

肖安, 周长艳, 2017. 基于超热因子的中国热浪事件气候特征分析[J]. 气象, 43(8): 943-952.

# 基于超热因子的中国热浪事件气候特征分析\*

肖 安<sup>1,2</sup> 周长艳<sup>3</sup>

1 江西省气象台, 南昌 330096

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072

**提 要:** 采用世界气象组织气候委员会推荐基于超热因子(excess heat factor, EHF)的热浪指标并加以拓展, 对中国 1958—2013 年的热浪事件气候变化进行分析。结果表明: 华中、华东和西北地区的平均热浪次数要略多于中国其他地区; 华东和华中地区的热浪最长持续天数和热浪总天数最多; 热浪 EHF 最大值、年均 EHF 值和 EHF 中位数有北高南低的分布特征; 华东、华中地区的轻度、中度热浪天数较多, 重度热浪天数较少, 中国北部和西部则相反; 中国热浪 EHF 年总量有增加的趋势、准 3 年的年际变化周期和明显的年代际突变; 中国大部分地区的高温热浪有增加趋势, 但在华中、华北、东北的部分地区变化不显著。以云南德钦站为例说明中国西部高原地区不仅存在高温热浪事件, 而且在进入 21 世纪后日益严重。

**关键词:** 超热因子(EHF), 高温, 热浪指数, 高原热浪

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.005

## Characteristic Analysis of the Heat Wave Events over China Based on Excess Heat Factor

XIAO An<sup>1,2</sup> ZHOU Changyan<sup>3</sup>

1 Jiangxi Provincial Meteorological Observatory, Nanchang 330096

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072

**Abstract:** Characteristic analysis of the heat wave events over China from 1958 to 2013 based on excess heat factor (EHF) was analyzed, and some heat wave indices and aspects were recommended by the Commission for Climatology (CCI) Expert Team on Climate Risk and Sector-Specific Climate Indices (ET-CRSCI) of the World Meteorological Organization (WMO) World Climate Programme and the other indices were derived in this paper. The results show that, from 1958 to 2013, the heat wave numbers in central, eastern and northwestern China were more than that in other areas. The heat wave duration and heat wave frequency were most in eastern and central China. The heat wave amplitude was higher in northern China and lower in southern China. The resemble feature could be found in the heat wave mean and the heat wave median, as well. The heat wave days and the heat wave severe days were most in eastern and central China, the heat wave extreme days were most in northern and western China. The indices of the heat waves in most areas of China showed an increasing trend for the period 1958—2013. The heat wave annual value showed a significant increasing trend and it has interannual variation mainly in quasi-three-year oscillation. The main mutation was found in 1994 by using 10 years' moving average. The heat wave events at Deqin Station of Yunnan Province were analyzed as an example in order to explain the heat wave events in

\* 江西省科技支撑重大项目(20152ACG70002)资助

2016 年 2 月 29 日收稿; 2017 年 5 月 23 日收修定稿

第一作者: 肖安, 主要从事中短期天气预报和气候变化研究. Email: mrxiaoan@sohu.com

western plateau area of China, and the increasing trend in the 21st century.

**Key words:** excess heat factor (EHF), high temperature, heat wave indices, plateau heat wave

## 引 言

联合国政府间气候变化委员会(IPCC)第五次评估报告指出:从1880—2012年全球平均气温已升高了 $0.85^{\circ}\text{C}$ ;而在过去的30年里,每10年地表温度的增温幅度高于1850年以来的任何时期(IPCC, 2013;沈永平和王国亚,2013)。中国《第二次气候变化国家评估报告》也显示:从1880年以来,中国陆地表面平均温度上升 $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ ,与全球平均气温上升程度相当(《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会,2011)。在这种全球变暖的背景下,高温尤其是热浪天气,对人类生存、社会经济发展、水资源和生态环境造成严重威胁,是一种严重的气象灾害。在欧洲、北美和澳洲等地区的许多国家,高温热浪已成为致人死亡最多的自然灾害之一,多个国家和地区由于热浪事件造成巨大的人员财产损失(Semenza et al, 1996; Poumadère et al, 2006; 徐金芳等, 2009; 谈建国, 2009; Rall et al, 2011)。

虽然高温热浪天气有很大的危害,但国际上对热浪却还没有统一的强制标准,因此仍有不少学者采取不同的方法对高温热浪天气开展研究。当前常用的热浪研究方法归纳起来主要可以分为指标法、时间序列方法和天气气候分型(孙国武等,2007)三类,其中指标法是使用较多的热浪研究方法(谈建国和黄家鑫,2004)。叶殿秀等(2013)根据夏季最高气温和死亡率设计热浪指数对1961—2010年中国热浪的频次、日数和强度的时空分布进行了分析;黄卓等(2011)从人体感觉高温炎热的角度出发综合表征炎热程度和过程累计效应的热浪指数作为热浪的判别标准;张书余等(2015)利用小白鼠实验的方法探讨了热浪对冠心病影响的方法。这些高温热浪指标较多考虑环境最高气温对人类死亡率比例的贡献和人体自身对高温天气的感觉,较适合应用在短期热浪预警和公众气象服务中。通过这些因子推导出来的热浪指标在一定程度上比较适合城市大,人口密集的中国东部地区(谈建国等,2008;虞海燕等,2011;陆琛莉等,2012;谢志清等,2015;李双双等,2015),但位于中国北部、西部地区的城市规模小,人口相对分散,夏季最高气温往往达不到能明显提高

死亡率或使人体感到高温炎热的标准,这些地方是否就不存在热浪呢?为了回答这个问题,中国气象局规定日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 为高温日,连续3 d以上的高温天气称为高温热浪;同时还规定,各省(区、市)可以根据本地天气气候特征规定界限温度值。例如甘肃省气象局规定,河西地区日最高气温 $\geq 34^{\circ}\text{C}$ ,河东地区日最高气温 $\geq 32^{\circ}\text{C}$ 即定为一个高温日(张书余,2008)。中国地域辽阔,各地高温差异较大,如果为了研究热浪分布特征去搜集所有地区的高温阈值标准既不现实也不科学。因热浪定义标准不同导致无法进行对比分析的例子也较多,例如四川地形差异很大,周长艳等(2013)利用日最高气温 $35^{\circ}\text{C}$ 作为四川中东部地区高温日的阈值,对四川中东部地区的高温事件进行了研究,但川西北高原山区海拔较高,日最高气温很少能达到 $35^{\circ}\text{C}$ ,就没有进行对比研究。因此,如果能寻找到一个在不同地区适用的高温热浪指数标准,就能大幅度减少中国热浪研究的工作量。例如Ding and Qian(2011)利用中国1960—2008年的日最高气温、最低气温和平均相对湿度3个气象要素定义热浪事件;向甸等(2008)将连续5 d最高气温高于气候态相同日期(1961—1990年) $5^{\circ}\text{C}$ 的总天数定义为热浪指数。以上工作都通过简单的气象要素设计热浪指标对中国热浪事件进行了分析,得到了很有价值的结论。

