

肖莺,张俊,杜良敏,等,2023.长江流域夏季高温年代际变化季内非一致特征及其环流异常分析[J].气象,49(9):1119-1130.  
Xiao Y,Zhang J,Du L M,et al,2023. Intraseasonal inconsistency of interdecadal variations of summer high temperature in Yangtze River Basin and the corresponding atmospheric circulation anomaly[J]. Meteor Mon,49(9):1119-1130(in Chinese).

# 长江流域夏季高温年代际变化季内非一致特征 及其环流异常分析<sup>\*</sup>

肖 莺<sup>1,2,3,4</sup> 张 俊<sup>5</sup> 杜良敏<sup>1,3,4</sup> 任永建<sup>2,6</sup> 高雅琦<sup>1,3,4</sup>

1 武汉区域气候中心,武汉 430074

2 湖北省烟草气象研究重点实验室,武汉 430205

3 三峡国家气候观象台,湖北宜昌 443002

4 中国气象局流域强降水重点开放实验室,武汉 430205

5 三峡水利枢纽梯级调度通信中心,湖北宜昌 443133

6 湖北省气象服务中心,武汉 430205

**提 要:** 利用长江流域台站观测最高气温资料、梅雨资料和 NCEP/NCAR 再分析资料,分析了 1961—2020 年长江流域高温站次在夏季不同时期的年代际转折特征及其环流异常。结果表明:长江流域的高温主要集中在中东部(105°E 以东区域)。长江流域中东部夏季高温在 2002 年前后存在气候突变,相对于 35℃ 阈值,37℃ 和 40℃ 的高温站次在突变前后的增量更加明显。季内不同时段年代际变化具有非一致特征,可将其分为两类:增长平缓期,无明显的年代际转折;增长快速期,在 2002 年前后存在突变,且年代际相对变化率较夏季整个季节的相对变化率高。欧亚遥相关、东亚太平洋遥相关、梅雨结束时间是造成季内非一致性变化的主要原因。在增长快速期,高温年代际显著增多往往伴随着东亚遥相关的异常加强,其中相对变化率最大的两个时段在欧亚中高纬环流有着明显差异;而在增长平缓期,欧亚遥相关有小幅度的年代际增强,东亚遥相关年代际减弱,其中 7 月 9—19 日高温站次增长缓慢还和梅雨结束偏晚有关。

**关键词:** 夏季高温,季内非一致,年代际变化,环流异常

**中图分类号:** P461

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.053102

## Intraseasonal Inconsistency of Interdecadal Variations of Summer High Temperature in Yangtze River Basin and the Corresponding Atmospheric Circulation Anomaly

XIAO Ying<sup>1,2,3,4</sup> ZHANG Jun<sup>5</sup> DU Liangmin<sup>1,3,4</sup> REN Yongjian<sup>2,6</sup> GAO Yaqi<sup>1,3,4</sup>

1 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

2 Key Laboratory of Tobacco Meteorology Research of Hubei Province, Wuhan 430205

3 Three Gorges National Climatological Observatory, Hubei, Yichang 443002

4 Key Laboratory of Basin Heavy Rainfall, CMA, Wuhan 430205

5 Three Gorges Cascade Dispatching and Communication Center, Hubei, Yichang 443133

7 Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205

<sup>\*</sup> 长江流域气象开放基金项目(CJLY2022Y07)、湖北省烟草公司科技项目(027Y2022-006)、中国长江三峡电力股份有限公司项目(2421020001)、湖北省自然科学基金项目(2022CFD014)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-082)和国家重点研发计划(2017YFC1502306)共同资助

2022 年 5 月 21 日收稿; 2023 年 8 月 2 日收修定稿

第一作者:肖莺,主要从事气候预测及机理研究. E-mail:xiaoying15036@163.com

通讯作者:杜良敏,主要从事人工智能在气候预测应用研究. E-mail:306989@qq.com

**Abstract:** Using the maximum temperature observation data, Meiyu data and NCEP/NCAR reanalysis data, we analyze the interdecadal variation characteristics of high temperature stations in Yangtze River Basin and the corresponding atmospheric circulation anomaly at different periods of summer from 1961 to 2020. The results show that high temperature events mainly occurred in the middle-east part (east of 105°E) of the Yangtze River Basin. There existed an abrupt mutation in the summer high temperature across this basin around 2002. Relative to the 35°C threshold, the increments of high temperature stations at 37°C and 40°C were more obvious before and after the mutation. But interdecadal variation characteristics at different periods of summer were inconsistent, and they can be divided into two categories: the slow increasing periods without significant interdecadal turnings and the quick increasing periods, in which an abrupt mutation occurred around 2002 and the interdecadal relative change rates were higher than that of the whole season of summer. The Eurasian teleconnection, the East Asia-Pacific teleconnection and the end time of Meiyu were the major contributors to the intraseasonal inconsistency. During the quick increasing periods, the significant interdecadal increase of high temperature was always accompanied by abnormal intensification of East Asia-Pacific teleconnection. The circulations in the mid-high latitude over Eurasia were significantly different between the two periods with the largest relative change rates. During the slow increasing periods, however, Eurasian teleconnection strengthened at a lower magnitude, while East Asia-Pacific teleconnection was weakened. The slow increase of high temperature stations in 9–19 July was related to the late end of Meiyu.

**Key words:** summer high temperature, intraseasonal inconsistency, interdecadal variation, atmospheric circulation anomaly

## 引 言

1970 年以来的 50 年是过去 2000 年以来最暖的 50 年,2011—2020 年全球地表温度比工业革命时期(1850—1900 年)上升了约 1°C (IPCC, 2021)。在全球气候变暖背景下,极端天气气候事件频发重发,其中高温对全球变暖的响应尤为突出。全球大部分地区高温热浪愈发频发,且更为持久(Perkins et al, 2012; Karl and Trenberth, 2003),我国长江流域也是其中之一。2003 年夏季,我国江南地区遭受大范围热浪袭击,高温天气出现的地域之广为历史罕见(杨辉和李崇银, 2005)。2013 年夏季我国南方地区,包括长江中下游以及重庆等地,又出现了少有的持续高温天气,其覆盖范围、持续时间和强度均超过 2003 年夏季(彭京备等, 2016; 唐恬等, 2014; 董广涛等, 2016)。2019 年,在异常高温和降水亏缺的共同作用下,长江中下游地区发生了近 50 年来历史同期最严重的伏秋连旱(李俊等, 2020)。这些高温事件给长江流域经济发展和人民生活造成了严重的影响,因此高温事件特征及成因分析受到越来越多的关注。

针对长江流域高温天气的研究,气象专家已开展了诸多工作。王喜元等(2016)分析了 1961—2010 年长江流域高温热浪时空变化特征,发现高温热浪频次、持续时间和强度在 1985 年以前呈下降趋势,而 1985 年之后明显上升,21 世纪初为高温热浪发生最频繁的年代。从整体线性趋势上看,林爱兰等(2021)通过对比华南、长江、黄淮和华北 4 个区域持续高温过程,认为长江区域高温线性增长趋势比华南弱,主要是长江区域持续高温过程显著增强出现在近 10 年。杨涵洧等(2018)也进一步证实了长江三角洲夏季高温在 2000 年左右存在气候突变,2000 年以后夏季高温日数和强度出现显著上升。王荣等(2023)发现不仅是高温强度,影响范围也在 1998 年前后有着突变增强特征。郭春华等(2023)通过计算不同气候区的高温危险性,认为长江中下游是全国高温综合高危险性等级地区之一。长江流域高温的形成和环流、下垫面异常息息相关。西北太平洋副热带高压(以下简称副高)的控制是长江流域高温天气形成的主要原因(史军等, 2013; 王国复等, 2018; 孙博等, 2023),强而持续的副高控制会造成高温日数和强高温过程偏多(张尚印等, 2005)。罗连升等(2016)找到了影响长江中下游盛夏高温的

