吴遥,唐红玉,董新宁,等.2024. 2022年夏季重庆极端高温天气特征及其成因分析[J].暴雨灾害,43(1):110-120. WU Yao, TANG Hongyu, DONG Xinning, et al. 2024. Analysis of characteristics and causes of extreme high temperature weather in Chongqing during the summer of 2022 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):110-120 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-056

2022年夏季重庆极端高温天气特征及其成因分析

吴遥,唐红玉,董新宁,白莹莹,朱浩楠
(中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室,重庆市气候中心,重庆 401147)

摘 要:2022年夏季,重庆出现两次极端高温天气过程。利用重庆地区34个气象站点观测资料和ERA5再分析资料,分析了两次高温过程的主要环流异常特征。结果表明:南亚高压加强东伸和西太平洋副热带高压(以下简称副高)异常加强及西伸北抬,日本海以北至鄂霍次克海地区异常强盛的阻塞高压(以下简称鄂海阻高),使北方冷空气盘踞在40°—50°N以北地区,难以南下影响包括重庆在内的长江流域,重庆处于副高西段异常强盛的下沉和水汽辐散中心区,造成该地区持续极端高温天气。分析2001年以来不同等级区域性高温天气过程中的副高和南亚高压指数发现,2022年夏季副高西伸至最西,同时南亚高亚中心异常偏东,二者直接造成了重庆的极端高温天气。并且2022年夏季赤道太平洋西部海温的异常偏暖,130°E—150°W、30°—60°N区域平均距平值为1961年以来同期最高值,促使鄂海阻高强盛。在La-Niña事件作用下,110°—120°E范围内Hadley环流在20°—30°N为强盛的下沉运动,其下沉支与副高中心下沉区叠加,造成副高异常偏强和西伸,进而引发重庆极端高温天气。

关键词:重庆;极端高温;成因诊断;外强迫信号
中图分类号:P468.0+21 **文献标识码**:A **DOI**:10.12406/byzh.2023-056

Analysis of characteristics and causes of extreme high temperature weather in Chongqing during the summer of 2022

WU Yao, TANG Hongyu, DONG Xinning, BAI Yingying, ZHU Haonan

(*Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing Climate Center, Chongqing* 401147)

Abstract: During the summer of 2022, two periods of extreme high temperature events occurred in Chongqing. Using observations from 34 sites in the Chongqing and ERA5 reanalysis data, the main circulation anomalies during this period were analyzed. The results indicate that the strengthening and eastward extension of the South Asian High, along with the abnormal intensification and westward-northward extension of the Western Pacific Subtropical High (hereafter referred to as the Subtropical High), and the occurrence of an anomalously strong blocking high pressure north of the Sea of Japan extending to the Sea of Okhotsk (hereinafter referred to as the Okhotsk Blocking High), resulted in the stagnation of cold air above the 40°—50°N region, rendering it unable to influence the Yangtze River basin, including Chongqing. Chongqing was situated in a region of abnormally intense subsidence and moisture divergence under the western section of the Subtropical High, leading to persistent extreme high temperatures in the area. Analysis of the Subtropical High and South Asian High indices for different levels of regional high-temperature events since 2001 revealed that the Subtropical High extending westward to its most extreme position, while the center of the South Asian High was anomalously eastward in the summer of 2022. These factors directly contributed to Chongqing's extreme high temperatures. Additionally, the summer of 2022 witnessed anomalously warm sea surface temperatures in the western equatorial Pacific, with the average anomaly value in the 130°E—150°W, 30°—60°N region being the highest since 1961 for the same period, which strengthened the Okhotsk Blocking High. Under the influence of the La Niña event, Hadley circulation within the 110°—120°E range featured strong subsidence movements at 20°—30°N. This subsidence, combined with the central subsidence area of the Subtropical High, led to the abnormal intensification and westward extension of the Subtropical High, which in turn triggered the extreme high temperatures in Chongqing.

Key words: Chongqing; extreme high temperature; cause analysis; external forcing factors

引 言

随着全球气候变暖进一步加剧,高温干旱事件发生风险的可能进一步加大(IPCC,2021;姜大膀和王晓欣,2021)。在此背景下,我国(尤其重庆在内的川渝地区)同样呈现出高温、干旱事件增多趋势(贺晋云等,

收稿日期:2023-03-21;**定稿日期**:2023-08-21
资助项目:中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-106);重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX0558);中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J031);三峡局地气候监测项目(202210102HX112)
第一作者:吴遥,主要从事气候诊断预测研究工作。E-mail:472347935@qq.com
通信作者:唐红玉,主要从事短期气候诊断预测研究工作。E-mail:782378285@qq.com

2011；韩雪云，2019；吴秋洁，2019；武新英，2021；余荣和翟盘茂，2021)。21世纪以来，西南区域发生了多次极端高温干旱事件，如2006年川渝地区遭遇了有气象记录以来最严重的高温干旱事件；2009年中国西南地区发生了秋冬春连旱；2009—2012年云贵地区发生了有气象记录以来的多年极端连旱。以往研究表明，近几十年中国西南地区高温热浪事件呈现出增多趋势，且表现出较为明显的年际和年代际变化特征(邹旭恺，2007；张强，2022)，区域平均高温、干旱强度逐年增强，影响范围逐年扩大(杨淑群等，2008；黄荣辉，2012；李忆平等，2015)。

2022年夏季(6—8月)我国中东部地区出现大范围持续高温天气，为1961年以来持续时间最长的区域性高温天气过程；日最高气温≥35 ℃覆盖1 692个国家气象观测站(以下简称国家站)，占全国总站数70%，为1961年以来历史第2多；日最高气温≥37 ℃覆盖1 445国家站(占全国总站数60%)，为1961年以来最多；有361国家站(占全国总站数14.9%)日最高气温达到或超过历史极值，重庆北碚连续2 d日最高气温达45 ℃。评估结果显示，此次高温事件综合强度为我国1961年有完整气象观测记录以来最强。2022年夏季，重庆极端高温突破历史记录，境内36个区县852个乡镇(街道)遭受高温干旱灾害，给人民群众生产生活造成严重影响。

对于我国极端高温气候事件，有许多学者做过分析研究。郝立生等(2022)认为2022年夏季500 hPa高度场在青藏高原上空出现明显正距平扰动，尤其8月扰动进一步加强，东移到长江流域，诱发副高西伸，呈现东西带状分布，副高西部完全控制了长江流域，受其影响，该流域整体受下沉气流控制，白天在日照辐射的影响下，近地面强烈加热，热空气滞留在地面，从而出现大范围持续性高温天气。林纾等(2022)认为2022年夏季低纬度的伊朗高压异常东伸，副高略偏北且异常西伸，两高长时间贯通形成的高压带，其控制区内气流辐散下沉，并持续阻碍水汽向中纬度输送，不利于长江流域产生降水。同时，对流层高层南亚高压异常偏东，与中层的副高相向而行，致使控制我国大范围地区的高压系统呈稳定正压结构，造成长江流域出现极端高温干旱天气。早期对高温干旱影响机制的研究认为，副高和南亚高压是我国夏季大部区域高温干旱最主要和最直接的影响系统，高温的范围、持续时间以及强度与其东西、南北位置、控制面积及强度有密切关联(陈永仁和李跃清，2008；王斌和李跃清，2011；李永华等，2012；岳岩裕等，2018；岑思弦等，2021；雷显辉等，2022)。持续性的高温事件的形成往往与持续的环流异常密不可分。由于环流系统强度和位置等要素的变化对某一区域的影响不尽相同，加之极端气候事件预测存在较大难度，因此需要进一步提高对其发生规律和异常环流背景的认识。本文通过分析2022年夏季重庆极端高温与常年夏季高温过程的异同，并对副高、南亚高压等直接影响重庆极端高温的主要环流系统等开展详细分析，以期为进一步认识重庆极端高温发生成因、提取预测指标及气候预测业务提供科学依据。

1 资料与方法

本文所用资料主要包括：(1) 中国气象局国家气象信息中心提供的气象台站资料，选取1986—2022年重庆34个国家站逐日平均气温、最高气温等资料。分析时段为夏季6—8月内高温出现时段，气候值为1991—2020年平均。(2) 欧洲中心ECMWF (European Center for Medium Weather Forecasting)提供的1981—2022年ERA5逐日再分析资料，要素包括位势高度、经向风、纬向风、比湿等，水平分辨率为0.25°×0.25°，垂直方向17层。