本文采用超热因子(excess heat factor, EHF)作为热浪指数标准进行分析。该因子由Perkins et al (2012)设计,并从该因子推导出多个热浪指数描述热浪天气特征。世界气象组织(World Meteorological Organization)气候委员会(Commission for Climatology)下属的气候和特定风险指数专家组(Expert Team on Climate Risk and Sector-Specific Climate Indices, ET-CRSCI)定义了34种核心指标(core indices)和9种附加(非核心)指标[additional (non-core) indices](WMO, 2012; Alexander et al, 2015)。在这9种附加指标中,5个有关热浪的指数均基于EHF计算。Nairn and Fawcett(2014)利用这些指数对澳大利亚1958—2011年的热浪分布情况进行了分析,Elizbarashvili(2015)在这5个指数的基础上,新增了3个新指数,对格鲁吉亚(Georgia)1961—2010年夏季(5—9月)的热浪情况进行

了较全面的分析。由于这 5 个热浪指数均为非核心的附加指数,不属于强制指标,国内也尚未有利用 EHF 来描述高温热浪天气的研究和使用报告,因此本文采用以上 8 种热浪指标对国内热浪情况开展分析。另外,少数极热高温热浪天气可能会导致 EHF 出现异常偏高,对均值分析造成一定的影响,本文再增加一个新的中位数指标作为参考;为了得到中国年 EHF 值,新增 EHF 年值以对中国区域整体热浪情况进行分析。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据来源

本文站点实况数据来源于“中国气象科学数据共享服务网”的中国地面 194 个国际交换站气候资料日值数据集(V3.0)。该资料主要基于地面基础气象资料建设项目归档的“1951—2010 年中国国家级地面站数据更正后的月报数据文件(A0/A1/A)基础资料集”研制而成,数据经过质量控制后,数据的正确率均接近 100%(王国复等,2004)。考虑到站点数据的时间序列长度和完整性,从数据集中选取 184 个站作为研究对象,研究时间段为 1958—2013 年。全球平均气温距平资料采用同期英国气象局哈德来中心(Hadley Center)和气候研究室(Climatic Research Unit)发布的 HadCRUT4 资料(Brohan et al, 2006; Morice et al, 2012),该资料包含了自 1850 年至今的全球陆地(CRUTEM4)和海洋(LadSST3)月平均气温距平,也被 IPCC 第五次评估报告所采用。

### 1.2 EHF 指数的计算

EHF 指数主要由两部分组成。第一部分体现一个站点最近 3 d 平均气温是否超过该地长期气候极端高温( $EHI_{sig}$ );第二部分体现当地最近 3 d 平均气温是否超过该地最近 3~32 d 的平均气温( $EHI_{accl}$ )。其计算公式如下:

$$EHI_{sig} = \frac{T_i + T_{i-1} + T_{i-2}}{3} - T_{95} \quad (1)$$

$$EHI_{accl} = \frac{T_i + T_{i-1} + T_{i-2}}{3} - \frac{T_{i-3} + \dots + T_{i-32}}{30} \quad (2)$$

$$EHF = EHI_{sig} \times \max(1, EHI_{accl}) \quad (3)$$

式中, $T$ 表示平均气温,是日最高气温和最低气温的平均值; $\frac{T_i + T_{i-1} + T_{i-2}}{3}$ 表示 3 d 平均气温; $T_{95}$ 表示某站 30 年(本文采用 1981—2010 年)逐日平均气温升序排列后第 95%分位值,代表本站极端高温阈值; $\frac{T_{i-3} + \dots + T_{i-32}}{30}$ 表示 3~32 d 的平均气温;下标  $i$  为日期序列,以 1958 年 1 月 1 日为日期序列第一天,2013 年 12 月 31 日为日期序列最后一天。

在本文中,定义当  $EHF > 0$  即为一个高温天气事件;至少连续 3 d  $EHF > 0$  时为一个热浪天气事件。因此本文中所考察的 EHF 如无特殊说明均为非负数,式(3)可改写为:

$$EHF = \max(0, EHI_{sig}) \times \max(1, EHI_{accl}) \quad (4)$$

为了能正确计算 1958 年 1 月的 EHF 值,需要 1957 年 11 月 30 日至 12 月 31 日的平均气温参与计算。EHF 指数通过计算平均气温而不是日最高气温,间接地涵盖了相对湿度对热浪天气的影响(Elizbarashvili, 2015)。

### 1.3 高温、热浪指标的定义

本文所讨论的 10 个高温、热浪指数指标定义如表 1 所示。HWN、HWD、HWF、HWA 和 HWM 是 ET-CRSCI 推荐的热浪指数,主要反映了热浪事件的严重程度。 $HW_{day}$ 、 $HW_{sev}$ 、 $HW_{ex}$  是 Elizbarashvili 在其文献(Elizbarashvili, 2015)中新增的高温指数,主要反映了高温事件的严重程度。其中, $EHF_{85}$  是 1958—2013 年当地所有大于 0 的 EHF 升序排列后第 85%分位值,称为中度高温阈值。 $0 < EHF < EHF_{85}$  时,为轻度高温天气; $EHF_{85} \leq EHF < 2EHF_{85}$  时,为中度高温天气; $EHF \geq 2EHF_{85}$  时,为重度高温天气。根据 1.2 节的定义,轻度高温天气、中度高温天气和重度高温天气统称为高温天气,其相对应的天数即为轻度高温天数( $HW_{day}$ )、中度高温天数( $HW_{sev}$ )和重度高温天数( $HW_{ex}$ )。

在下文的计算过程中发现,有部分站点在短时间内会出现 EHF 异常偏大的情况,这些异常偏大的值会较显著地影响 HWM 值的大小。所以本文新定义  $HW_{me}$  指数,取所有热浪事件的 EHF 升序序列中中位数值作为  $HW_{me}$ ,可较有效地避免 EHF 异常偏大值的不利影响,详情见 2.1 节。长期以来热浪指数均针对单个站点的气象条件而定,对区域热浪进行定量分析的研究较少,本文将一年中所有站点

的热浪事件的 EHF 进行累加,得到中国区域热浪 EHF 年总量( $HW_a$ )。经过与全球平均气温距平的对比和自身指数的分析,发现该指数与全球平均气

温距平相关性较好,且有自己的年际、年代际变化特征,有一定的统计学意义,详情见 2.3 节。

表 1 基于 EHF 因子的热浪指数指标定义

Table 1 Heat wave aspects analyzed based on the excess heat factor (EHF) with index names, definitions, and units

