(1): 12-22.]

- [18] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-472.
- [19] 李崇银. 气候动力学引论 [M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2000. [Li Chongyin. *Introduction to climate dynamics*. 2nd ed. Beijing, China: China Meteorological Press, 2000.]
- [20] Plumb R A. On the three-dimensional propagation of stationary waves [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1985, 42(3): 217-229.
- [21] Takaya K, Nakamura H. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(23): 2985-2988.
- [22] 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]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, 58(6): 608-627.
- [23] 焦敏, 李辑, 陈鹏狮, 等. 2018年夏季辽宁异常高温干旱的环流特征及成因 [J]. *大气科学学报*, 2019, 42(4): 571-580. [Jiao Min, Li Ji, Chen Pengshi, et al. Analysis of circulation characteristics and cause of anomalous high temperature and drought in summer of 2018 over Liaoning. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2019, 42(4): 571-580.]
- [24] 王遵娅, 高荣, 宋亚芳, 等. 区域性高温过程监测指标 (征求意见稿) [S]. 北京: 中国气象局, 2022. [Wang Zun-ya, Gao Rong, Song Yafang, et al. *Regional high-temperature process monitoring indicators*. Beijing, China: China Meteorological Administration, 2022.]
- [25] 陶诗言, 朱福康. 夏季亚洲南部100毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系 [J]. *气象学报*, 1964, 34(4): 385-396. [Tao Shiyan, Zhu Fukang. The 100 mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to advance and retreat of the west-pacific subtropical anticyclone over the far east. *Acta Meteorologica Sinica*, 1964, 34(4): 385-396.]
- [26] 彭丽霞, 朱伟军, 李忠贤, 等. 南亚高压强度年代际变化及其与热带副热带海温关系 [J]. *热带气象学报*, 2016, 32(2): 145-154. [Peng Lixia, Zhu Weijun, Li Zhongxian, et al. The interdecadal variation of south Asian high and its association with the SST of tropical and subtropical regions. *Journal of Tropical Meteorology*, 2016, 32(2): 145-154.]
- [27] 柯丹, 管兆勇. 华中地区夏季区域性极端日降水事件变化特征及环流异常 [J]. *气象学报*, 2014, 72(3): 478-493. [Ke Dan, Guan Zhaoyong. Regional mean daily precipitation extremes over Central China during boreal summer and its relation with the anomalous circulation patterns. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(3): 478-493.]

Causes of the high temperature process in the Yangtze River Basin in 2022

ZHANG Ling, GUO Guangfen*, XIONG Kaiguo, QIN Pengcheng, WU Yao

(Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074, China)

Abstract: A rare persistent high temperature event occurred in the Yangtze River Basin in summer 2022, which caused serious impacts on the life and production of the provinces in the basin. Scientific analysis of the causes of this high temperature process is of great significance for improving the prediction and early warning of high temperature processes. Based on the NCEP/NCAR reanalysis data and the daily temperature data collected from 699 stations in the Yangtze River Basin, this study examined the atmospheric circulation characteristics and the causes of this high temperature process. The findings indicate that: 1) The high temperature process that occurred in the Yangtze River Basin in 2022 ranked the highest in terms of the area of influence, intensity, duration, and comprehensive strength since 1961. 2) There were mainly two circulation causes that attributed to this high temperature process. The first was the impact of local circulation, that is, the middle and upper layers of the troposphere over the Yangtze River Basin was controlled by the abnormal anticyclonic circulation generated by the equivalent barotropic mechanism. The second was the impact of large-scale circulation, that is, the South Asia High and Western Pacific Subtropical High moved in an opposite direction and overlapped over the Yangtze River Basin. Under the control of high pressure, the sinking movement over the Yangtze River Basin and the solar radiation reaching the ground are obviously strong, which led to strong extreme high temperature. 3) The main reason for the long duration of the abnormal circulation is that with the Rossby wave transmitting energy eastward from Western Europe and the Lake Baikal, the circulation distribution presented a "two grooves and one ridge" model from west to east in the middle and high latitude of Eurasia and a stable "three-wave" model in the middle and high latitudes in the northern hemisphere. Therefore, the energy converged in the subtropical region above the Yangtze River Basin, which helped maintain the intensity of the subtropical high and the occurrence of the abnormal positive height anomalies over the Yangtze River Basin.

Keywords: high temperature events; analysis of causes; Rossby wave energy; abnormal atmospheric circulation; Yangtze River Basin