整层水汽输送采用1 000—300 hPa进行积分。副高特征指数依据刘芸芸等(2012)的定义。南亚高压指数依据钱永甫等(2002)研究，定义为(35°—115°E、10°—55°N)上空100 hPa东西风零线上位势高度最大处为主高压中心，高压中心的位势高度减去1 600 gpm为强度指数，中心经、纬度位置分别为经度和纬度指数。区域高温天气过程根据中华人民共和国气象行业标准(QX/T228-2014) (中国气象局国家气象中心，2015)判定。区域高温天气过程的等级则根据区域性高温天气过程等级指标进行划分。在历史高温诊断分析中(统计时段为2001—2022年逐年夏季)重点分析特重、重度和中度区域高温天气过程，为了描述的简洁性，分别用P1代表特重(共17次)，P2代表重度(共21次)，P3代表中度(共45次)区域高温天气过程。本文应用的气候诊断分析方法主要有合成、检验等常用气候统计诊断分析方法(魏凤英，2007)。在合成分析中，P1合成为对应过程的逐日环流场及距平场的平均，P1-P2为P1环流距平场平均值减去P2，以此类推。P1—P3代表P1、P2和P3区域高温天气过程。合成分析的检验采用student t检验方法。在高温面积的统计中，采用地形回归插值算法将气象台站的高温资料插值到相对精细化的空间网格(朱浩楠等，2020)。

根据区域高温天气过程的定义，2022年夏季，重庆极端高温天气过程主要有两个时段，分别为7月4—17日(以下简称过程1)和7月24—8月29日(以下简称过程2)，均为特重等级(图1)。

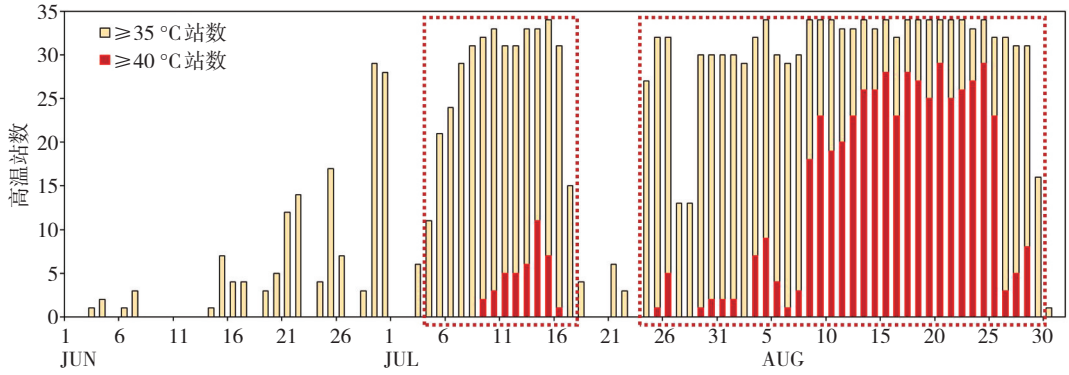


图 1 2022年夏季重庆高温天气过程出现的时间及站数(红色虚线框内为特重高温发生时段)

Fig.1 Temporal distribution and number of stations during the High-Temperature events in the Summer of 2022 in Chongqing (The time periods of extremely severe high temperatures are indicated by the red dashed box)

2 2022年重庆极端高温天气特征

2022年夏季,重庆出现了1961年有完整气象观测记录以来(以下简称历史记录)最为严重的区域高温天气过程,呈现持续时间长、影响范围广和极端性强的特点。夏季区域平均≥35 ℃的高温日数达49.7 d,为同期最多,超过2006年的49.4 d (图 2a);日最高气温≥40 ℃以上的高温日数为15.8 d,同样为历史同期最多(图 2b)。

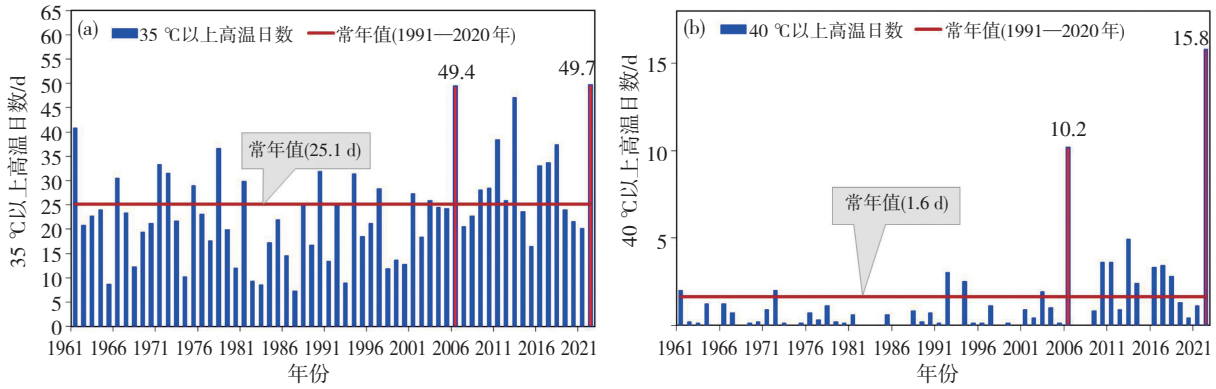


图2 1961—2022年重庆夏季≥35 ℃ (a)和≥40 ℃ (b)的区域平均高温(单位:d)日数历年变化

Fig.2 Annual variation of regional average number (unit: d) of High-Temperature days (a) ≥35 ℃ and (b) ≥40 ℃ during the Summer in Chongqing from 1961 to 2022

2022年夏季,重庆全域34个气象台站均出现了高温天气过程。选取期间全市平均日最高气温最大的一天,作为高温影响范围最广的统计日,基于站的该日最高气温观测值,采用地形回归插值算法将站的数据插值到空间网格(分辨率为0.25 km×0.25 km),通过统计≥35 ℃和≥40 ℃的格点面积可知,夏季≥35 ℃和≥40 ℃的覆盖面积分别为7.85×10⁴km²和4.48×10⁴km²,分别占区域总面积的95.3 %和54.4 %(图 3a),影响面

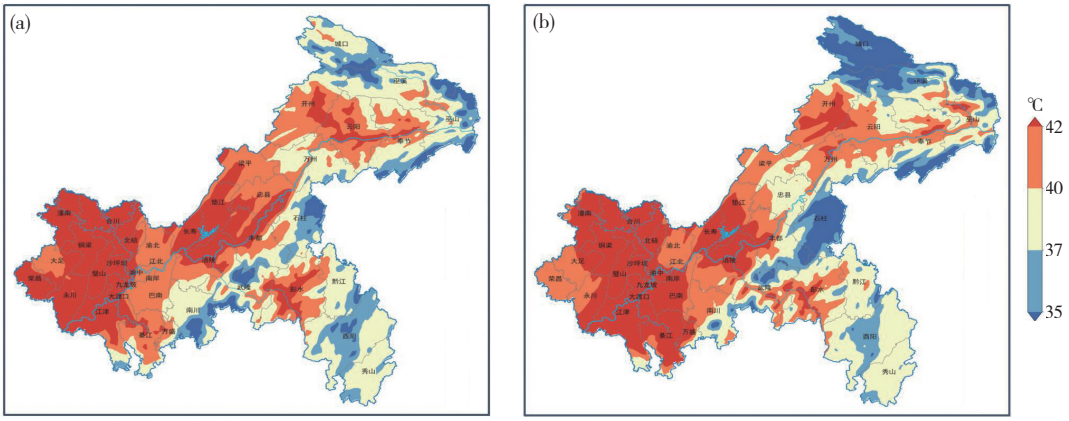


图 3 2022年8月20日(a)和2006年8月15日(b)重庆日最高气温(单位:℃)插值后空间分布

Fig.3 Spatial distribution of interpolated daily maximum temperatures (unit: ℃) in Chongqing on (a) August 20, 2022 and (b) August 15, 2006