指标	简称	定义	单位
HWN	热浪次数	平均热浪次数	次·a <sup>-1</sup>
HWD	热浪最长持续天数	热浪事件中 EHF>0 的最长连续天数	d
HWF	热浪年平均天数	热浪事件中 EHF>0 的年平均天数	d
HWA	热浪 EHF 最大值	热浪事件中 EHF 最大值	℃ <sup>2</sup>
HWM	热浪年均 EHF 值	热浪事件中 EHF 的平均值	℃ <sup>2</sup>
HW <sub>day</sub>	轻度高温天数	EHF>0 的天数	d
HW <sub>sev</sub>	中度高温天数	EHF 值≥第 85% EHF 值(EHF <sub>85</sub> )的天数	d
HW <sub>ex</sub>	重度高温天数	EHF 值≥2 倍第 85% EHF 值(EHF <sub>85</sub> )的天数	d
HW <sub>me</sub>	热浪中位数 EHF 值	所有热浪事件中 EHF 的中位数值	℃ <sup>2</sup>
HW <sub>a</sub>	热浪 EHF 年总量	全部站点的热浪事件 EHF 之和	℃ <sup>2</sup>

## 2 中国高温热浪天气分布特征

### 2.1 中国热浪天气分布特征

图 1a 是 1958—2013 年中国热浪平均次数(heat wave number, HWN)的空间分布。从图中可以看到, HWN 最多有 2.6~3.0 次·a<sup>-1</sup>, 主要分布在华中和西北地区; 最少仅有 1.16~1.69 次·a<sup>-1</sup>, 主要分布在西南南部、华南、东南和华北中部地区; 全国其他地区普遍都在 1.9~2.6 次·a<sup>-1</sup>。图 1a 的 HWN 分布特征与叶殿秀等(2013)中给出的热浪年平均次数的空间分布有较大差异。前者热浪数量较多的区域主要集中在华中和西北地区, 而后者则集中在中国华东地区。这主要是因为本文定义连续 3 d 高温天气以上为一个热浪事件, 而叶殿秀等(2013)定义连续 6 d 高温天气以上为一个热浪事件。从中国热浪最长持续天数(heat wave duration, HWD, 图 1b)年平均空间分布中可以看到, 中国西北和北部地区的热浪最长持续天数大多在 6 d 以下, 中国东部地区的热浪持续天数相对较长, 叶殿秀等(2013)将北部、西部等地区持续时间较短的热浪过滤掉, 只留下持续时间较长的热浪; 而本文的方法则保留了中国北部、西部的热浪特征。

同期中国热浪年平均天数(heat wave frequency, HWF, 图 1c)分布特征与 HWD 类似, 年平均天数最少的区域分布在中国西南南部、华南、西北和华北的部分区域, 其中云南、贵州和广西、广东大部地

区的年平均天数范围在 6.39~8.49 d·a<sup>-1</sup>, 是全国热浪年平均天数最少的区域; 年平均天数最多的区域集中在华东、华东地区, 年平均天数为 12.5~17.64 d·a<sup>-1</sup>。

热浪 EHF 最大值(heat wave amplitude, HWA, 图 2a)、热浪年均 EHF 值(heat wave mean, HWM, 图 2b)的空间分布具有较明显的北高南低特征。中国北部的 HWA 普遍较高, 西北、东北和华北部分站点的 HWA 指数范围在 60~129℃<sup>2</sup>, 主要集中在内蒙古东部、东北北部和西北北部地区, 最大值为 129℃<sup>2</sup>(新疆富蕴, 46.983°N, 89.517°E); 中国南部的 HWA 普遍偏低, 华南、西南和长江中下游地区的 HWA 指数范围在 6.8~14.99℃<sup>2</sup>; 北部极值为南部极值的 19 倍。新疆富蕴 129℃<sup>2</sup> 的 EHF 最大值数据是否可靠呢? 图 2d 是新疆富蕴站 1995 年 6 月 24 日至 7 月 14 日的平均气温(DMT)、 $T_{95}$ 、 $EHI_{sig}$ 、 $EHI_{accl}$  和 EHF[为了显示 EHF 与  $EHI_{sig}$ 、 $EHI_{accl}$  的变化关系, 此处 EHF 通过式(3)计算而得]的逐日时间序列。从图中可以看到, 富蕴的  $T_{95}$  为 24.45℃, 从 6 月 30 日至 7 月 9 日连续 10 d DMT 超过  $T_{95}$ , 其中 7 月 4 日的 DMT 为 35.05℃(最高气温 40.1℃, 最低气温 34.7℃), 比  $T_{95}$  高 10.6℃。该日平均气温在中国东部部分地区来说可能不是最高的, 但对于新疆富蕴地区来说, 其偏离  $T_{95}$  的幅度是较为罕见的。

从图 2d 还能看到, 富蕴地区 EHF 极大值为 129℃<sup>2</sup>, 而均值高于 8℃<sup>2</sup>, 因此少数几个 EHF 异常大值对均值产生较大影响。为了减少热浪过程中异

常偏大的 EHF 值对 HWM 的影响,本文设计了热浪中位数 EHF 值(heat wave median,  $HW_{me}$ )。图 2c 是  $HW_{me}$  的空间分布,与图 2b 相比, $HW_{me}$  北大南小的趋势没有变化,保留了 HWM 绝大部分分布

特征,但  $HW_{me}$  的值较 HWM 普遍要小。新疆富蕴站的  $HW_{me}$  比 HWM 下降了  $4.41^{\circ}C^2$ ,仅有  $3.87^{\circ}C^2$ ,下降幅度达 53.3%,有效减少了 1995 年 7 月初的异常热浪事件的不利影响。因此如果站点存在极端

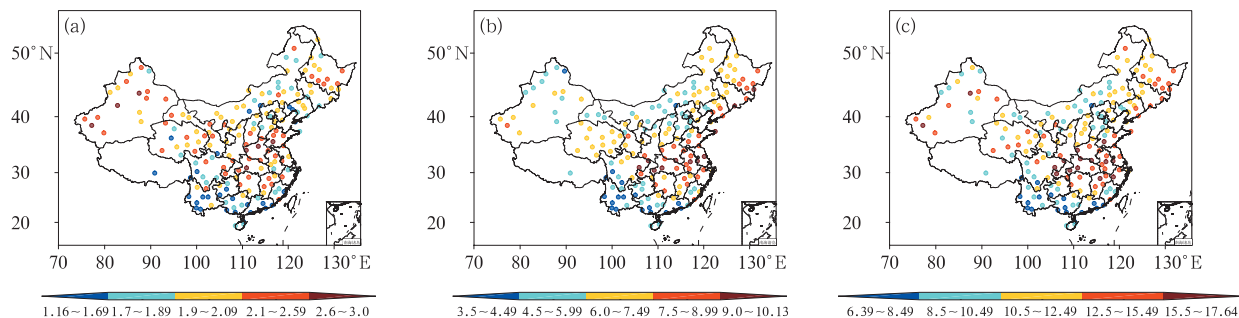


图 1 1958—2013 年中国热浪指标空间分布

(a) HWN(单位:  $n \cdot a^{-1}$ ), (b) HWD(单位: d), (c) HWF(单位:  $d \cdot a^{-1}$ )