青藏高原热源关键区,认为其可以作为前期预报因子。聂羽等(2018)研究成果表明,春季赤道印度洋的一致偏暖,有利于夏季副高偏强偏西,造成我国东南地区夏季容易出现高温异常。沈皓俊等(2018)发现高温日数的突变主要集中在1997—2006年,这一现象可能是太平洋年代际振荡(PDO)、印度洋—太平洋暖池和 ENSO 等共同作用的结果。

由上可见,在青藏高原热源、海温等下垫面影响下,副高强且持续,造成长江流域高温增长并存在气候突变。然而以往高温分析一般是将夏季作为一个整体分析,那么夏季季内不同时段是否存在一致的气候突变特征是本文关注的重点。通过累积距平、滑动  $t$  检验、Pettit 检验等方法确定长江流域夏季高温突变时间,对比分析突变前后季内不同时段的时代际变化差异,探寻造成季节内非一致变化的主要成因,为该地区高温天气预报与气候分析提供参考。

## 1 资料和方法

本文所用资料包括:(1)NCEP/NCAR 提供的1961—2020年的500 hPa逐日位势高度再分析资料,水平网格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ;(2)国家气候中心提供的长江流域梅雨出梅时间逐年序列;(3)1961—2020年长江流域640个站的气象观测站逐日最高气温资料。

本文采用 QX/T228—2014(全国气象防灾减灾标准化委员会,2014),将日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 定义为高温日。采用累积距平、滑动  $t$  检验、Pettit 方法等多种突变检测方法进行突变分析,采用 Pearson 相关系数进行高温成因分析。

## 2 长江流域高温事件突变特征分析

### 2.1 突变检验分析

由1961—2020年平均高温日数分布(图1)可见,高温日数呈现西少东多,在 $105^{\circ}\text{E}$ 以西大部分不足5 d, $105^{\circ}\text{E}$ 以东大部分为10~46 d。由于 $105^{\circ}\text{E}$ 以西高温发生概率低,故将长江流域 $105^{\circ}\text{E}$ 以东区域(以下简称长江流域中东部)设定为长江流域高温研究的范围,共包含421个气象站点,具体站点分布如图2所示。从站点分布看,除包含长江中下游外,长江上游东部也包含在内,其中有陕西南部、四

川东部、重庆及贵州北部。

统计1961—2020年夏季逐日出现 $35^{\circ}\text{C}$ 及以上高温的气象站次,再将每年夏季92 d的高温站次累加,得到1961—2020年逐年长江流域中东部夏季高温站次序列(图3)。从整体线性趋势上看,其气候倾向率(每10 a的变化)为 $421 \text{ 站次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,线性增长趋势相关系数为0.28,通过了0.05显著性水平检验,表明长江流域中东部高温站次存在显著的增长趋势,这与王喜元等(2016)、林爱兰等(2021)研究结果一致。那么在年代际尺度上,高温站次是否存在明显的转折?以下通过统计方法对长江流域中东部高温站次进行综合判断。

图4为1961—2020年长江流域中东部高温站

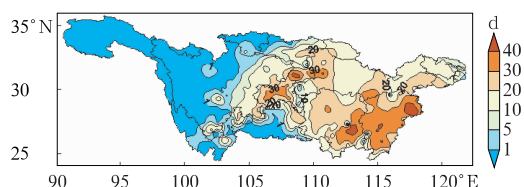


图1 1961—2020年平均长江流域  
高温日数空间分布

Fig. 1 Distribution of averaged high temperature days in Yangtze River from 1961 to 2020

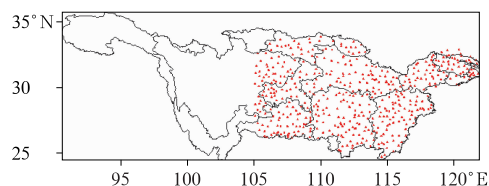


图2 长江流域中东部421个气象站点分布  
Fig. 2 Distribution of 421 meteorological stations in middle-east Yangtze River

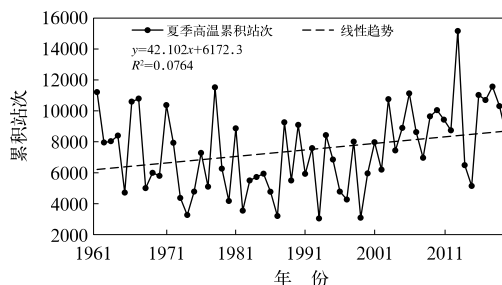


图3 1961—2020年长江流域中东部  
夏季高温站次逐年演变

Fig. 3 Evolution of high temperature stations in middle-east Yangtze River in summer from 1961 to 2020

次的累积距平检验的结果,可以看出 1961—1972 年累积距平变化较为平稳,1973—2002 年整体呈现下降的趋势,2002 年之后则开始呈现上升趋势。这表明 1973—2002 年高温站次多为负距平,2002 年之后多为正距平,即 2002 年附近可能为一个明显的突变点。图 5 给出 1961—2020 年长江流域中东部高温站次不同滑动长度  $t$  检验结果。取  $n=6, 8, 10, 12$  a 不同子序列长度。结果显示,长江流域中东部高温站次呈现先下降后上升的趋势,在 21 世纪初取得绝对值最大值并且都通过了显著性水平检验,在 2002 年附近通过了 0.05 显著性水平检验,10 a 滑动和 12 a 滑动甚至通过了 0.001 显著性水平检验。为了验证累积距平和滑动  $t$  检验的突变结果,再用 Pettit 检验进行验证(图略),同样也是在 2002 年附近绝对值取得最大值,并且通过了 0.05 的显著性水平检验。结合以上 3 种突变检验的结果,可以认为长江流域中东部夏季高温站次具有较为明显的年代际转折,在 2002 年前后存在一个显著突变。

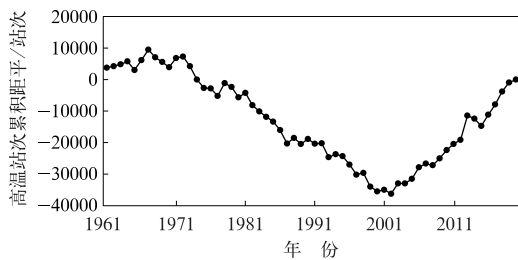
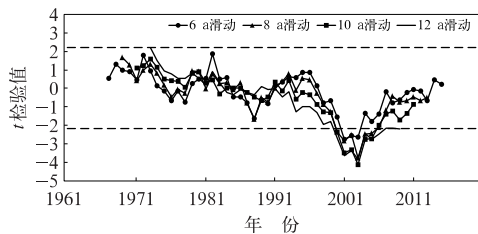