积均超过2006年(分别为7.43×10⁴ km²和4.40×10⁴ km²，图3b)，为历史记录最广。

2022年夏季，重庆高温还呈现极端性的特点，区域内的34个站点中有18站点的日最高温气温刷新或追平当地历史记录同期极值，超过区域内站点的一半以上。区域内极端最高气温为45 ℃(北碚，8月18日、19日)，极端高值超过了2006年的44.5 ℃(綦江，8月15日、9月1日)，这也是我国首次在吐鲁番以外地区监测到45 ℃的高温(图4)。

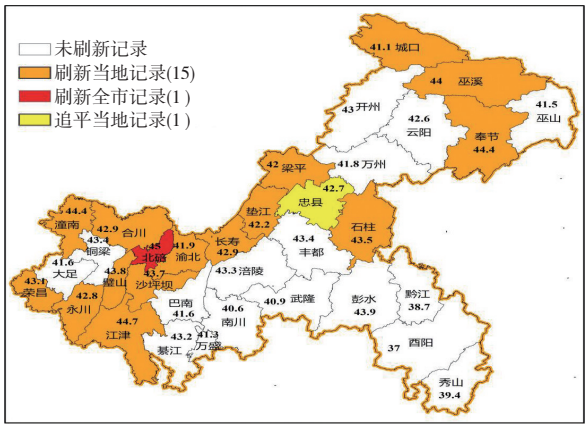


图4　2022年夏季重庆最高气温破记录站点分布
(图中数字为夏季极端最高气温值)

Fig.4 Distribution of stations in Chongqing where record high temperatures were recorded during the Summer of 2022 (Numeric values in the figure represent the extreme maximum temperatures recorded during the Summer)

3　2022年重庆极端高温天气成因

3.1　环流异常特征

图5为过程1期间的平均大气环流场，可见，在500 hPa位势高度场上，北半球欧亚中高纬度环流呈“两脊一槽”的纬向型分布，40 °N以北位势高度距平场为“+ − +”的倒Ω型，新地岛及以南的乌拉尔山地区阻塞高压(下称“乌山阻高”)异常强盛，正距平中心值达到70 gpm及以上；贝加尔湖附近有弱的低压槽发展，负距平中心值达到−50 gpm及以上；日本海以北至鄂霍次克海地区为异常强盛的阻塞高压(下称“鄂海阻高”)，正距平中心值达到了100 gpm及以上。在40°N以南的中低纬度地区，我国大范围地区受正距平位势高度场控制。100 hPa高度场上(图5b)，南亚高压强度异常偏大、偏强，位置偏东。因南亚高压与副高之间有相向而行、相背而斥的运动关系(李永华等，2012；刘芸芸等，2012；雷显辉等，2022)，且高层大气环流对中低层有一定的引导作用，使副高较常年显著偏西(约20个经度)，强度显著偏强(图5a、b)。

在850 hPa距平风场上，我国东部、台湾海峡地区为异常反气旋控制(图5c)，低纬地区来自西北太平洋的暖湿气流对我国长江流域输送不明显，来自印度洋

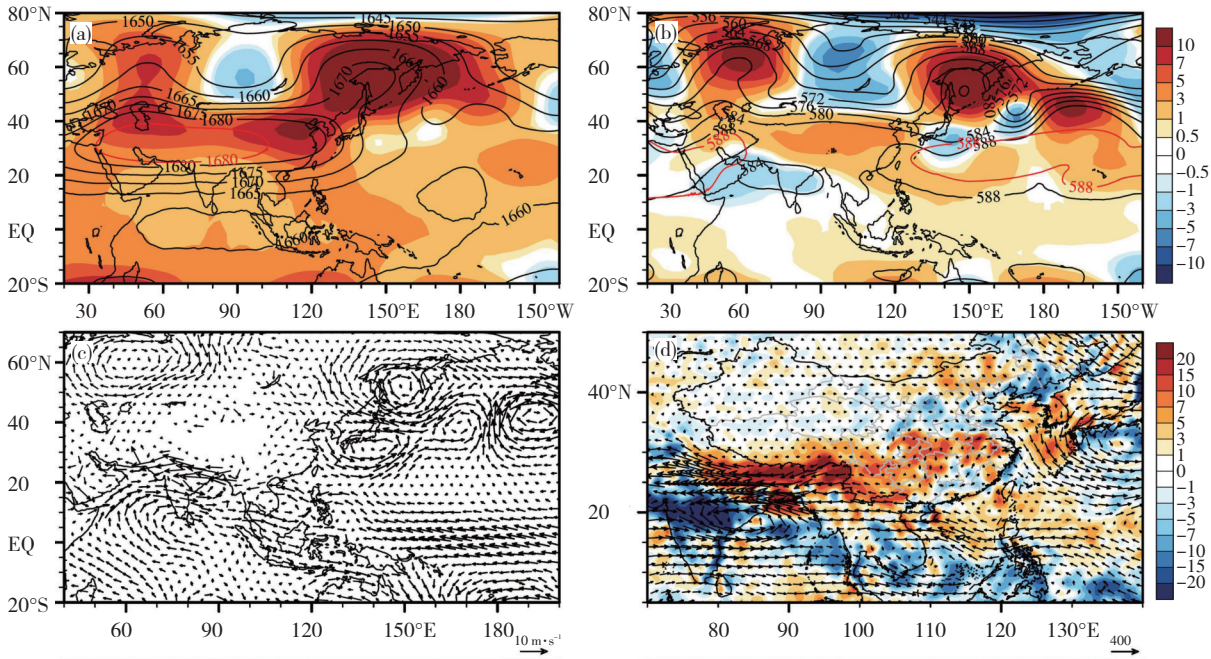


图5　2022年7月4—17日100 hPa (a)和500 hPa (b)位势高度场(黑色实线，单位：dagpm，红色实线表示气候平均1 680和588等值线)及其距平场(填色，单位：dagpm)，850 hPa风场距平(c，单位：m·s⁻¹)，对流层整层(1 000—300 hPa)积分水汽通量(矢量，单位：kg·m⁻¹·s⁻¹)及水汽通量散度距平场(填色，单位：10⁻⁵ kg·s⁻¹·m⁻²)合成图(d)

Fig.5 The (a) 100 hPa and (b) 500 hPa average geopotential height fields for July 4–17, 2022 (black solid lines, unit: dagpm, with red solid lines representing climatological contours at 1 680 and 588), anomalies of geopotential height fields (shaded, unit: dagpm), (c) anomalies of 850 hPa wind fields (unit: m·s⁻¹), and (d) integrated water vapor flux in the entire troposphere (1 000–300 hPa) (vectors, unit: kg·m⁻¹·s⁻¹) and anomalies of water vapor flux divergence (shaded, unit: 10⁻⁵ kg·s⁻¹·m⁻²)

的西南暖湿气流在中南半岛西岸转向为西北气流，未能继续向西南方向输送。在整层水汽输送及辐合辐散距平场(图 5d)上，西北太平洋和印度洋向长江流域输送的水汽均偏弱，尤其是重庆地区处于强水汽辐散区，水汽和动力条件均十分不利于降水的产生，进而易导致高温的出现。

过程2的高温持续了一月有余，是1961年以来持续时间最长、极端程度最强的区域高温天气过程。从过程2期间的环流图可看出(图 6a、b)，与过程1的环流特征相同的是，北半球欧亚中高纬度环流同样呈“两脊一槽”的倒Ω型纬向型分布，但过程2中100 hPa位势高度场上，中高纬度“+ − +”波列的分布区域更加北抬东伸，偏北了约10个纬度，约分布在50 °N以北高纬度地区；500 hPa位势高度场上，乌拉尔山地区正距平分布范围扩大且中心强度值更强；贝加尔湖附近低压槽强度加强、位置东扩，但鄂海阻高中心位置东移及强度明显减弱，正距平中心东移到白令海以南的北太平洋地区。在40°N以南的中低纬度地区，南亚高压中心范围较前一次过程北扩东移，副高较过程1加强并大幅西伸北抬，外围588 gpm线西伸到90°E附近，较常年偏西约40个经度，北界北抬至黄河流域，我国中东部和长江流域均在其控制之下，中心最大值较常年偏高超40 gpm，极为异常(图 6a、b)。