Fig. 1 Spatial distribution of (a) the heat wave number (HWN, unit:  $n \cdot a^{-1}$ ), (b) heat wave duration (HWD, unit: d), (c) heat wave frequency (HWF, unit:  $d \cdot a^{-1}$ ) in China for the period 1958—2013

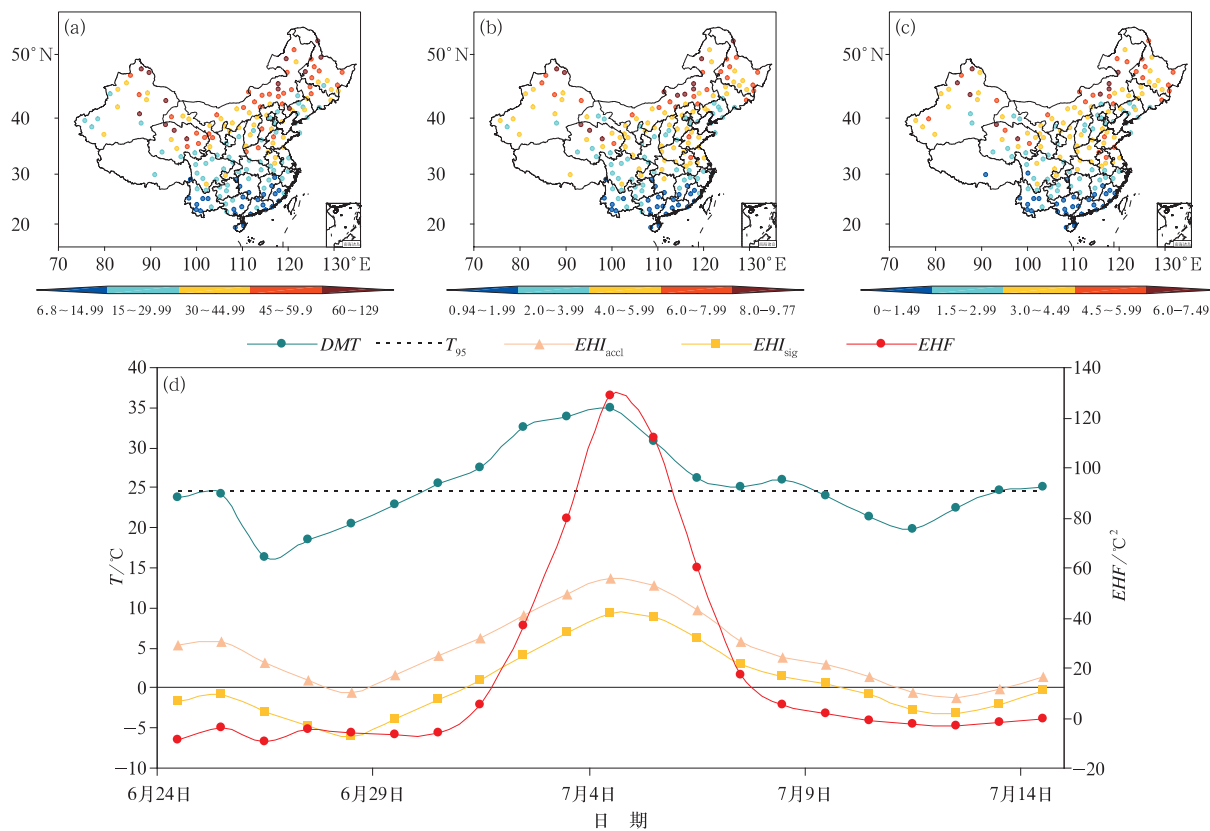


图 2 同图 1,但为 HWA(a,单位:  $^{\circ}C^2$ ), HWM(b,单位:  $^{\circ}C^2$ )和  $HW_{me}$ (c,单位:  $^{\circ}C^2$ ); (d) 1995 年 6 月 24 日至 7 月 14 日新疆富蕴站的 DMT,  $T_{95}$ ,  $EHI_{acc}$ ,  $EHI_{sig}$  与 EHF

Fig. 2 Spatial distribution of (a) heat wave amplitude (HWA, unit:  $^{\circ}C^2$ ), (b) heat wave mean magnitude (HWM, unit:  $^{\circ}C^2$ ), (c) heat wave median magnitude ( $HW_{me}$ , unit:  $^{\circ}C^2$ ), (d) the DMT,  $T_{95}$ ,  $EHI_{acc}$ ,  $EHI_{sig}$ , EHF at Fuyun Station of Xinjiang in China for the period 27 June—14 July 2013

异常热浪事件时,  $HW_{me}$  能更准确反映中等程度热浪事件的 EHF 值。

## 2.2 中国高温天气分布特征

图 3a、3b、3c 分别为轻度高温天数(heat wave days,  $HW_{day}$ )、中度高温天数(heat wave severe days,  $HW_{sev}$ )和重度高温天数(heat wave extreme days,  $HW_{ex}$ )的空间分布。从图中可以看到, 中国华中、华东地区的  $HW_{day}$  主要集中在  $15.2 \sim 19.21 d \cdot a^{-1}$ , 是全国轻度高温天数最多的地区; 中国东北、华北、西南、华南地区的  $HW_{day}$  较少, 最小值只有  $8.2 d \cdot a^{-1}$ 。  $HW_{sev}$  与  $HW_{day}$  分布特征类似, 大致呈现一个南北少、中间多的分布特征, 最大值有  $2.89 d \cdot a^{-1}$ , 最小值有  $1.16 d \cdot a^{-1}$ 。  $HW_{ex}$  的分布特征与  $HW_{day}$ 、 $HW_{sev}$  有较大区别: 中国东北、华北、西北和西南部分站点的  $HW_{ex}$  最大值有  $0.75 d \cdot a^{-1}$ , 华中、华东和华南地区的  $HW_{ex}$  值则仅有  $0.04 \sim 0.24 d \cdot a^{-1}$ 。因此, 中国中东部地区的高温类型主要是轻度高温和中度高温, 重度高温相对较少; 中国的西南、西北、华北和东北地区的高温类型多为重度高温, 轻度高温和中度高温相对较少。