图 4 1961—2020 年长江流域中东部高温站次的累积距平

Fig. 4 Accumulated anomalies of high temperature stations in middle-east Yangtze River from 1961 to 2020



注:虚线:  $\alpha=0.05$  显著性水平临界值。

图 5 1961—2020 年长江流域中东部高温站次不同滑动长度  $t$  检验结果

Fig. 5 Results of different sliding  $t$ -tests at the high temperature stations in middle-east Yangtze River from 1961 to 2020

## 2.2 突变前后高温站次的对比分析

以 2002 年为分界点,分段分析 1961—2002 年和 2003—2020 年长江流域中东部高温的变化情况。相对变化率计算方法:用 2003—2020 年均值减去 1961—2002 年均值得到的差值再除以 1961—2002 年均值。对比 2002 年前后高温站次的平均值(表 1)发现,最高气温  $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 37^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 40^{\circ}\text{C}$  这 3 个不同等级的高温天气在 2003—2020 年均值较 1961—2002 年有明显的增加,增加率分别达到了 43.6%、79.3% 和 285.4%。相较于  $35^{\circ}\text{C}$  阈值,  $37^{\circ}\text{C}$ 、 $40^{\circ}\text{C}$  的增量更加明显,尤其是  $40^{\circ}\text{C}$  的增量可偏多约 2.8 倍。

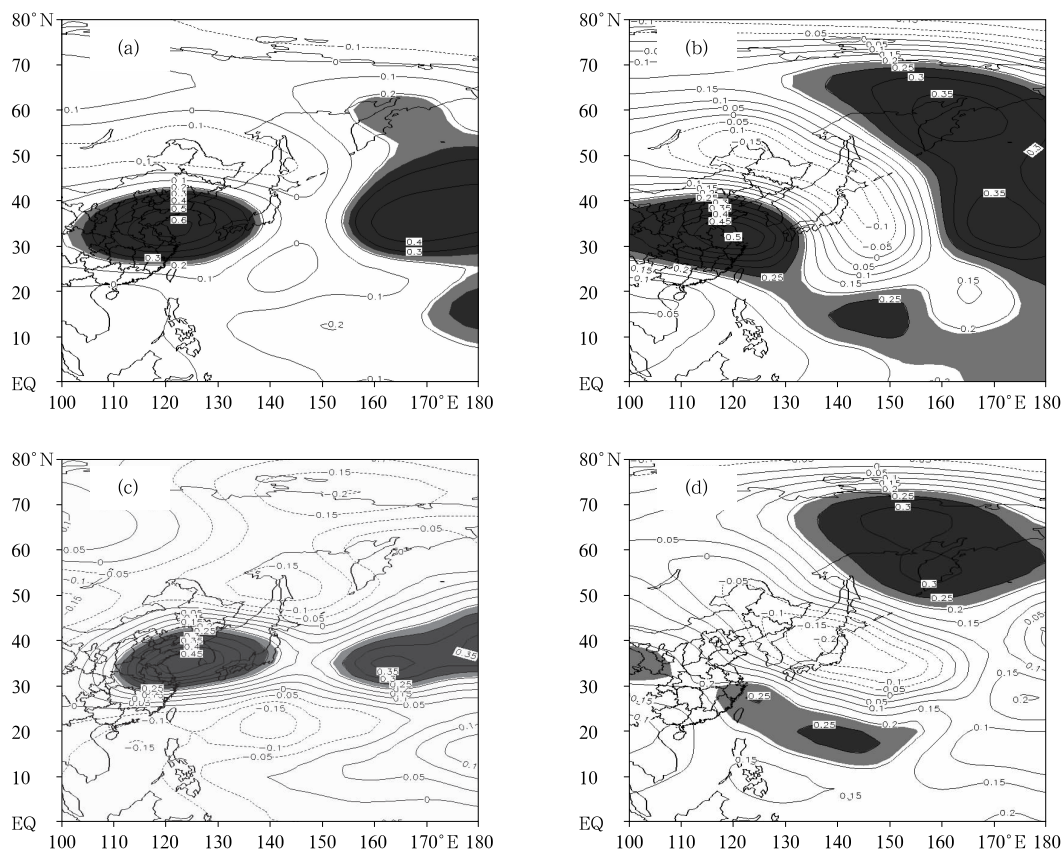
表 1 2002 年前后长江流域中东部高温站次的平均值及相对变化率

Table 1 Averages and relative change rate of high temperature stations in middle-east Yangtze River before and after 2002

特征变量	$\geq 35^{\circ}\text{C}$	$\geq 37^{\circ}\text{C}$	$\geq 40^{\circ}\text{C}$
1961—2002 年平均值/站次	6594.5	1736.6	43.9
2003—2020 年平均值/站次	9467.4	3114.4	169.2
相对变化率/%	43.6	79.3	285.4

## 2.3 不同阈值高温站次的突变成因分析

进一步探讨 2002 年突变后  $40^{\circ}\text{C}$  的高温站次增量更加明显的环流特征,考虑长江流域高温主要集中在 7 月 11 日至 8 月 31 日,计算了此时段不同阈值高温站次与 500 hPa 高度的相关系数(图 6)。不同高温阈值分别取  $[35, 40)^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 40^{\circ}\text{C}$  (以下分别简称为  $I_{35\sim 40}$ 、 $I_{\geq 40}$ )。  $I_{35\sim 40}$ 、 $I_{\geq 40}$  均与长江中下游至日本海、西北太平洋上空的高度场相关显著。此外,  $I_{\geq 40}$  还与勘察加半岛、西太平洋暖池上空的高度场相关显著(图 6a, 6b)。由于  $I_{35\sim 40}$ 、 $I_{\geq 40}$  两者之间有着较好的相关关系,相关系数为 0.66,通过了 0.001 显著性水平检验。那么利用偏相关方法,研究去除  $I_{\geq 40}$  ( $I_{35\sim 40}$ ) 后,  $I_{35\sim 40}$  ( $I_{\geq 40}$ ) 和 500 hPa 高度场的相关关系。结果显示,去除  $I_{\geq 40}$  后,  $I_{35\sim 40}$  与高度场的相关显著区仍然维持;而去除  $I_{35\sim 40}$ ,  $I_{\geq 40}$  与高度场的相关区变化较大,在东亚沿岸呈现“+ - +”分布,即勘察加半岛为正相关,日本海为负相关,东南沿海为正相关,其中日本海负相关区未通过 0.10 显著性水平检验(图 6c, 6d)。由此可见,不同阈值高温站次的年代际增长均与副高主体和长江中下游上



注:阴影:相关系数通过 0.10 显著性水平检验区域。

图 6 1961—2020 年 7 月 11 日至 8 月 31 日长江流域中东部不同阈值高温站次与 500 hPa 高度场(a,b)相关系数(阴影和等值线)和(c,d)偏相关系数(阴影和等值线)

(a,c)[35,40)℃,(b,d)≥40℃

Fig. 6 (a, b) Correlation coefficient (shaded and contour) and (c, d) partial correlation coefficient (shaded and contour) between the high temperature stations with different thresholds of middle-east Yangtze River and the 500 hPa geopotential height field from 11 June to 31 August during 1961—2020  
(a, c) [35, 40)℃, (b, d) ≥40℃

空高度场有着密切关系。长江上空高度场正异常有利于该地区维持晴朗的天气条件,晴朗的天气有利于太阳辐射到达地面,从而有利于高温天气的形成。而极端高温(最高气温≥40℃)站次还与勘察加半岛、西太平洋暖池上空高度场有关。

### 3 年代际突变背景下的夏季季内变化特征及环流异常分析

#### 3.1 高温变化的季内特征分析

上述分析结果显示,长江流域中东部高温站次从夏季整个季节尺度上看存在气候突变,那么夏季季内不同时段年代际变化是否与夏季整体一致,

均呈现出较为明显的年代际变化?