过程2的850 hPa距平风场上，与过程1相比，我国东部、台湾海峡地区的异常反气旋更加显著(图 6c)，低纬地区来自西北太平洋的暖湿气流对我国长江流域的输送同样不明显，来自印度洋的西南暖湿气流基本消失，中南半岛为东风异常，基本没有西南方向水汽输送到我国长江流域。在整层水汽输送及辐合辐散距平场(图 6d)上，西北太平洋和印度洋两个方向对长江流域输送的水汽均偏弱，尤其是重庆及以东地区处在异常强水汽辐散区，极易出现异常高温少雨天气。

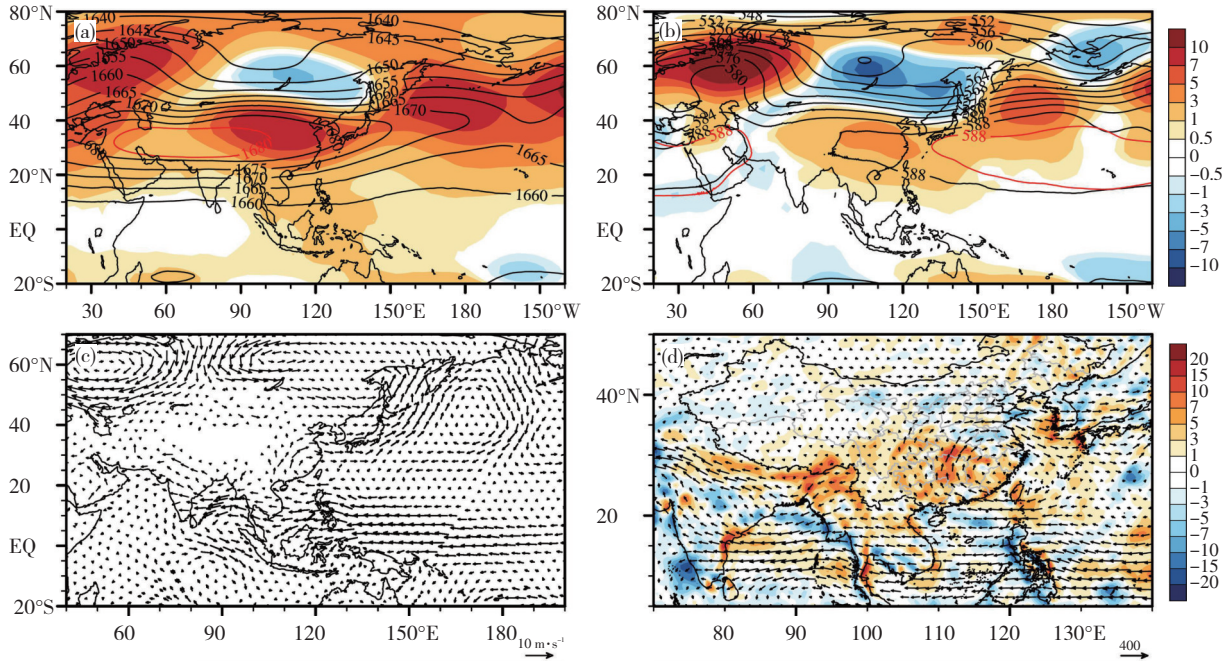


图 6 同图 5，但时间为2022年7月24日—8月29日

Fig.6 Same as Fig.5, but time for the period from July 24 to August 29, 2022

综合以上分析，两次特强区域高温天气过程中，北半球中高纬度环流均呈“两脊一槽”型分布，乌山阻高异常强盛、南亚高压加强东伸、副高异常加强和西伸北抬，致使贝加尔湖槽底冷空气盘踞在50°N以北地区，难以南下影响包括重庆地区在内的长江流域地区；低层的菲律宾附近及以北的西北太平洋地区为异常反气旋，尤其是过程2中，重庆处在副高西段的强下沉中心区域内，造成该区域晴热天气突出。从水汽输送条件看，两次区域高温天气过程，一是来自西北太平洋的暖湿气流对长江流域的输送不明显，二是中南半岛为东风异常，基本没有自印度洋的西南方向水汽输送到长江流域及重庆；辐合辐散场上，重庆地区处在异常强水汽辐散中心区内。以上位势高度场、风场、水汽场等大气环流场上异常形势叠加，便造成该地区异常强区域高温天气过程。

3.2 南亚高压和副高的异常特征

受副高和南亚高压的共同影响，几乎每年夏季重庆都会出现区域高温天气过程，但2022年的两段区域高温天气过程为什么如此极端？下面从副高和南亚高压的历史极端性进行分析。过程1中，南亚高压强度(96.01×10^6 km^2·gpm)和中心位置(96.01°E)偏东程度均为1981年以来第二(图 7a、c)；副高西伸脊点(97.94°E)，

偏西程度为1981年以来第四(图7c)。第二段区域高温天气过程中，南亚高压和副高的南北位置并未出现异常(图7e)，但二者的强度(分别为94.88×10^6 km^2·gpm和571.13×10^6 km^2·gpm)均达到了1981年以来的极端异常最强(图7d)；副高西伸脊点(93.42°E)偏西程度创1981年以来最西；南亚高亚中心位置(86.28°E)偏东程度为1981年以来第五(图7f)，虽未达到极端的程度但较为异常。综合上述分析，两次特强区域高温天气过程中，副高和南亚高压的强度和东西位置的异常和极端变化，可能是造成重庆夏季极端高温天气过程最为直接的原因。

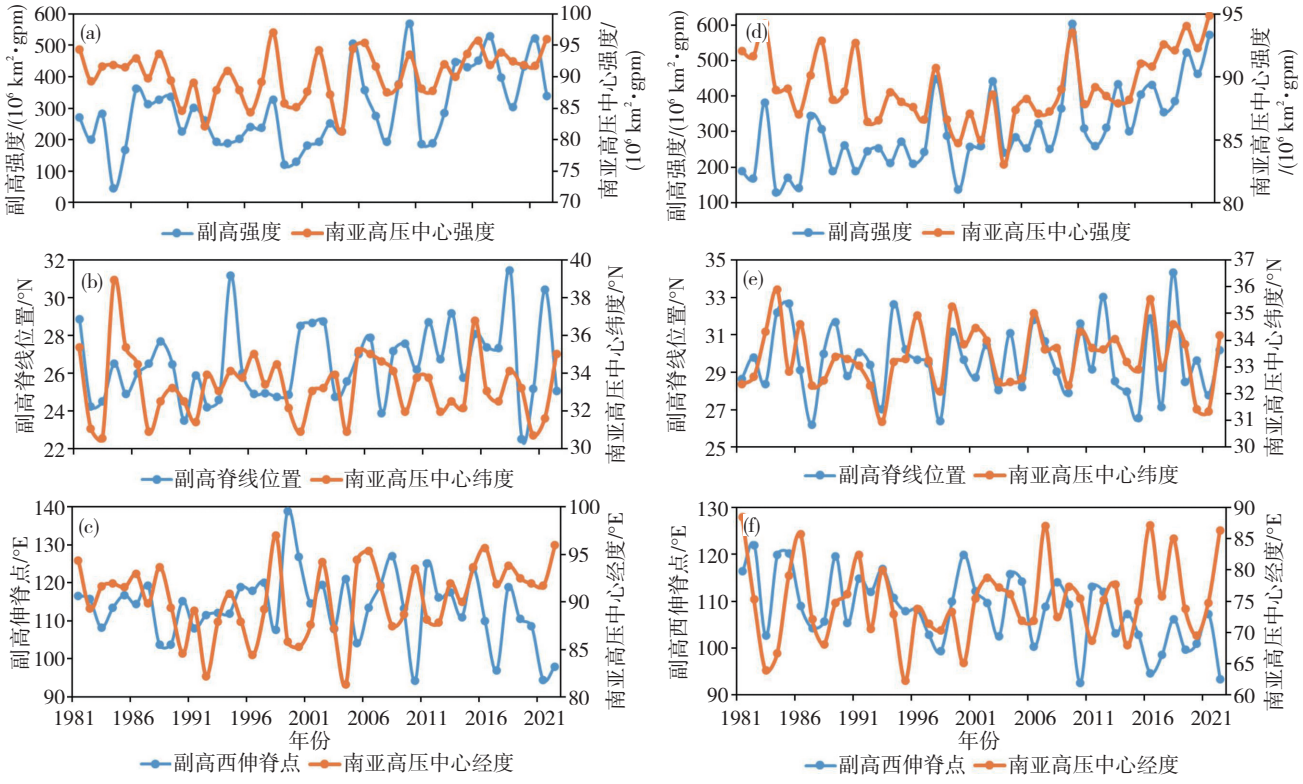


图7 1981—2022年7月4—17日(a—c)、7月24日—8月29日(d—f)副高与南亚高压强度指数(a，d)、副高脊线位置和南亚高压中心纬度(b，e)、副高西伸脊点与南亚高压中心经度(c，f)历年变化