## 2.3 中国热浪年总量分布特征

长期以来热浪指数均针对单个站点而定, 对一个区域的热浪演变情况进行定量分析的研究较少。从  $HWM$  和  $HW_{me}$  的空间分布图(图 2b 和 2c)中可以看到, 两者相差并不太大, 反映极端热浪事件相对普通热浪事件仍然是少数, 因此热浪事件越多, EHF 之和可能会越大。因此本文将每年所有站点热浪事件的 EHF 值相加, 得到中国热浪事件 EHF 的年总量(heat wave annual value,  $HW_a$ )。当年度热浪事件较多时,  $HW_a$  值也较大; 当年度热浪事件

较少时,  $HW_a$  值也较小。那么  $HW_a$  值是否具有统计学意义呢? 从中国  $HW_a$  时间序列图(图 4a)可以看到, 在 1958—2013 年,  $HW_a$  值有逐渐增大的趋势, 与同期全球平均气温距平的相关系数为 0.625, 通过 0.001 显著性水平检验, 因此  $HW_a$  具有与全球变暖背景大致相同的增加趋势。图 4a 还显示, 在 20 世纪 90 年代中期之前,  $HW_a$  指数没有明显增加, 甚至在 1993 年出现最小值  $1548.7^\circ C^2$ ; 90 年代中期之后,  $HW_a$  指数表现出较明显的增加趋势; 最大值出现在 2010 年,  $HW_a$  为  $28409.5^\circ C^2$ , 是 1993 年的 18.3 倍。  $HW_a$  也具有明显的年代际特征。将标准化后的  $HW_a$  进行 10 a 滑动平均, 得到  $HW_a$  的年代际变化时间序列(图 4d), 可以清楚地发现在 1994 年之前,  $HW_a$  全部为负值; 从 1995 年开始,  $HW_a$  开始转为正值。将  $HW_a$  指数进行 M-K 检验(图略), 得到发生突变的时间为 1996 年, 与 10 年滑动平均结论相近。对  $HW_a$  时间序列进行功率谱分析, 发现  $HW_a$  存在 2.7 a 的准 3 a 年际周期(图 4b), 与图 4c 显示的  $HW_a$  年际变化时间序列相一致。通过以上分析证明,  $HW_a$  具有一定的统计学意义, 可以代表一个区域的热浪程度。

## 2.4 热浪指数变化趋势

利用回归方程计算各站热浪指数随时间的变化趋势, 图 5 为各指数变化趋势的空间分布。其中,  $HW_N$ (图 5a)和  $HW_F$ (图 5c)分布特征相似: 全国大部分地区的  $HW_N$  和  $HW_F$  都有逐渐增加的趋势, 藏、川、滇交界地区增加趋势最为明显,  $HW_N$ 、 $HW_F$  增加幅度分别达到了  $0.9 \text{次} \cdot (10 \text{a})^{-1}$  和  $6 d \cdot (10 \text{a})^{-1}$ ; 因此在全球变暖的气候背景下, 中国西部和北部的高海拔、高纬度寒冷地区的热浪增加趋势比中国东部的低海拔、低纬度温暖地区更明显, 这

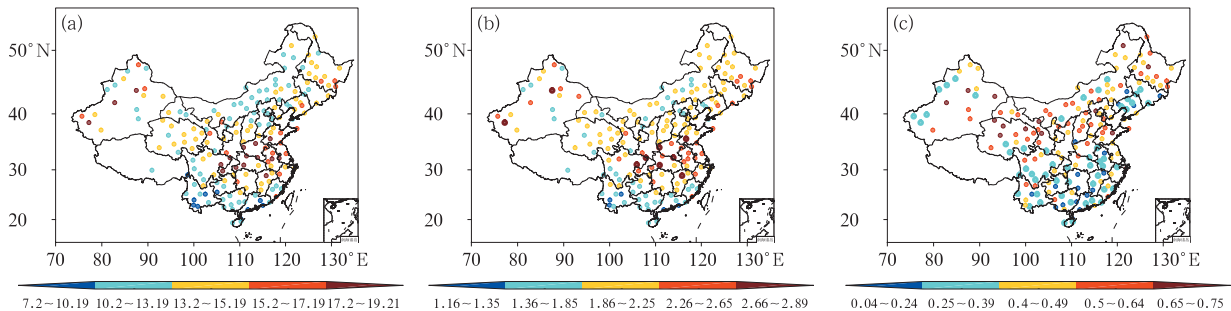


图 3 同图 1, 但为  $HW_{day}$  (a, 单位:  $d \cdot a^{-1}$ ),  $HW_{sev}$  (b, 单位:  $d \cdot a^{-1}$ ) 和  $HW_{ex}$  (c, 单位:  $d \cdot a^{-1}$ )

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for  $HW_{day}$  (a, unit:  $d \cdot a^{-1}$ ),  $HW_{sev}$  (b, unit:  $d \cdot a^{-1}$ ) and  $HW_{ex}$  (c, unit:  $d \cdot a^{-1}$ )

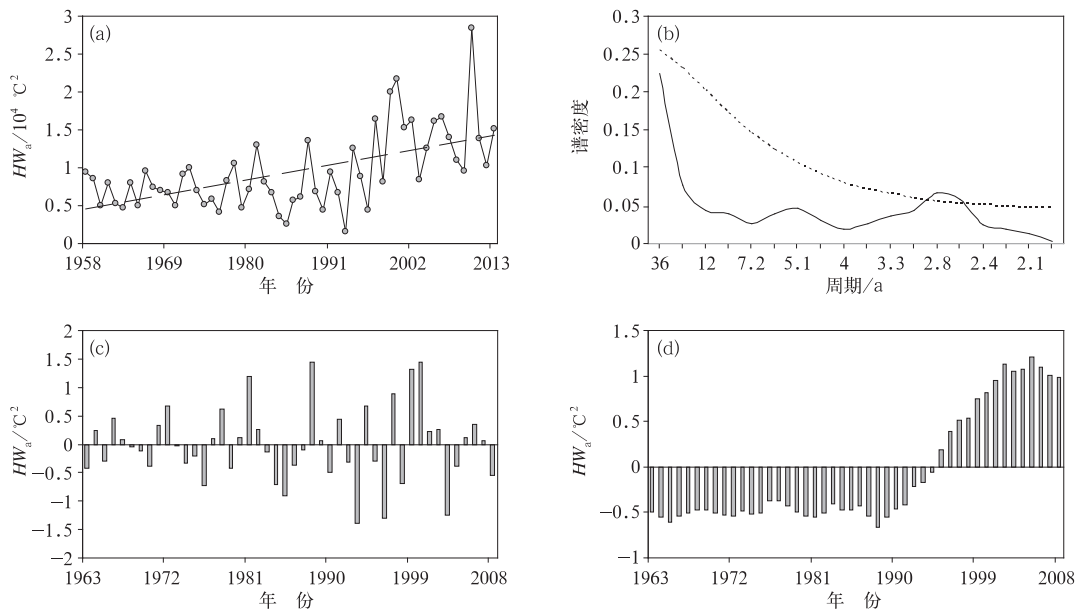


图 4  $HW_a$  指数的时间序列分布(a,虚线为线性趋势)、功率谱分析(b,虚线为 0.05 显著性水平检验)、年际变化时间序列(c)和 10 年滑动平均时间序列(d)  
(图 4a 为原始值时间序列,图 4b,图 4c,图 4d 为标准化后的时间序列分析)