将 2003—2020 年(后 18 a)长江流域中东部平均的夏季高温站次均值减去 1961—2002 年(前 42 a)平均所得的差值,定义为  $I_{\text{diff}}$ ,计算结果如图 7 所示。由图可见, $I_{\text{diff}}$  呈现明显的波动特征,功率谱分析(图略)结果也显示,20 d 周期非常显著,通过了红噪声检验,表明  $I_{\text{diff}}$  具有显著的季内尺度的低频周期特征。在时间序列曲线上,具有显著的 3 个峰值(标准化距平≥1σ),分别发生在 7 月 3 日、7 月 29 日和 8 月 19 日,峰值与峰值之间存在着谷值,发生在 7 月 19 日、8 月 6 日。其中在 7 月 9—19 日这一时段,2002 年前后高温站次均值相当(1961—2002 年平均为 110 站次,2003—2020 年平均为 112 站次),这与长江流域梅雨结束时间有关。根据国家



气候中心统计的长江流域梅雨出梅时间,1961—2002 年共 42 a 中梅雨于 7 月 9 日及之后结束的年份有 25 a, 占总年份的 59.5%; 而 2003—2020 年共 18 a 中在 7 月 9 日及之后结束的年份有 15 a, 占总年份的 83.3%。正是由于 2002 年以后梅雨出梅时间较晚的年份比例居多, 在 7 月 9—19 日期间仍以梅雨天气过程为主, 降水量增加, 可以部分抵消高温 (梁梅和吴立广, 2015), 造成高温站次在 2002 年前后没有明显的增加。

利用不同滑动长度的  $t$  检验方法提取  $I_{\text{diff}}$  季内变化突变点, 提取第 1 个突变点之前、最后 1 个突变点之后以及相邻两个突变点之间等不同时段, 从而将夏季共 92 d 划分为具有不同特征的多个时段。图 8 给出了  $I_{\text{diff}}$  不同滑动长度  $t$  检验结果, 具体方法同图 5。结果显示,  $I_{\text{diff}}$  呈现周期波动变化, 有 6 个突变点 (6 月 16 日、7 月 7 日、7 月 21 日、8 月 3 日、8 月 12 日和 8 月 21 日) 附近通过了 0.01 显著性水平检验。因此将夏季 92 d 划分为 7 个时段, 分别是 6 月 1—15 日、6 月 16 日至 7 月 6 日、7 月 7—20 日、7 月 21 日至 8 月 2 日、8 月 3—11 日、8 月 12—20 日和 8 月 21—31 日。为了进一步证实相邻两个时段差异显著, 采用累积距平、Pettit 方法辅助判断。以上 6 个突变点在累积距平曲线中均对应着拐点。由于 Pettit 方法是直接利用秩序列来检测突变点的, 选用其中绝对值最大值为突变点, 那么采用分段, 即两个相邻时段为一个时间序列, 这样分别做 6 次检测来确定突变点, 其结果与滑动  $t$  检验一致 (图略)。下文主要基于这 7 个时段展开特征及成因分析。

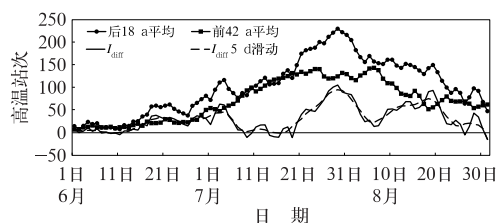
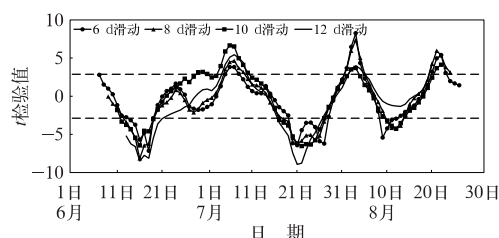


图 7 6 月 1 日至 8 月 31 日长江流域中东部夏季高温站次后 18 a 平均 (2003—2020 年)、前 42 a 平均 (1961—2002 年) 及  $I_{\text{diff}}$  逐日演变  
Fig. 7 Daily evolutions of the later 18 year average (2003—2020), the first 42 year average (1961—2002) and the  $I_{\text{diff}}$  of high temperature stations in middle-east Yangtze River from 1 June to 31 August



注: 虚线:  $\alpha=0.01$  显著性水平临界值。

图 8 6 月 1 日至 8 月 31 日  $I_{\text{diff}}$  不同滑动长度  $t$  检验结果

Fig. 8 Results of different sliding  $t$ -tests of  $I_{\text{diff}}$  from 1 June to 31 August

2002 年前后不同时段长江流域中东部高温站次的均值和相对变化率有着明显差异 (表 2)。6 月 1—15 日、7 月 7—20 日、8 月 3—11 日、8 月 21—31 日这 4 个时段高温站次相对变化率在 3.6%~28.4%, 均未超过夏季整个季节的相对变化率 43.6%, 尤其是 7 月 7—20 日这一段的相对变化率仅为 3.6%, 主要是包含了 7 月 9—19 日, 具体原因已在上文分析。6 月 16 日至 7 月 6 日、7 月 21 日至 8 月 2 日和 8 月 12—20 日这 3 个时段高温站次相对变化率均超过 50%, 尤其是有两个时段超过了 90%, 也就是说 2002 年后高温站次是 2002 年前高温站次的近两倍。分别计算出这 7 个时段累积高温站次的逐年时间序列 (表略), 按照上文中的夏季高温站次气候突变检测方法分别对其进行突变检验, 在 6 月 1—15 日、7 月 7—20 日、8 月 3—11 日、8 月 21—31 日这 4 个时段并未找到突变点, 故称之为增长平缓期; 6 月 16 日至 7 月 6 日、7 月 21 日至 8 月 2 日和 8 月 12—20 日这 3 个时段在 2002 年附近存在突变, 故称之为增长快速期。从图 9 可见, 同类不同时期的空间分布也有着较大的差异。增长平缓期空间分布差异如下: 6 月 1—15 日是插花形势, 高温站次减少站点分布较为分散, 有 2 个较为集中的区域分别位于湖南南部、江浙沪交界附近 (图 9a); 7 月 7—20 日为东部减少西部增多的分布型, 陕西南部、四川东部、重庆、贵州北部、江西南部、江浙沪交界附近高温站次增多, 大多在 2 成至 1 倍, 湖南东部和江西中部增加在 2 成以下, 其他大部分高温站次减少 (图 9c); 8 月 3—11 日和 8 月 21—31 日分布相似, 北部减少南部增多 (图 9e, 9g)。增长快速期空间分布差异如下: 6 月 16 日至 7 月 6 日大部在 5 成以上, 增多 1 倍以上的区域主要分布在湖南、江西和江浙沪交界附近