Fig.7 Interannual variability of the Subtropical High and South Asian High intensity index during the averaged periods of (a–c) July 4–17, 1981–2022 and (d–f) July 24–August 29, 1981–2022. (b, e) The subplots include the intensity index of the Subtropical High and South Asian High (a, d), the position of the Subtropical High ridge line and the latitude of the South Asian High center, and (c, f) the longitude of the westward extension point of the Subtropical High ridge and the South Asian High center. The averages are taken over the specified time frames for each parameter

4 不同等级高温天气环流系统差异

4.1 500 hPa位势高度场的差异分析

为深入理解2022年夏季重庆特重区域高温天气过程有何特殊性，进一步对重庆中等程度以上不同等级区域高温天气过程的大气环流的差异性进行分析，根据前面标准选取2001—2022年间特重、重度和中度区域高温天气过程进行合成分析。图8给出P1(特重)、P2(重度)和P3(中度)区域高温天气过程期间500 hPa位势高度场及其距平场，以及P1—P3区域高温天气过程距平场差值合成图，可以看出重庆出现中度及以上等级区域高温天气过程时，北半球欧亚中高纬大气均为“+－+”的双阻型(乌山阻高和鄂海阻高同时维持)纬向型环流控制，而不同等级区域高温天气过程下，这种双阻型环流的南北有明显的差异。出现区域高温天气过程时，这种双阻型环流位置偏西偏北，尤其是在P1区域高温天气过程时贝加尔湖地区的负距平中心位于50°N以北地区(图8a)。

过程1和过程2出现两段P1强度的区域高温天气过程。与历史特重区域高温天气过程时的环流特征相似，欧亚中高纬500 hPa位势高度场出现了会造成该地区高温的“+－+”的双阻型异常环流，同时中低纬南亚高压异常偏强和副高偏强、偏西，从而出现了P1强度的区域高温天气过程。比较两段区域高温天气过程，虽然两段区域高温天气过程均达到特重等级，但由于过程2乌山阻塞高压较过程1更强、双阻型环流更偏北；中低纬地区南亚高压更强、副高更偏西，达到自1961年以来历史最偏西的位置，使得P2高温过程强度强于P2高温过程，形成极端区域高温天气过程。

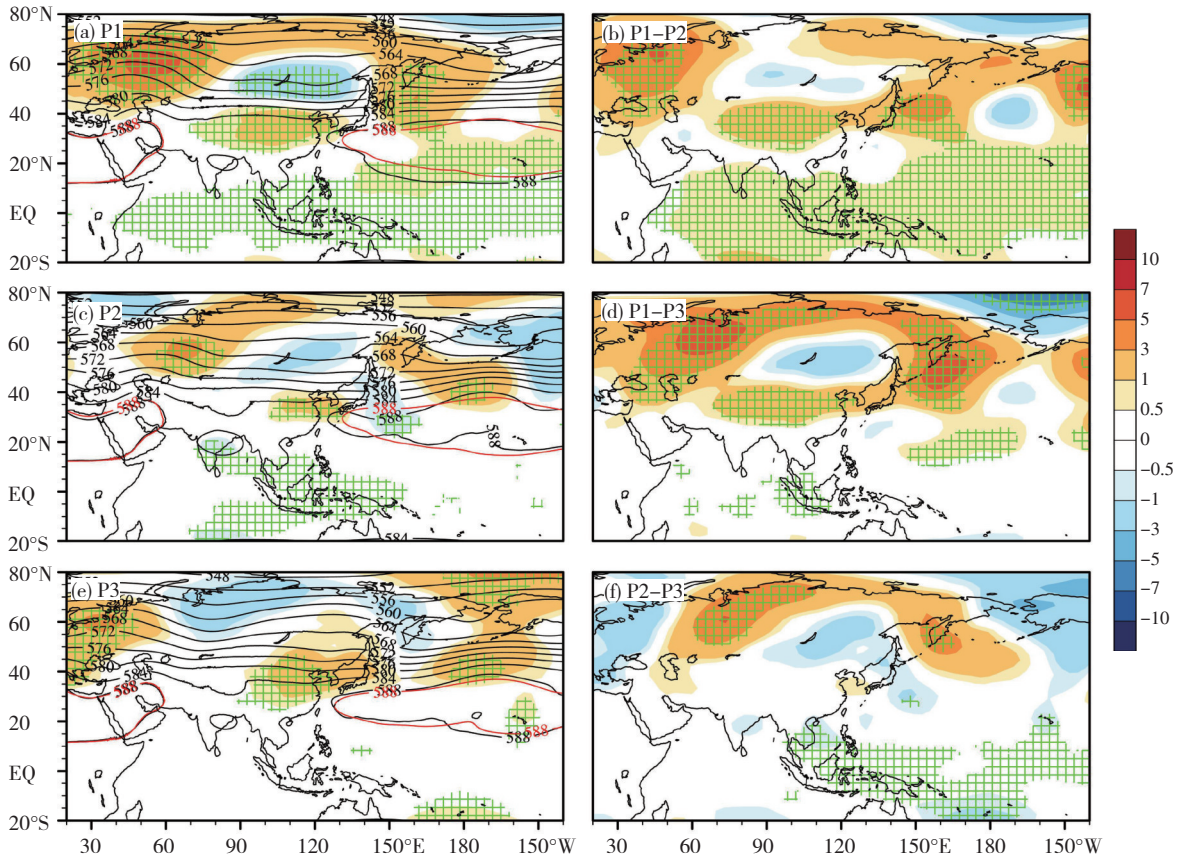


图 8 P1(a)、P2(c)和P3(e)区域高温天气过程期间500 hPa位势高度场(黑色实线,单位:10 gpm,红色实线表示气候平均588等值线)及其距平场(填色,单位:10 gpm)分布以及P1—P3区域高温天气过程距平场差值P1–P2 (b)、P1–P3 (d)和P2–P3 (f)合成图 (图中绿色网格区为通过90%显著检验区)

Fig.8 Spatial distribution of the mean 500 hPa geopotential height fields (black solid lines, unit: 10 gpm, with red solid lines indicating climatological contours at 588) and their anomalies during episodes of High-Temperature events in regions (a) P1, (c) P2, and (e) P3. Additionally, the composite maps of anomaly differences during High-Temperature events between (b) P1–P2, (d) P1–P3 , and (f) P2–P3 are presented. The green grid areas in the figure represent regions passing the 90% significance test

4.2 100 hPa位势高度场的差异分析

分析P1、P2和P3区域高温天气过程平均100 hPa位势高度场及距平分布(图 9)及P1—P3区域高温天气过程的偏差可知,重庆出现中度及以上等级区域高温天气过程时,北半球欧亚中高纬大气同样为“+ – +”的双阻型纬向型环流,且这种特征越明显,高温的强度越强,此外,高温强度越强,南亚高压位置越偏东、偏北。

与历史特重区域高温天气过程时的环流特征相似,2022年出现的两段P1强度区域高温天气过程中,北半球100 hPa位势高度场上,欧亚中高纬同样出现了“+ – +”的纬向型异常环流,且这种特征非常显著,同时南亚高压的位置显著偏东、偏北。比较前后两段区域高温天气过程,虽然在两段区域高温天气过程中双阻型纬向环流型特征和中低纬度南亚高压偏强、偏东的特征同样非常明显,但过程2中,双阻型纬向环流型的南北位置较过程1时北抬了约10个纬度,同时南亚高压北界位置较过程1北抬了约5个纬度,东伸程度也更加显著和极端,从而造成了该地区1961年以来历史最极端区域高温天气过程。