Fig. 4 The  $HW_a$  index time series (a, dashed line is linear trend), power spectrum analysis (b, dashed line is 0.05 significance test level), interannual variation time series (c), 10-yr running mean (d)

(Fig. 4a is original value of  $HW_a$ , and the  $HW_a$  index in Fig. 4b—Fig. 4d is the standardized data)

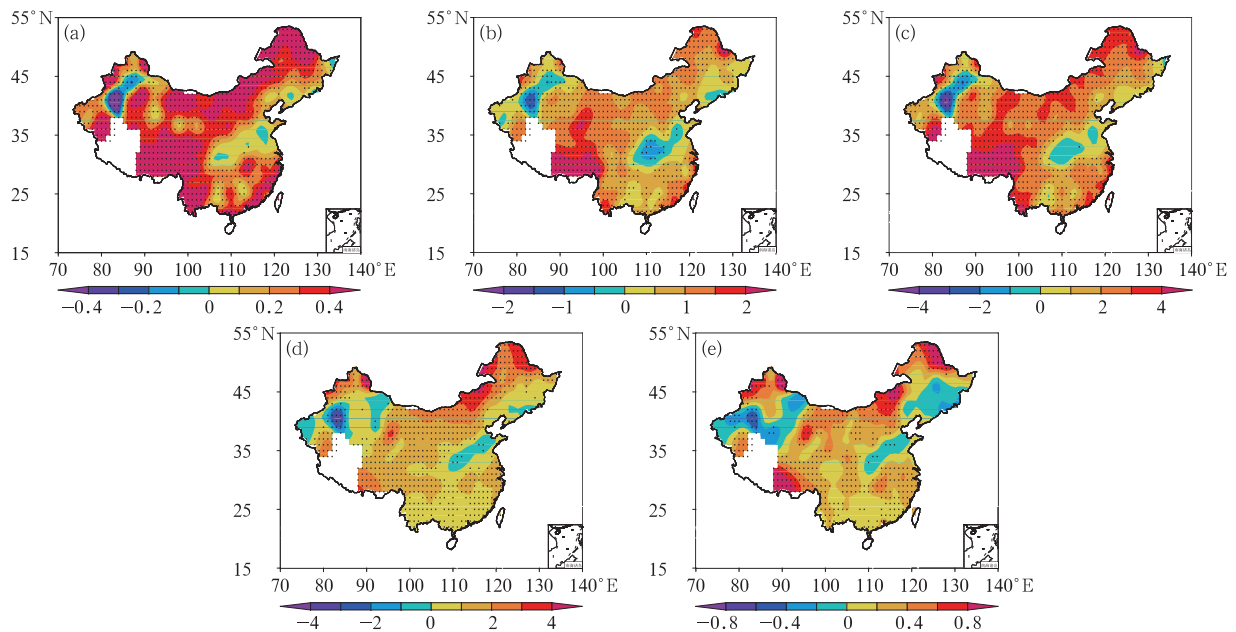


图 5 1958—2013 年的  $HWN$ [a,单位:次·(10 a)<sup>-1</sup>], $HWD$ [b,单位:d·(10 a)<sup>-1</sup>], $HWF$ [c,单位:d·(10 a)<sup>-1</sup>], $HWA$ [d,单位:℃<sup>2</sup>·(10 a)<sup>-1</sup>]和  $HWM$ [e,单位:℃<sup>2</sup>·(10 a)<sup>-1</sup>]变化趋势的空间分布  
(打点区域为通过 0.05 显著性水平检验区域)

Fig. 5 Spatial distribution of the variation linear trend of (a)  $HWN$  [unit:  $n \cdot (10 a)^{-1}$ ], (b)  $HWD$  [unit:  $d \cdot (10 a)^{-1}$ ], (c)  $HWF$  [unit:  $d \cdot (10 a)^{-1}$ ], (d)  $HWA$  [unit:  $^{\circ}C^2 \cdot (10 a)^{-1}$ ], (e)  $HWM$  [unit:  $^{\circ}C^2 \cdot (10 a)^{-1}$ ] for the period 1958—2013  
(The dot areas are over the 0.05 significance test level region)



与任国玉等(2005)的结论一致。西南东部、华中北部、华北南部和东北南部地区的增加趋势不显著。在 HWD(图 5b)的变化趋势空间分布中,显著增加趋势范围较 HWN、HWF 要小,但藏、川、滇交界处仍然是 HWD 增加最明显的区域;华中和华北南部地区出现了减少的趋势,湖北省减少趋势达到了  $1 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。HWA(图 5d)增加趋势最明显的区域在华北北部和东北北部地区,江淮之间没有明显的变化趋势。全国大部分地区的 HWM(图 5e)变化趋势不显著,只在华东、华中、华南、西南西部和华北局部地区有显著的增加趋势。新疆库车地区( $41.717^{\circ}\text{N}, 82.967^{\circ}\text{E}$ )是唯一一个热浪指数显著下降的区域,通过对该地区指数的时间序列进行分析(图略),不存在明显的热浪异常事件,其下降原因有待以后深入分析。

### 3 高原代表站的高温热浪指数变化

任国玉等(2005)指出,夏季西藏地区增温速率位列全国第一,但尚无人研究藏、川、滇高原地区的增温能否达到高温热浪事件标准。由前文分析可知,中国西部高原地区的热浪指数普遍较低,但增加趋势却较明显。图 2d 简单描述了中国北方站点在一次热浪事件中的指数变化过程,本文以云南德钦( $28.483^{\circ}\text{N}, 98.917^{\circ}\text{E}$ , 海拔  $3320.8 \text{ m}$ )作为西部高原代表站,分析中国西部高原地区的高温热浪指数变化特征。