(图 9b);7 月 21 日至 8 月 2 日,东、西部增加 5 成以上,中部(湖北、湖南、江西)大部增加 2~5 成(图 9d);8 月 12—20 日大部在 5 成以上,增加 1 倍以上的区域主要分布在长江干流附近(图 9f)。基于以上分析,可以得出在年代增长的背景下,高温站次年年代际增长具有季内非一致变化特征,这种非一致特征不仅体现在时间上,还体现在空间分布上。

3.2 季内非一致变化的环流特征分析

高温的发生发展与大气环流息息相关。为了研

究高温夏季季内非一致变化的成因,图 10 给出了  $I_{diff}$  与 500 hPa 高度场差值(2003—2020 年均值减去 1961—2002 年均值)的相关系数。可以看出,欧亚中高纬自西向东呈“— + —”分布型,即挪威海以南为负相关,乌拉尔山以西为正相关,贝加尔湖以北为负相关,这种分布形势与欧亚遥相关类似,但中心位置偏西;东亚沿岸自北向南呈“— + ”分布型,即日本海为负相关,东海为正相关,这种形势与东亚太平洋遥相关分布型一致。参照 Wallace and Gutzler (1981)和 Huang(2004)的研究工作,将欧亚遥相关

表 2 2002 年前后夏季不同时间段长江流域中东部高温站次统计  
Table 2 Averages and relative change rate of high temperature stations in middle-east Yangtze River at different periods of time in summer before and after 2002

时段	1961—2002 年平均值/站次	2003—2020 年平均值/站次	相对变化率/%
6 月 1—15 日	185.5	235.7	27.1
6 月 16 日至 7 月 6 日	732.9	1413.6	92.9
7 月 7—20 日	1496.2	1550.1	3.6
7 月 21 日至 8 月 2 日	1670.6	2619.1	56.8
8 月 3—11 日	1119.3	1427.9	27.6
8 月 12—20 日	660.7	1285.1	94.5
8 月 21—31 日	729.3	936.1	28.4

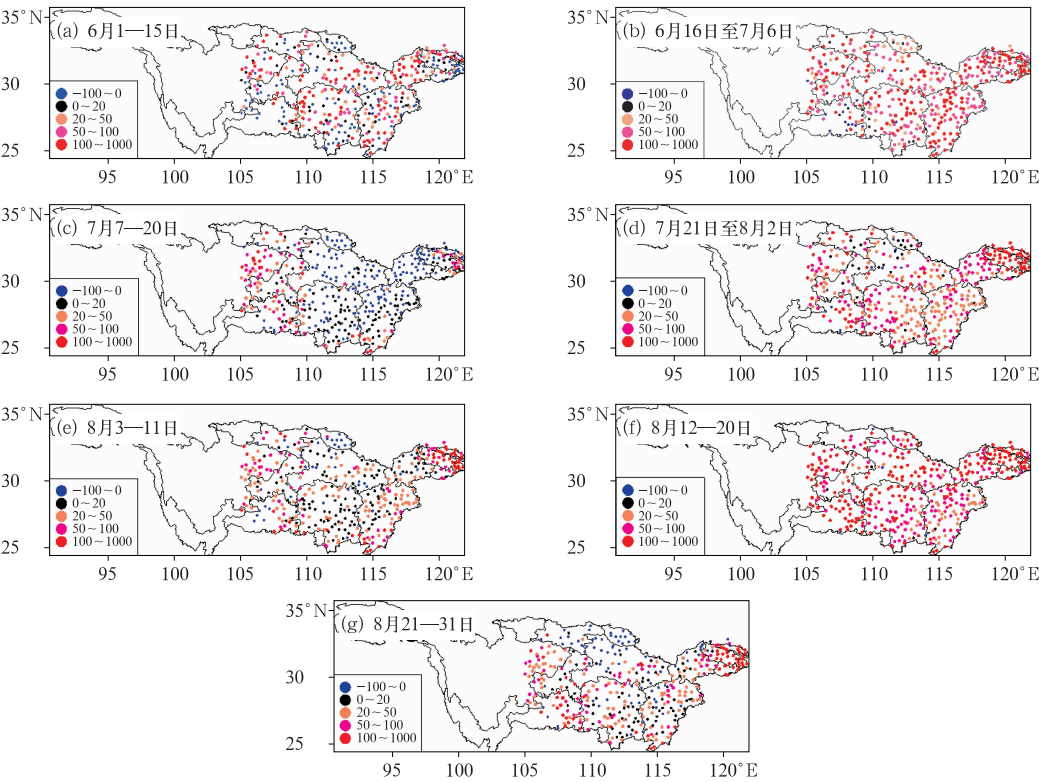
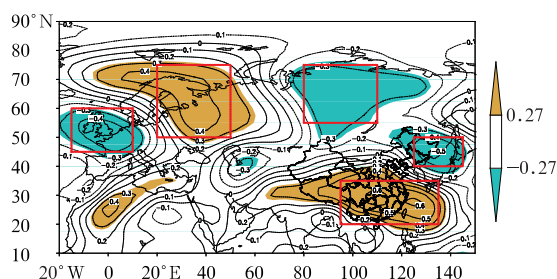


图 9 长江流域中东部夏季不同时段高温站次相对变化率分布(单位:%)

Fig. 9 Distribution of relative change rate of high temperature stations at different periods of time in middle-east Yangtze River in summer (unit: %)



注: 填色: 相关系数通过 0.01 显著性水平检验区域,  
方框: 欧亚遥相关与东亚太平洋遥相关区域。

图 10 6 月 1 日至 8 月 31 日  $I_{\text{diff}}$  与 500 hPa  
高度场差值(2003—2020 年均值减去  
1961—2002 年均值)的相关系数

Fig. 10 Correlation coefficient between  $I_{\text{diff}}$   
and the 500 hPa geopotential height difference  
(averages of 2003—2020 minus those of  
1961—2002) from 1 June to 31 August

指数( $I_{\text{EU}}$ )、东亚太平洋遥相关指数( $I_{\text{EAP}}$ )分别定义为:

$$I_{\text{EU}} = -0.25Z_{(45^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}, 15^{\circ}\text{W}\sim 10^{\circ}\text{E})} + 0.5Z_{(50^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{N}, 20^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{E})} - 0.25Z_{(55^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E})} \quad (1)$$

$$I_{\text{EAP}} = Z_{(20^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}, 95^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E})} - Z_{(40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}, 125^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E})} \quad (2)$$

式中  $Z^*$  表示经过标准化处理的 500 hPa 位势高度场。

与邹珊珊等(2013)通过欧亚地区夏季 500 hPa 位势高度距平场 REOF 分析修正的夏季欧亚遥相关型区域比较, 贝加尔湖中心位置一致, 其他两个中心点位置更偏西。这与计算过程有关, 本研究求取的是对高温站次高影响的环流关键区。东亚太平洋遥相关中心位置与施能等(1994)结果一致。计算逐年夏季及季内 7 个时段的  $I_{\text{EU}}$ 、 $I_{\text{EAP}}$ , 以及两者的相关系数, 均未通过显著性水平检验, 表明欧亚遥相关和东亚太平洋遥相关相互独立。因此, 欧亚遥相关主要反映中高纬大气环流的影响, 而东亚太平洋遥相关反映的是低纬对东亚的影响, 两者共同作用下影响东亚夏季气候。