4.3 副高的差异分析

副高是影响重庆地区高温的最直接环流系统,为了解2022年极端区域高温天气过程中副高的影响,先对重庆2001—2022年出现的P1、P2和P3区域高温天气过程时副高面积、强度和位置的变化进行详细的分析。

根据统计分析,当副高面积偏大、强度偏强、位置偏西偏北时,重庆易出现高温天气过程。当以上各项指标出现异常时,极易出现特强高温天气过程。2022年两段区域高温天气过程中,过程1副高面积指数为121.65×10^6 km^2,较P1区域高温天气过程的平均值(下称“平均值”)偏大9.95×10^6 km^2(图 10a);强度指数为339.82×10^6 km^2·gpm,接近P1平均值(图 10b);脊线位置为25.04°N,接近P3平均值(图 10);西伸脊点位置在97.94°E,较P1平均值偏西10.36°E(图 10d)。过程2中,副高面积指数为153.13×10^6 km^2,较P1平均值偏大41.43 km^2(图 10a);强度指数为571.66×10^6 km^2·gpm,较P1平均值偏强227.46×10^6 km^2·gpm(图 10b);脊线位置

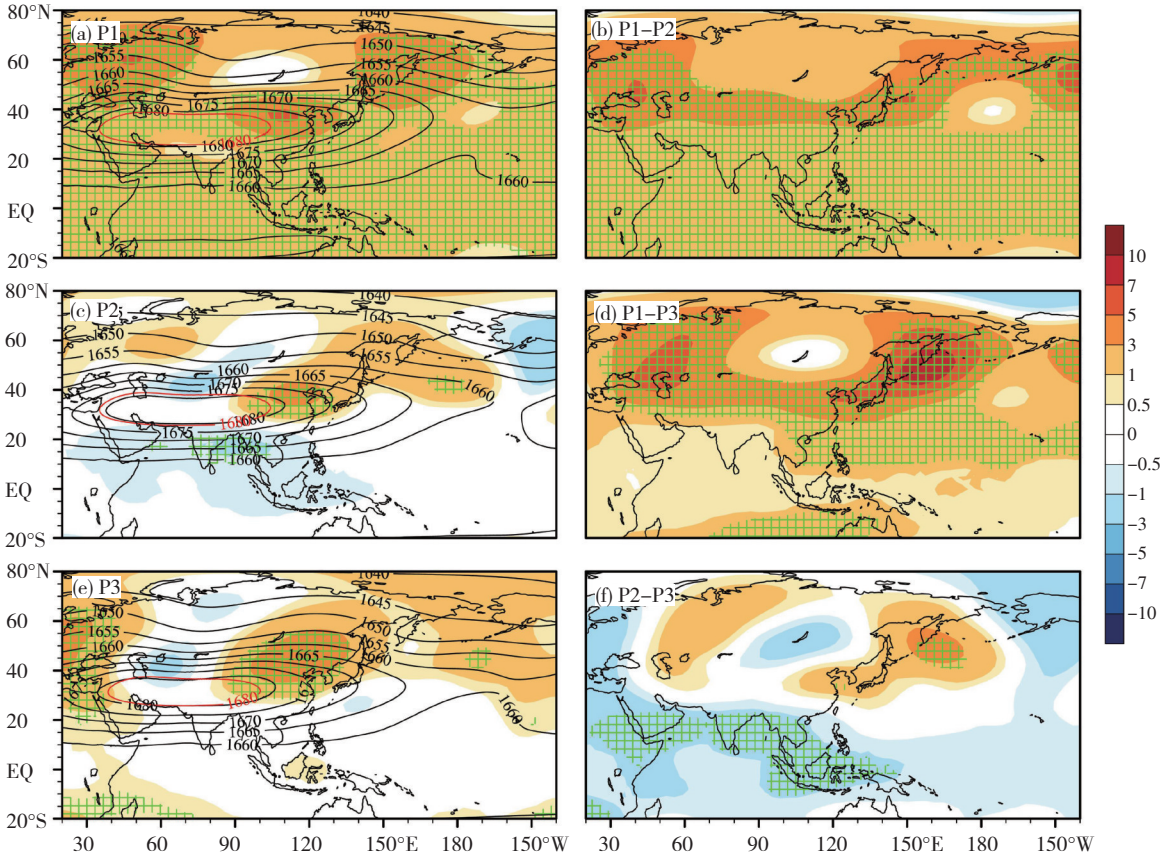


图 9　同图 8，但为 100 hPa

Fig.9 Same as Fig.8, but for 100 hPa

为30.18°N，较P1平均值偏北1.18°N(图10c)；西伸脊点位置在93.42°E，较P1平均值显著偏西14.88°E(图10d)。两段区域高温天气过程的副高面积和西伸位置均显著超过了有气象记录以来历史最强高温P1过程的平均值，尤其是过程2中，副高的面积偏大、强度偏强、脊线偏北和西伸脊点偏西远远超过历史最强高温P1过程平均值，几乎都达到2001年以来最大，故而造成极端区域高温天气过程。

5　大气环流异常的海温外强迫影响

为深入理解造成2022年夏季大气环流异常，尤其是副高异常的原因，进一步分析了海温外强迫因子的影响。通过分析4—6月、5—7月和6—8月滑动海温异常可见(图略)，海温的月份间变化性较小，全球的海

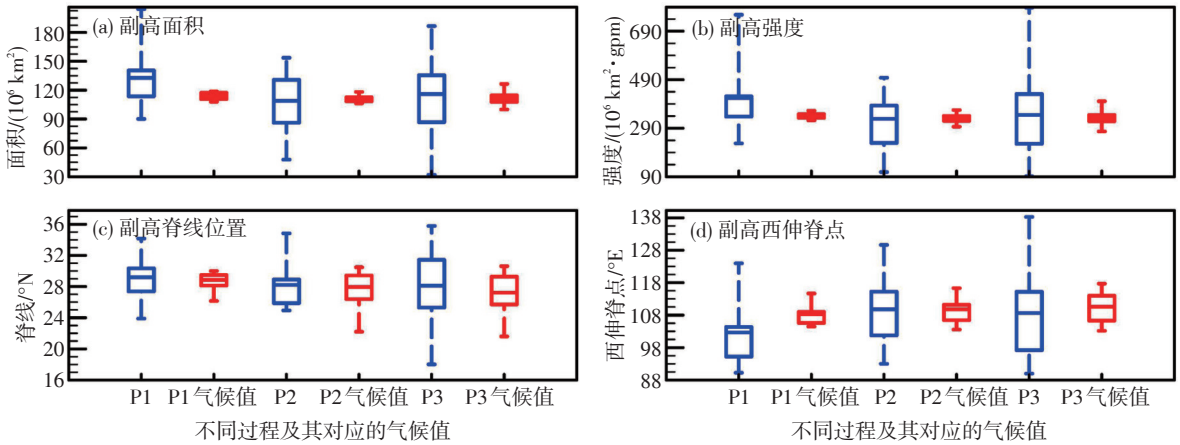


图 10　P1—P3对应区域高温天气过程逐日副高面积(a)、强度(b)、脊线位置(c)和西伸脊点(d)箱线图(蓝色为P1—P3的过程值，红色为对应的气候值)

Fig.10 Box-and-Whisker plots of daily evolution of Subtropical High characteristics, including (a) area, (b) intensity , (c) ridge line position , and (d) westward extension point, corresponding to High-Temperature events in regions P1–P3. The blue segments represent process values for P1–P3, while the red segments denote the corresponding climatological values

温异常区基本呈现出相同特征，因此本文仅给出了2022年夏季海温异常(图 11a)。从图中可见，赤道中东太平洋海温冷水位相明显，持续着自2021年10月以来的La-Niña事件，而西北太平洋呈现明显偏高的态势。通过分析110°—120°E范围内Hadley环流的经向环流变化可知(图 11b、c)，2022年7月赤道西太平洋在暖海温的影响下，在0°—10°S为强对流上升运动，而在20°—30°N为强盛的下沉运动，该区域的下沉运动正好与副高的下沉区叠加，使副高的强度进一步加强(图 11b)。至8月，在La-Niña事件持续作用下，赤道太平洋海温仍维持中东部偏冷、西部偏暖，在西部暖海温的作用下，赤道西太平洋110°—120°E为强对流上升运动，且对流上升区北推到20°N附近，从而将Hadley环流的下沉区加强并北推到25°—30°N(图 11c)，使副高进一步北抬并在30°N附近加强和西伸。同样，研究也指出：La-Niña事件会通过增加西北太平洋地区反气旋的频率来增强副高(任宏昌，2017；Yang et al.，2022)，在强大的副高下沉气流作用下，造成了重庆地区持续的极端高温天气过程。