图 6 是云南德钦站所有  $\text{EHF} > 0$  的高温天数分布时间序列图。可以看到在 20 世纪 80 年代之前,德钦站  $\text{EHF} > 0$  的高温天数较少,且较零散,能达到热浪标准的天数则更少,高温天数为 0 的年份较多。进入 20 世纪 70 年代末后,  $\text{EHF} > 0$  的高温天数开始增加,相应的热浪事件也开始出现并随之增加。在 80 年代中后期到 90 年代初,  $\text{EHF} > 0$  和热浪事件的数量稍有减少;但从 20 世纪 90 年代中期开始,  $\text{EHF} > 0$  的高温天数迅速增加,热浪天数也出现爆发性增长,并一直持续至今。从热浪持续时间看,在 20 世纪 90 年代中期之前的热浪天数持续时间较短;90 年代中期之后,持续时间有明显增加。其中,2006 年 6 月 29 日至 7 月 21 日的热浪事件持续时间最长,达到了 23 d。从热浪出现的时间来看,在 20 世纪 90 年代中期之前,高温热浪天数全部集中在 6—8 月;90 年代中期之后,5 和 9 月也开始出

现高温热浪事件,特别是有少数高温、热浪事件甚至出现在 9 月中下旬。可见在高原上不仅有高温热浪事件,而且越来越频繁,持续时间也在增加。

从 1958—2013 年德钦站的  $\text{HW}_{\text{day}}$ 、 $\text{HW}_{\text{sev}}$  和  $\text{HW}_{\text{ex}}$  的时间序列(图 7)来看,20 世纪 80 年代之前的  $\text{HW}_{\text{day}}$  天数普遍较小,  $\text{HW}_{\text{sev}}$  和  $\text{HW}_{\text{ex}}$  出现的次数几乎没有;从 20 世纪 80 年代初开始,  $\text{HW}_{\text{day}}$  的天数开始增加,最长达 8 d(1982—1983 年),而  $\text{HW}_{\text{sev}}$  和  $\text{HW}_{\text{ex}}$  也开始偶有出现,但在 90 年代初又迅速回落;从 90 年代中期开始,  $\text{HW}_{\text{day}}$  有非常明显的上升,最多达到了 45 d(2009 年)。  $\text{HW}_{\text{sev}}$  天数相对较少,最多有 7 d(2007 年);  $\text{HW}_{\text{ex}}$  出现的天数最少,但在 1993 年(含 1993 年)以后出现的  $\text{HW}_{\text{ex}}$  天数占德钦 56 年全部  $\text{HW}_{\text{ex}}$  天数的 94.1%。对热浪天气而言,德钦 HWN 和 HWF 时间序列与  $\text{HW}_{\text{day}}$  时间序列

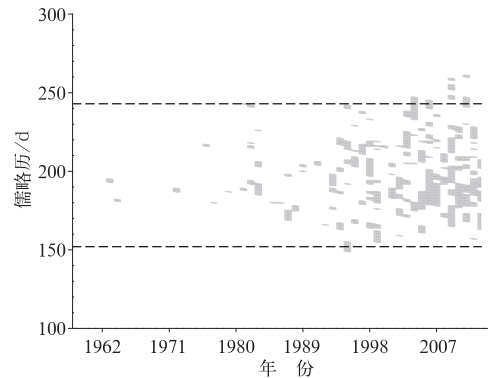


图 6 1958—2013 年云南德钦站  $\text{EHF} > 0$  的时间序列图

(上短划线为 8 月 31 日,下短划线为 6 月 1 日)  
Fig. 6 Time serials of the events for  $\text{EHF} > 0$  at Deqin Station of Yunnan from 1958 to 2013  
(The upper dashed line is for 31 August while the lower one is for 1 June)

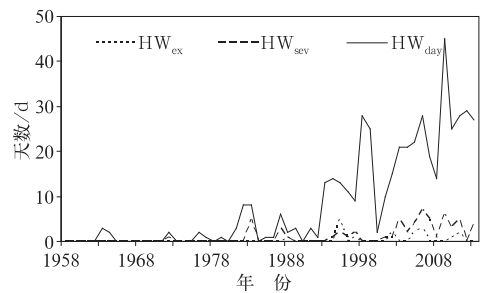


图 7 1958—2013 年云南德钦站  $\text{HW}_{\text{day}}$ 、 $\text{HW}_{\text{sev}}$  和  $\text{HW}_{\text{ex}}$  时间序列图

Fig. 7 Time serials of  $\text{HW}_{\text{day}}$ ,  $\text{HW}_{\text{sev}}$  and  $\text{HW}_{\text{ex}}$  days at Deqin Station of Yunnan from 1958 to 2013



的相关系数分别为 0.95 和 0.98,说明该站的热浪事件次数和天数也存在与  $HW_{day}$  相似的变化特征,这里不再赘述。

虽然从图 7 中能看到  $HW_{day}$  天数比  $HW_{sev}$  和  $HW_{ex}$  的天数要多,但从逐年 HWA 时间序列中(图 8)可以看到,在 20 世纪 80 年代以前,HWA 以 0 为主,即大部分年份不存在高温热浪天气;在 80 年代至 90 年代初,HWA 等于 0 的次数开始减少,最大值开始超过 2 倍  $EHF_{85}$  阈值,但主要仍以轻、中度高温为主;90 年代 HWA 出现了第一个峰值,但在 2000 年左右又迅速回落;在 2001 年以后的 13 年中,HWA 只有 1 次出现在  $EHF_{85}$  阈值以下,7 次出现在 2 倍  $EHF_{85}$  阈值以下,5 次超过 2 倍  $EHF_{85}$ ,也意味着在进入 21 世纪后,德钦最热一天为重度高温的几率比以前 43 年都要高。

由以上分析可以看到,中国西部高原地区的气温受全球气温变暖影响比中国东部平原还要明显,不仅仅是温度增幅较大,而且高温热浪等事件的数量、强度等增幅也较大,尤其是在进入 21 世纪后更为明显。高原地区的高温热浪天气会对周围的冰川、冻土等自然环境和生态环境造成较大的影响,需要引起高度关注。

## 4 结 论

本文采用世界气象组织气候委员会 ET-CRSCI 推荐,基于 EHF 的热浪指数对中国 1958—2013 年的热浪变化特征进行分析,得到以下主要结论:

(1) 中国华中、西北地区的 HWN 要多于其他地区的 HWN,中国华东和华中地区的 HWD 和

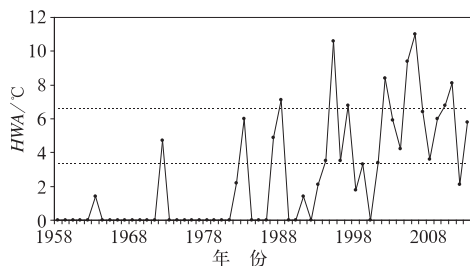


图 8 同图 7,但为 HWA

(下短划线为  $EHF_{85}$ ,上短划为 2 倍  $EHF_{85}$ )

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for time serial of annual maximum EHF values

(The lower dashed line is  $EHF_{85}$ , and the upper one is double  $EHF_{85}$ )