为了更好地解释  $I_{\text{EU}}$ 、 $I_{\text{EAP}}$  与高温季内非一致变化之间的关系, 分别求取了 2002 年前后的  $I_{\text{EU}}$ 、 $I_{\text{EAP}}$  逐日序列。由图 11 可见,  $I_{\text{EU}}$ 、 $I_{\text{EAP}}$  在 2002 年突变前后呈反位相变化特征。 $I_{\text{EU}}$  阶段特征明显: 6 月, 2002 年前后由正位相转为正位相; 7—8 月, 由负位相转为正位相;  $I_{\text{EAP}}$  在 2002 年前主要以负位相为

主, 而 2002 年之后主要以正位相为主。图中还给出了高温站次年代际差值, 与  $I_{\text{diff}}$  不同, 采用  $I_{\text{EU}}$ 、 $I_{\text{EAP}}$  计算方法, 先将每日的逐年高温站次做标准化距平, 再用 2003—2020 年均值减去 1961—2002 年均值, 将差值做标准化距平, 得到高温站次年代际差值, 通过这种计算方法可消除季内变化差异。去除季内变化后, 其标准化距平呈现正、负位相交替变化特征, 不同位相发生时段与划分的 7 个时段基本一致。其与  $I_{\text{EU}}$ 、 $I_{\text{EAP}}$  年代际差值的相关系数分别为 0.44、0.65, 通过了 0.001 显著性水平检验。结合  $I_{\text{EU}}$ 、 $I_{\text{EAP}}$  正负位相匹配展开分析。在增长快速期,  $I_{\text{EU}}$  在 6 月 16 日至 7 月 6 日年代际减弱, 在其他 2 个时段年代际显著增强;  $I_{\text{EAP}}$  在 3 个时段均显著增强。增长平缓期,  $I_{\text{EU}}$  在 6 月 1—15 日年代际减弱, 在其他 3 个时段年代际增强, 但增强幅度较增长快速期弱;  $I_{\text{EAP}}$  在 8 月 21—31 日年代际增强, 在其他 3 个时段年代际减弱。综上所述, 高温年代际显著增多往往伴随着  $I_{\text{EU}}$ 、 $I_{\text{EAP}}$  的异常加强。进一步证实了欧亚遥相关和东亚太平洋遥相关是造成夏季高温季内非一致变化的主要原因。

对比相对变化率最大的 2 个时段(6 月 16 日至 7 月 6 日、8 月 12—20 日)环流异常, 进一步分析造成高温站次变化显著的年代际环流特征差异(图 12)。由于高度场在 20 世纪 70 年代中后期发生了年代际气候突变(曾红玲等, 2002), 所以采用 1980—2002 年和 2003—2020 年这 2 个时段差值进行分析。6 月 16 日至 7 月 6 日, 相较于 1980—2002 年, 2003—2020 年欧亚中高纬呈现“+ - + - +”分布, 即里海为高值区, 巴尔喀什湖以北为低值区, 贝加尔湖以北为高值区, 鄂霍次克海为低值区, 西北太平洋为高值区, 这与  $I_{\text{EU}}$  定义区域不同; 东亚沿岸呈北低南高, 与  $I_{\text{EAP}}$  类似, 但北区负距平位置更为偏北。这种环流形势表明, 西西伯利亚低槽发展, 贝加尔湖以北脊加强, 与副高间在长江以北上空构成气旋异常, 雨带北移, 而长江中下游为反气旋控制, 易于下沉气流, 造成气温偏高, 从而形成高温天气。8 月 12—20 日, 欧亚中高纬位势高度场呈现“+ - +”分布, 东亚沿岸呈现北低南高分布, 这与图 10 的分布一致, 加之长江中下游为偏南风异常, 盛行暖平流, 利于高温发展。上述对比分析可见, 夏季不同时间段的环流年代际变化共同之处在于东亚沿岸的北低



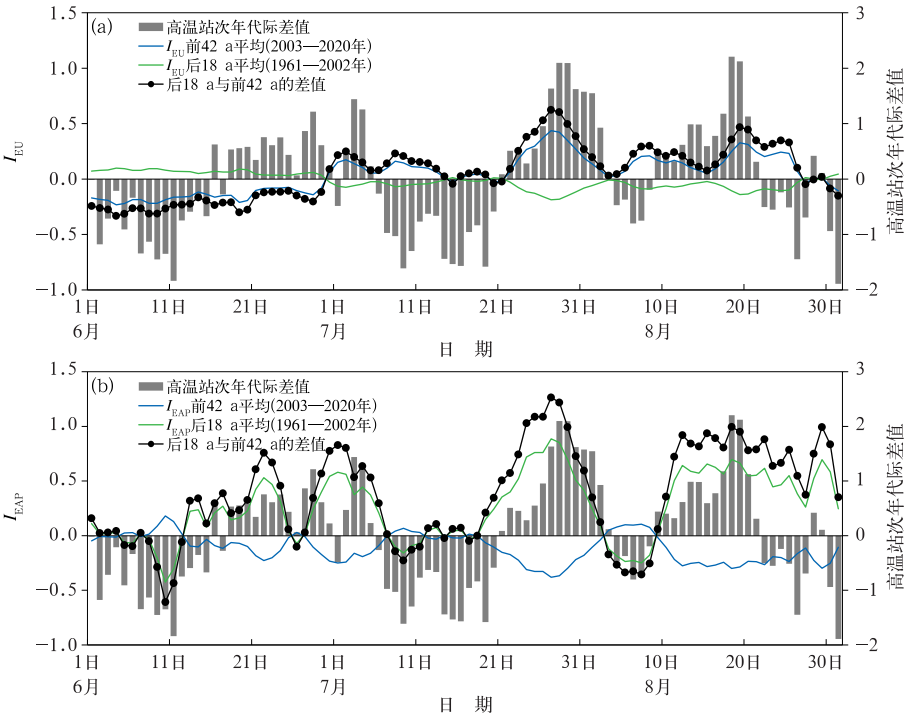
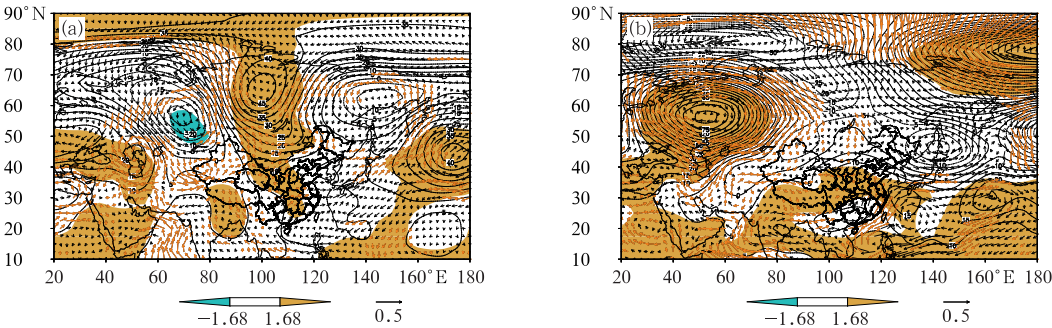


图 11 6 月 1 日至 8 月 31 日 (a)  $I_{EU}$  与高温站次年年代际差值, (b)  $I_{EAP}$  与高温站次年年代际差值

Fig. 11 The time series from 1 June to 31 August of (a)  $I_{EU}$  and the interdecadal difference of high temperature stations, (b)  $I_{EAP}$  and the interdecadal difference of high temperature stations