此外，武炳义和张人禾(2011)、陆日宇和黄荣辉(1998)的研究结果认为，夏季西北太平洋海温升高时有利于双阻型环流异常的出现，且西北太平洋海温与鄂海阻高是通过夏季该海域海温所激发出的经向遥相关波列而产生联系。本文计算了130°E—150°W、30°—60°N区域平均海温距平值后发现距平值达1.15 ℃，为历史同期最高值，故2022年夏季鄂海阻高的异常可能与西北太平洋海温的异常偏暖有关，并对重庆夏季极端高温天气过程的发生起到了积极的作用。

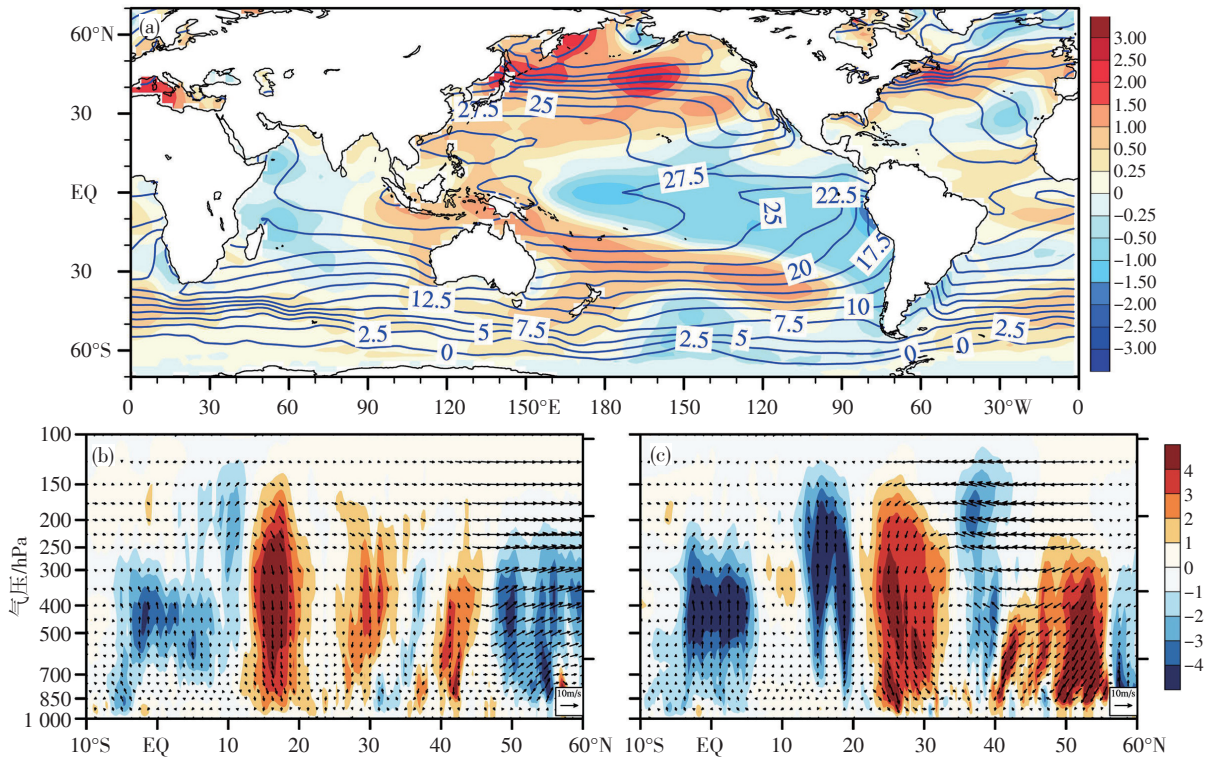


图 11 2022年夏季海温(蓝色实线，单位：℃)及其距平场空间分布(a，填色，单位：℃)以及7月(b)和8月(c) Hadley环流纬向环流剖面图(填色，单位：0.01 Pa·s^{-1}，剖面为沿110°—120°E平均)

Fig.11 Spatial distribution of Sea Surface Temperature (SST) during the Summer of 2022 (blue solid line, unit: ℃) and its anomaly field (a, shaded, unit: ℃). Additionally, vertical Cross-Sectional profiles of the Hadley Circulation in (b) July and (c) August are presented (shaded, unit: 0.01 Pa·s^{-1}), with the profile averaged along 110°–120°E

6 结论与讨论

2022年夏季，重庆出现1961年以来最强的持续性极端高温事件。本文利用站点观测和ERA5再分析资料，分析了重庆极端高温事件特征及主要成因，主要结论如下：

(1) 2022年夏季，重庆出现有完整气象记录以来最为严重的区域高温天气过程，呈现持续时间长、影响范围广和极端性强的特点。季内区域平均高温日数达49.7 d，是1961年以来历史同期最多。

(2) 在两段特强区域高温天气过程中，低纬度地区南亚高压加强东伸配合副高的异常加强及西伸北抬，致使贝加尔湖槽底冷空气位置盘踞在50°N以北地区，难以南下影响包括重庆在内的长江流域地区；同时重庆处在副高西段的强下沉中心区域内，重庆及以东地区处在异常强水汽辐散中心区内，位势高度场、风场、

水汽场等各种大气环流场异常形势叠加，造成该地区出现异常强高温天气。

(3) 副高和南亚高压的强度和东西位置的异常是导致重庆高温的重要指标，在2022年的最强区域高温天气过程中，副高西伸脊点偏西程度为2001年以来最西，同时南亚高亚异常偏东，造成重庆夏季出现持续性极端高温事件。

(4) 2022年夏季，在La-Niña事件持续作用下，赤道太平洋海温维持中东部偏冷、西部偏暖的状态，Hadley环流下沉区加强并北推到25°—30°N，使副高进一步北抬并在30°N附近加强和西伸。在强大的副高下沉气流作用下，造成了重庆地区持续极端高温天气。并且，2022年夏季鄂海阻高异常可能与西北太平洋海温的异常偏暖有关，并对重庆夏季极端高温事件的发生起到了积极的作用。

本文针对重庆2022年夏季极端高温事件，分析了主要环流影响系统。但影响气候的因子涵盖多个圈层，可能还受到海洋以外，如青藏高原积雪、海冰等多种因子和外强迫信号的影响，其过程和影响机制也复杂多变，还需要今后不断进行深入细致的分析和研究工作，以期为提高气候预测准确率提供更加科学和全面的参考依据。

参考文献(References):

岑思弦，陈文，胡鹏，等.2021.南亚高压演变过程及其变异机制研究进展[J].高原气象，40(6):1305-1317. Chen S X, Chen W, Hu P, et al. 2021. Progresses in understanding the seasonal evolution of the South Asian High and the mechanisms of its variations [J]. Plateau Meteorology,40(6):1305-1317 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.zk014

陈永仁，李跃清.2008.南亚高压活动特征及其天气气候影响研究进展[J].气象科技，36(2):174-179. Chen Y R, Li Y Q. 2008. Advances in researches on activities and influences of South Asia High on Weather and Climate [J]. Meteorological Science and Technology,36(2):174-179 (in Chinese). doi:10.19517/j. 1671-6345.2008.02.011

国家气候中心微信公众号.今夏我国气候回顾：高温干旱强势来袭极端事件强发多发[EB/OL].(2022-09-04). WeChat official account of National Climate Center. Review of China's climate this summer: strong onset of high temperature and drought, frequent occurrence of extreme events [EB/OL]. (2022-09-04)

韩雪云，赵丽，姚俊强，等.2019.西北干旱区极端高温时空变化特征分析[J].沙漠与绿洲气象，13(4):17-23. Han X Y, Zhao L, Yao J Q, et al. 2019. Temporal and spatial variations of the extreme high temperatures in the arid region of northwest China [J]. Desert and Oasis Meteorology, 13(4):17-23 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2019.04.003