HWF 值较长,而华南、东南和西南南部则相对较短;HWA、HWM 和  $HW_{me}$  都具有明显的北高南低特征,其中 HWA 南北相差最多达 18 倍;当存在异常热浪事件时, $HW_{me}$  比 HWM 更准确反映中等程度热浪事件的 EHF 值。中国 HWA 指数有逐渐增加的趋势,与全球平均气温距平的相关系数达 0.625; $HW_a$  有准 3 年的年际周期变化特征和明显的年代际变化特征, $HW_a$  指数在 1995 年左右出现了由负值转为正值的突变。

(2) 华东、华中地区的  $HW_{day}$  和  $HW_{sev}$  相对较多,但  $HW_{ex}$  却相对较少;中国北部和西部地区的  $HW_{day}$  和  $HW_{sev}$  相对较少,但  $HW_{ex}$  却相对较多。华南、西南和东南南部地区的  $HW_{day}$ 、 $HW_{sev}$  和  $HW_{ex}$  值均较少。

(3) 从热浪指数的变化趋势来看,全国大部分地区的指数均有增加的趋势,西藏和四川西部、云南北部的高原地区增加幅度最大;华中、华北和东北南部地区增加趋势不显著,局部地区的部分指数还有减少的趋势。

(4) 以云南德钦站为例,分析在中国西部高原地区不仅有高温热浪事件,而且数量、强度增加幅度也越来越大。20 世纪 90 年代中期高温热浪事件开始出现大幅度增加;出现时间从夏季扩大到 5 和 9 月; $HW_{day}$ 、 $HW_{sev}$  有非常明显的上升趋势, $HW_{ex}$  相对较少,但 94.1% 的  $HW_{ex}$  出现在 1993 年之后。从 EHF 年最大值的大小分布特征来看,在 20 世纪 90 年代之前,HWA 以轻、中度高温天气为主;从 90 年代开始,HWA 开始出现超过 2 倍  $EHF_{85}$  阈值范围,属重度高温天气;在进入 21 世纪后,HWA 大部分都是中、重度高温天气。

**致谢:**感谢江西省气象台许爱华首席对本文提出的宝贵意见。

## 参考文献

- 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会,2011. 气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社.
- 黄卓,陈辉,田华,2011. 高温热浪指标研究[J]. 气象,37(3):345-351.
- 李双双,杨赛霓,张东海,等,2015. 近 54 年京津冀地区热浪时空变化特征及影响因素[J]. 应用气象学报,(5):545-554.
- 陆琛莉,范晓红,宋文英,等,2012. 杭州湾北岸持续热浪天气特点及城市化发展的影响[J]. 气象,38(3):329-335.
- 任国玉,初子莹,周雅清,等,2005. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究,10(4):701-716.
- 孙国武,汤绪,刘新伟,等,2007. 亚欧典型热浪过程的大气环流对比

- 分析[J]. 高原气象, 26(3):503-510.
- 沈永平, 王国亚, 2013. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 35(5):1068-1076.
- 谈建国, 2009. 高温热浪与人体健康[M]. 北京: 气象出版社.
- 谈建国, 黄家鑫, 2004. 热浪对人体健康的影响及其研究方法[J]. 气候与环境研究, 9(4):680-686.
- 谈建国, 郑有飞, 彭丽, 等, 2008. 城市热岛对上海夏季高温热浪的影响[J]. 高原气象, 27(s1):144-149.
- 王国复, 李集明, 邓莉, 等, 2004. 中国气象科学数据共享服务网总体设计与建设[J]. 应用气象学报, 15(s1):10-16.
- 向旬, 王冀, 王绪鑫, 等, 2008. 我国极端气温指数的时空变化与分区研究[J]. 气象, 34(9):73-80.
- 谢志清, 杜银, 曾燕, 等, 2015. 上海城市群化发展显著增强局地高温热浪事件[J]. 气象学报, 73(6):1104-1113.
- 徐金芳, 邓振镛, 陈敏, 2009. 中国高温热浪危害特征的研究综述[J]. 干旱气象, 27(2):163-167.
- 叶殿秀, 尹继福, 陈正洪, 等, 2013. 1961—2010 年我国夏季高温热浪的时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 9(1):15-20.
- 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等, 2011. 1951—2009 年中国不同区域气温和降水量变化特征[J]. 气象与环境学报, 27(4):1-11.
- 张书余, 2008. 干旱气象学[M]. 北京: 气象出版社: 1-27, 73-81, 185-190, 237-246.
- 张书余, 张夏琨, 田颖, 等, 2015. 模拟热浪天气对冠心病影响及其机理实验研究[J]. 气象, 41(6):761-770.
- 周长艳, 张顺谦, 齐冬梅, 等, 2013. 近 50 年四川高温变化特征及其影响[J]. 高原气象, 32(6):1720-1728.
- Alexander L, Yang H, Perkins S, 2015. ClimPACT-Indices and Software. User Manual[Z/OL]. [2015-2-20]. [http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/opace/opace4/meetings/documents/ETCRSCI\\_software\\_documentation\\_v2a.doc](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/opace/opace4/meetings/documents/ETCRSCI_software_documentation_v2a.doc).
- Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al, 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new data set from 1850[J]. J Geophys Res Atmos, 111(D12):121-133.
- Ding T, Qian W, 2011. Geographical patterns and temporal variations of regional dry-wet heat wave events in China during 1960—2008 [J]. Adv Atmos Sci, 28(2):322-337.
- Elizbarashvili M, 2015. Heat wave events over Georgia since 1961: climatology, changes and severity[J]. Climate, 3(2):308-328.
- IPCC, 2013. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers[R/OL]. [2013-10-28]. [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_SPM\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf).
- Morice C P, Kennedy J J, Rayner N A, et al, 2012. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set[J]. J Geophys Res Atmos, 117(D8):393-407.
- Nairn J R, Fawcett R J, 2014. The excess heat factor: a metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity [J]. Int J Environ Res Public Health, 12(1):227-253.
- 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.
- Poumadère M, Mays C, Mer S L, et al, 2006. The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now[J]. Risk Analysis, 25(6):1483-1494.
- Rall D, Martin H, Judith P, et al, 2011. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? [J]. Geophys Res Lett, 38(6):122-133.
- Semenza J C, Rubin C H, Falter K H, et al, 1996. Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago[J]. New Engl J Med, 335(2):84-90.
- WMO, 2012. Final Report of the Meeting of the Commission for Climatology (CCL) Expert Team on Climate Risk and Sector-Specific Climate Indices (ET-CRSCI)[R/OL]. [http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/opace/opace4/meetings/documents/ET\\_CRSCI\\_FinalReport\\_Tarragona.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/opace/opace4/meetings/documents/ET_CRSCI_FinalReport_Tarragona.pdf).