注:年代际变化为 2003—2020 年均值与 1980—2002 年均值的差值,填色:高度场通过 0.10 显著性水平检验,黄色风矢:风场通过 0.10 显著性水平检验。

图 12 (a)6 月 16 日至 7 月 6 日, (b)8 月 12—20 日 500 hPa 位势高度场 (等值线,单位: dagpm) 和 850 hPa 水平风场 (风矢,单位:  $m \cdot s^{-1}$ ) 的年代际变化分布  
Fig. 12 Interdecadal changes of 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm) and 850 hPa horizontal wind (wind vector, unit:  $m \cdot s^{-1}$ )  
(a) from 16 June to 6 July, (b) from 12 to 20 August

南高,长江中下游及东南沿海高度场增高,鄂霍次克海高度场降低;不同之处在于欧亚中高纬环流异常,

6 月 16 日至 7 月 6 日为三高两低,8 月 12—20 日为两高一低。

## 4 结论与讨论

基于1961—2020年长江流域的日最高气温资料,分析了长江流域在夏季不同时段的高温突变特征及其相应环流异常,结果发现:

(1)长江流域中东部高温站次具有较为明显的年代际转折,在2002年前后存在一个显著的突变。相对于 $35^{\circ}\text{C}$ 阈值, $37^{\circ}\text{C}$ 、 $40^{\circ}\text{C}$ 的高温站次增量更加明显。不同阈值年代际增长均与副高主体和长江中下游上空高度场有着密切关系。而极端高温(最高气温 $\geq 40^{\circ}\text{C}$ )站次还与勘察加半岛、西太平洋暖池上空高度场有关。

(2)在夏季季内不同时段,长江流域中东部高温站次具有非一致的年代际变化特征。可将其划分为两类:一是增长平缓期,表现为2002年前后相对变化率较夏季整个季节的相对变化率低,且突变检验未找到突变点;二是增长快速期,表现为2002年前后相对变化率较夏季整个季节的相对变化率高,且在2002年附近存在显著突变。

(3)欧亚和东亚太平洋遥相关及梅雨出梅时间是造成季内非一致性变化的主要原因。增长平缓期和快速期发生期间,欧亚和东亚太平洋遥相关年代际特征有着明显的差异。在增长快速期,高温年代际增多显著往往伴随着东亚遥相关的异常加强;其中相对变化率最大的两个时段在欧亚中高纬环流年代际变化有着明显差异。在增长平缓期,欧亚遥相关有小幅度的年代际增强,东亚太平洋遥相关年代际减弱;其中7月9—19日高温站次增长缓慢,还和2002年以后多数年份梅雨结束较晚有关。

综上所述,在全球变暖背景下,长江流域中东部高温增长趋势明显,但在季内各个时段之间存在一定差异,这种季内差异与环流的欧亚和东亚太平洋遥相关有关。欧亚和东亚太平洋遥相关年代际变化在研究中显示存在季内锁相特征——在一定时段显著增强。研究表明,在年代际变化背景上(林建等,1999),欧亚和东亚太平洋遥相关还具有次季节周期(刘慧斌等,2012;吴捷,2013),有着季内尺度的加强减弱。不同时间尺度间如何相互作用造成环流季内锁相特征还需进一步研究。另外,影响高温热浪的主要贡献还有海洋、青藏高原热力作用以及北极海

冰等(Cohen et al, 2014; 罗连升等, 2016; 袁媛等, 2018; 陈思奇等, 2020),这些下垫面作用可通过影响环流进而影响夏季极端气候。那么,这些下垫面异常是否会引发欧亚和东亚太平洋遥相关季内/年代际尺度变化,造成两者季内锁相,进而影响高温季内非一致变化? 因此,对于高温季内非一致年代际变化成因还需深入分析。

## 参考文献

- 陈思奇,徐峰,李雅洁,等,2020. 近70 a 北太平洋夏季 SST 及其与西太副高变化特征的相关[J]. 热带气象学报, 36(6): 846-854.
- Chen S Q, Xu F, Li Y J, et al, 2020. Summer SST in the north-west Pacific in the past 70 years and its correlation with the variation of the western Pacific subtropical high[J]. J Trop Meteor, 36(6): 846-854(in Chinese).
- 董广涛,陈葆德,陈伯民,等,2016. 边界强迫场订正的区气候模式对2013年夏季中国东部极端高温预测的改进试验[J]. 气象, 42(1): 97-106.
- Dong G T, Chen B D, Chen B M, et al, 2016. The improvement of predicting extreme heat event of eastern China in summer 2013 through correcting lateral boundary condition of regional climate model[J]. Meteor Mon, 42(1): 97-106(in Chinese).
- 郭春华,朱秀芳,孙劭,等,2023. 中国不同气候区的高温危险性分析[J]. 热带气象学报, 39(1): 66-77.
- Guo C H, Zhu X F, Sun S, et al, 2023. Analysis of high temperature hazard in different climate regions of China[J]. J Trop Meteor, 39(1): 66-77(in Chinese).
- 李俊,袁媛,王遵娅,等,2020. 2019年长江中下游伏秋连旱演变特征[J]. 气象, 46(12): 1641-1650.
- Li J, Yuan Y, Wang Z Y, et al, 2020. Evolution characteristics of continuous drought in late summer and autumn in the middle and lower reaches of Yangtze River Valley in 2019[J]. Meteor Mon, 46(12): 1641-1650(in Chinese).
- 梁梅,吴立广,2015. 中国东部地区夏季极端高温的特征分析[J]. 气象科学, 35(6): 701-709.
- Liang M, Wu L G, 2015. Analysis on features of summer extreme high temperature in eastern China[J]. J Meteor Sci, 35(6): 701-709(in Chinese).
- 林爱兰,谷德军,彭冬冬,等,2021. 近60年我国东部区域性持续高温过程变化特征[J]. 应用气象学报, 32(3): 302-314.
- Lin A L, Gu D J, Peng D D, et al, 2021. Climatic characteristics of regional persistent heat event in the eastern China during recent 60 years[J]. J Appl Meteor Sci, 32(3): 302-314(in Chinese).
- 林建,何金海,张依英,1999. 夏季东亚大气遥相关型变化特征及其与长江中下游旱涝的关系[J]. 南京气象学院学报, 22(3): 312-320.
- Lin J, He J H, Zhang Y Y, 1999. Relationship of summer EAP to the rainfall in the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. J Nanjing Inst Meteor, 22(3): 312-320(in Chinese).