郝立生，马宁，何丽烨.2022.2022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，40(5):721-732. Hao L S, Ma N, He L Y. 2022. Circulation anomalies characteristics of the abnormal drought and high temperature event in the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer of 2022 [J]. Journal of Arid Meteorology,40(5):721-732 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-05-0721

贺晋云，张明军，王鹏，等.2011.近50年西南地区极端干旱气候变化特征[J].地理学报，66(9):1179-1190. He J Y, Zhang M J, Wang P, et al. 2011. Climate characteristics of the extreme drought events in Southwest China during recent 50 years [J]. Acta Geographica Sinica,66(9):1179-1190 (in Chinese). doi:10.11821/xb201109003

黄荣辉，刘永，王林，等.2012.2009年秋至2010年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J].大气科学，36(3):443-457. Huang R H, Liu Y, Wang L, et al. 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the Spring of 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,36(3):443-457 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11101

姜大膀，王晓欣.2021.对IPCC第六次评估报告中有关干旱变化的解读[J].大气科学学报，44(5):650-653. Jiang D B, Wang X X. 2021. A brief interpretation of drought changes from IPCC Sixth Assessment Report [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,44(5):650-653 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210810007

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 Meteorology,41(2):489-501 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00099

李忆平，王劲松，李耀辉.2015.2009/2010年中国西南区域性大旱的特征分析[J].干旱气象，33(4):537-545. Li Y P, Wang J S, Li Y H. 2015. Characteristics of a regional meteorological drought event in Southwestern China during 2009-2010 [J]. Journal of Arid Meteorology,33(4):537-545 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-04-0537

李永华，徐海明，刘德. 2009. 2006年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常[J].气象学报，67(1):122-132. Li Y H, Xu H M, Liu D. 2009. Features of the extremely severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006 [J]. Acta Meteorologica Sinica,67(1):122-132 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2009.013

林纾，李红英，黄鹏程，等.2022. 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，40(5):748-763. Lin S, Li H Y, Huang P C, et al. 2022. Characteristics of high temperature, drought and circulation situation in summer 2022 in China [J]. Journal of Arid Meteorology,40(5):748-763 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-05-0748

刘芸芸，李维京，艾孑兑秀，等.2012.月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J].应用气象学报，23(4):414-423. Liu Y Y, Li W J, Ai W X, et al. 2012. Reconstruction and application of the monthly Western Pacific Subtropical High indices [J]. Journal of Applied Meteorological Science,23(4):414-423 (in Chinese)

陆日宇，黄荣辉.1998.东亚-太平洋遥相关型波列对夏季东北亚阻塞高压年际变化的影响[J]. 大气科学，22(5):727-734. Lu R Y, Huang R H. 1998. Influence of East Asia/Pacific teleconnection pattern on the interannual variations of the Blocking Highs over the Northeastern

Asia in Summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,22(5):727–734 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.1998.05.07

钱永甫,张琼,张学红.2002.南亚高压与我国盛夏气候异常[J].南京大学学报(自然科学版),38(3):295–307.Qian Y F, Zhang Q, Zhang X H. 2002. The South Asian High and its effects on China's Mid–Summer climate abnormality [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences),38(3):295–307 (in Chinese)

任宏昌.2017.海温与青藏高原积雪对中国南方夏季降水协同影响及数值模拟研究[D].南京:南京信息工程大学. Ren H C. 2017. Mechanisms and Modelling of joint forcings of sea surface temperature and Tibetan snow on summer southern China rainfall variability [D]. Nanjing,Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)

王斌,李跃清.2011.近10多年南亚高压活动特征及其影响的研究进展[J].高原山地气象研究,31(2):75–80. Wang B, Li Y Q.2011. Advances in researches of South Asia High activities and its influences on summer drought and flood in China in recent more than 10 years [J]. Plateau And Mountain Meteorology Research,31(2):75–80 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184·2011.02.015

魏凤英.2007.现代气候统计诊断与预测技术:第2版[M].北京:气象出版社:160–169. Wei F Y, 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology 2nd edition [M]. Beijing: China Meteorological Press: 160–169 (in Chinese)

武炳义,张人禾.2011.东亚夏季风年际变率及其与中、高纬度大气环流以及外强迫异常的联系[J].气象学报,69(2):219–233. Wu B Y, Zhang R H. 2011. Interannual variability of the East Asian summer monsoon and its association with the anomalous atmospheric circulation over the mid–high latitudes and external forcing [J]. Acta Meteorologica Sinica, 69(2): 219–233 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2011.019

吴秋洁.2019.近55年西南地区干旱气候特征及成因分析[D].成都:成都信息工程大学,2019. Wu Q J. 2019. The climatic characteristics and cause analysis of the drought in Southwest China in past 55 years [D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology (in Chinese)

武新英,郝增超,张璇,等.2021.中国夏季复合高温干旱分布及变异趋势[J].水利水电技术,52(12):90–98. Wu X Y, Hao Z C, Zhang X, et al. 2021. Distribution and trend of compound hot and dry events during summer in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,52(12):90–98 (in Chinese)

许婷婷,杨霞,周鸿奎.2022.1981–2019年新疆区域性高温天气过程时空特征及其环流分型[J].干旱气象,40(2):212–221. Xu T T, Yang X, Zhou H K. 2022. Spatio–temporal characteristics and circulation types of regional high temperature weather processes in Xinjiang during 1981–2019 [J]. Journal of Arid Meteorology,40(2):212–221 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006–7639(2022)–02–0212

杨淑群,潘建华,柏建.2008.2006年四川极端高温干旱影响系统分析[J].西南大学学报(自然科学版),30(7):133–137. Yang S Q, Pan J H. 2008. Analysis of the Extreme Heat Wave and Drought over Sichuan Basin in 2006 [J]. Journal of Southwest University,30(7):133–137 (in Chinese). doi:1673–1719 (2007)03–0149–05

余荣,翟盘茂.2021.关于复合型极端事件的新认识和启示[J].大气科学学报,44(5):645–649.Yu R, Zhai P M. 2021. Advances in scientific understanding on compound extreme events [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,44(5):645–649 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki. dqkxxb.20210824006

岳岩裕,吴翠红,周悦,等.2018.不同环流背景下极端高温天气特征和预报服务要点[J].干旱气象,36(6):1027–1034.Yue Y Y, Wu C H, Zhou Y, et al. 2018.Weather feature and service points of extreme high temperature under different circulation situation [J]. Journal of Arid Meteorology,36(6):1027–1034 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006–7639(2018)–06–1027

张强.2022.科学解读"2022年长江流域重大干旱"[J].干旱气象,40(4):545–548. Zhang Q. 2022. Scientific interpretation of severe drought in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Arid Meteorology,40(4):545–548 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006–7639(2022)–05–0733

中国气象局国家气象中心. 2015.区域性高温天气过程等级划分(QX/T228–2014) [S].北京:气象出版社. National Meteorological Centre. 2015. Classification of Regional High Temperature Weather Processes (QX/T228–2014) [S]. Beijing: China Meteorological Press

邹旭恺,高辉.2007. 2006年夏季川渝高温干旱分析[J].气候变化研究进展,3(3):149–153. Zhou X K, Gao H. 2007. Analysis of severe drought and heat wave over the Sichuan Basin in the Summer of 2006 [J]. Climate Change Research,3(3):149–153 (in Chinese)

朱浩楠,刘晓冉,李永华,等.2020.考虑地形的空间插值算法在复杂下垫面地区气温和降水精细化插值的评估[J].气象,46(5):655–665. Zhu H N, Liu X R, Li Y H. et al. 2020. Evaluation of terrain–considered spatial interpolation methods on temperature and precipitation in complex underlying surface region [J]. Meteorological Monthly,46(5):655–665 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2020.05.006

IPCC. Climate Change 2021. 2021. The physical science basis contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]

Yang K, Cai W J, Huang G, et al. 2022. Increased variability of the Western Pacific Subtropical High under greenhouse warming [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,119(23–29). doi:10.1073/pnas.2120335119

(责任编辑 闵爱荣)