- 刘慧斌,温敏,何金海,等,2012.东北冷涡活动的季节内振荡特征及其影响[J]. 大气科学,36(5):959-973. Liu H B, Wen M, He J H, et al, 2012. Characteristics of the northeast cold vortex at intraseasonal time scale and its impact[J]. Chin J Atmos Sci, 36(5):959-973(in Chinese).
- 罗连升,段春峰,毕云,等,2016.春季青藏高原大气热源与长江中下游盛夏高温的关系[J]. 气象科学,36(5):614-621. Luo L S, Du'an C F, Bi Y, et al, 2016. Relation between atmospheric heat source in spring over the Tibetan Plateau and mid-summer high temperature events in middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. J Meteor Sci, 36(5):614-621(in Chinese).
- 聂羽,韩振宇,韩荣青,等,2018.中国夏季热浪持续天数的年际变化及环流异常分析[J]. 气象,44(2):294-303. Nie Y, Han Z Y, Han R Q, et al, 2018. Interannual variation of heat wave frequency persistence over China and the associated atmospheric circulation anomaly[J]. Meteor Mon, 44(2):294-303(in Chinese).
- 彭京备,刘舸,孙淑清,2016.2013年我国南方持续性高温天气及副热带高压异常维持的成因分析[J]. 大气科学,40(5):897-906. Peng J B, Liu G, Sun S Q, 2016. An analysis on the formation of the heat wave in southern China and its relation to the anomalous western Pacific subtropical high in the summer of 2013[J]. Chin J Atmos Sci, 40(5):897-906(in Chinese).
- 全国防灾减灾标准化委员会,2014.区域性高温天气过程等级划分:QX/T 228—2014[S]. 北京:气象出版社. National Technical Committee 345 on Meteorologic Disaster Prevention and Mitigation of Standardization Administration of China, 2014. Classification of regional high temperature weather process: QX/T 228—2014[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 沈皓俊,游庆龙,王朋岭,等,2018.1961—2014年中国高温热浪变化特征分析[J]. 气象科学,38(1):28-36. Shen H J, You Q L, Wang P L, et al, 2018. Analysis on heat waves variation features in China during 1961—2014[J]. J Meteor Sci, 38(1):28-36(in Chinese).
- 史军,崔林丽,梁萍,等,2013.长江三角洲极端高温与西太平洋副热带高压的关系[J]. 地理科学,33(11):1383-1389. Shi J, Cui L L, Liang P, et al, 2013. Relationship between extreme high temperature in the Changjiang River Delta and the western Pacific subtropical high[J]. Sci Geogr Sin, 33(11):1383-1389(in Chinese).
- 施能,朱乾根,古文保,等,1994.夏季北半球500 hPa月平均场遥相关型及其与我国季风降水异常的关系[J]. 南京气象学院学报,17(1):1-10. Shi N, Zhu Q G, Gu W B, et al, 1994. Northern summer 500 hPa monthly mean field teleconnection patterns and its relation to monsoon rainfall anomaly in China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 17(1):1-10(in Chinese).
- 孙博,王会军,黄艳艳,等,2023.2022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,46(1):1-8. Sun B, Wang H J, Huang Y Y, et al, 2023. Characteristics and causes of the hot-dry climate anomalies in China during summer of 2022[J]. Trans Atmos Sci, 46(1):1-8(in Chinese).
- 唐恬,金荣花,彭相瑜,等,2014.2013年夏季我国南方区域性高温天气的极端性分析[J]. 气象,40(10):1207-1215. Tang T, Jin R H, Peng X Y, et al, 2014. Analysis on extremely high temperature over southern China in summer 2013[J]. Meteor Mon, 40(10):1207-1215(in Chinese).
- 王国复,叶殿秀,张颖娴,等,2018.2017年我国区域性高温过程特征及异常大气环流成因分析[J]. 气候变化研究进展,14(4):341-349. Wang G F, Ye D X, Zhang Y X, et al, 2018. Characteristics and abnormal atmospheric circulation of regional high temperature process in 2017 over China[J]. Climate Change Res, 14(4):341-349(in Chinese).
- 王荣,王遵娅,高荣,等,2023.1961—2020年中国区域性高温过程的气候特征及变化趋势[J]. 地球物理学报,66(2):494-504. Wang R, Wang Z Y, Gao R, et al, 2023. Climatology and changing trend of the regional high temperature process in China during 1961—2020[J]. Chin J Geophys, 66(2):494-504(in Chinese).
- 王喜元,闫业超,岳书平,等,2016.1961—2010年长江流域高温热浪时空变化特征[J]. 云南大学学报(自然科学版),38(4):602-609. Wang X Y, Yan Y C, Yue S P, et al, 2016. On spatiotemporal variations of heat waves in the Yangtze River Basin from 1961 to 2010[J]. J Yunnan Univ, 38(4):602-609(in Chinese).
- 吴捷,2013.东亚太平洋遥相关型季节内演变和维持机理研究[D]. 南京:南京信息工程大学:19-22. Wu J, 2013. Research of intraseasonal evolution of East Asian Pacific teleconnection and maintaining mechanism[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology:19-22(in Chinese).
- 杨辉,李崇银,2005.2003年夏季中国江南异常高温的分析研究[J]. 气候与环境研究,10(1):80-85. Yang H, Li C Y, 2005. Diagnostic study of serious high temperature over South China in 2003 summer[J]. Climatic Environ Res, 10(1):80-85(in Chinese).
- 杨涵涌,马悦,史军,2018.全球变暖背景下长江三角洲夏季高温时空演变研究[J]. 长江流域资源与环境,27(7):1544-1553. Yang H W, Ma Y, Shi J, 2018. Spatial and temporal characteristics of summertime high temperature in Yangtze River Delta under the background of global warming[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 27(7):1544-1553(in Chinese).
- 袁媛,丁婷,高辉,等,2018.我国南方盛夏气温主模态特征及其与海温异常的联系[J]. 大气科学,42(6):1245-1262. Yuan Y, Ding T, Gao H, et al, 2018. Major modes of midsummer air temperature in southern China and their relationship with sea surface temperature anomalies[J]. Chin J Atmos Sci, 42(6):1245-1262(in Chinese).
- 曾红玲,高新全,戴新刚,2002.近20年全球冬、夏季海平面气压场和500 hPa高度场年代际变化特征分析[J]. 高原气象,21(1):66-73. Zeng H L, Gao X Q, Dai X G, 2002. Analyses on interdecadal change characteristics of global winter and summer sea surface pressure field and 500 hPa height field in recent twenty years

- [J]. Plateau Meteor, 21(1):66-73(in Chinese).
- 张尚印,张海东,徐祥德,等,2005. 我国东部三市夏季高温气候特征及原因分析[J]. 高原气象, 24(5):829-835. Zhang S Y, Zhang H D, Xu X D, et al, 2005. Climatic character and cause analysis of summer high temperature in main cities of East China [J]. Plateau Meteor, 24(5):829-835(in Chinese).
- 邹珊珊,郭品文,杨慧娟,2013. 东亚太平洋与欧亚遥相关型的相互配置及其气候影响[J]. 气象科学, 33(1):10-18. Zou S S, Guo P W, Yang H J, 2013. The configuration between the East Asia Pacific and the Eurasian teleconnection patterns and its influence on the summer climate of China[J]. J Meteor Sci, 33(1):10-18 (in Chinese).
- Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al, 2014. Recent arctic amplification and extreme mid-latitude weather[J]. Nat Geosci, 7(9):627-637.
- Huang G, 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon-The EAP index[J]. Adv Atmos Sci, 21(1):41-52.
- IPCC, 2021. Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; Cambridge University Press:3949.
- Karl T R, Trenberth K E, 2003. Modern global climate change[J]. Science, 302(5651):1719-1723.
- Perkins S E, Alexander L V, Nairn J R, 2012. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells[J]. Geophys Res Lett, 39(20):L20714.
- Wallace J M, Gutzler D S, 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter[J]. Mon Wea Rev, 109(4):784-812.

(本文责编:王蕾 何晓欢)