

Study on Spatiotemporal Distribution Characteristics of High Temperature and Heat Waves in Southwest China from 1979 to 2019

Yue Zhang, Tiangui Xiao, Juetao Zeng, Yu Du

School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: zhangy7452@163.com

Received: May 19th, 2020; accepted: Jun. 2nd, 2020; published: Jun. 9th, 2020

Abstract

In the context of global warming, extreme warming events occur frequently. In order to further study the spatial and temporal distribution characteristics of heat wave in southwest China, in this paper, linear trend analysis and Mann-Kendall test are used to study the spatial and temporal distribution of heat waves in southwest China. The 1979-2019 summer temperature data of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) are used. The following conclusions are drawn: Over the past 41 years, the frequency, duration and intensity of heat waves have shown a general trend of linear increase, with the rates of 0.09 times/10a, 0.37 d/10a and 0.44°C·d, respectively. From the mutation situation, before 2013, the frequency, duration and intensity of heat waves showed an increasing trend, but the increasing trend was not significant. After 2013, the frequency, duration and intensity of heat waves showed a significant increase trend. The spatial distribution of the frequency, duration and intensity of heat waves is more in the southeast and less in the northwest. The heat waves areas were concentrated in the central and eastern part of the study area, while the hot and heat wave events were rare in western Sichuan and southwestern Yunnan. Except for western Yunnan and western Sichuan, the frequency, duration and intensity of heat waves in the study area all showed an increasing trend. The central region of the study area had a larger increasing trend, and the regions that passed the 0.05 significance test were also concentrated in the central region.

Keywords

High Temperature and Heat Waves, Southwest China, Linear Trend Analysis, Mann-Kendall Test

1979~2019年我国西南地区高温热浪时空分布特征研究

张月, 肖天贵, 曾珏桃, 杜宇

成都信息工程大学, 大气科学学院, 四川 成都
Email: zhangy7452@163.com

收稿日期: 2020年5月19日; 录用日期: 2020年6月2日; 发布日期: 2020年6月9日

摘要

在全球变暖的大背景下, 极端暖事件发生越来越频繁。为了进一步研究西南地区高温热浪时空分布特征规律, 利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的1979至2019年夏季的温度数据资料, 运用趋势分析和Mann-Kendall检验等气候诊断方法, 对西南地区高温热浪的时空分布特征进行研究, 结果表明: 41年来, 高温热浪频次、持续时间和强度均在总体上呈现出线性增加的趋势, 其速率分别为0.09次/10a、0.37 d/10a、0.44°C·d。从突变情况看, 2013年以前, 高温热浪频次、持续时间和强度表现出增加趋势, 但增加趋势不显著; 2013年以后, 高温热浪频次、持续时间和强度呈现出显著增加趋势; 高温热浪频次、持续时间和强度在空间上的分布大致呈现东南多西北少的特征。高温热浪多发地区集中在研究区域中东部, 而四川西部、云南西南部很少发生高温热浪事件; 研究区域高温热浪频次、持续时间和强度除了云南西部和四川西部呈减少或不变趋势, 其他地区都呈增加趋势, 研究区域的中部地区增加趋势更大, 通过0.05显著性检验的区域也集中在中部。

关键词

高温热浪, 我国西南地区, 线性趋势, Mann-Kendall检验

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

IPCC自1880年至2012年的全球海陆表面的平均温度升高了0.85°C; 而海陆表面平均温度2003年至2012年与1850年到1900年相比上升了0.78°C, 总体呈线性上升的趋势[1](2014)。近年来, 伴随着全球气候变暖趋势加强和城市热岛效应增强、影响范围扩大, 在全球范围内, 极端暖事件发生的频次不断增加, 高温热浪事件频频发生, 并且高温热浪事件发生的频率、持续时间以及强度也在持续增强。其覆盖的范围也越来越广。高温热浪这种气象灾害原本是发生在一些热带、副热带地区的, 然而近年来, 不但这些地区的极端高温事件发生频率上升、强度增强, 而且一些中高纬度地区原本天气较为凉爽, 近年来气温也日渐炎热。我国夏季的高温热浪事件发生的频率也有所上升, 甚至许多地区接连发生了大范围的破纪录高温事件。

高温热浪事件引发的灾害性天气不仅会对人们的身体健康产生严重危害, 还会对工农业的生产以及人们日常生活的正常进行造成巨大的影响, 还对国家经济的发展和諧的稳定构成极大危害。所以, 研究在全球变暖背景下极端暖事件的变化规律, 分析高温热浪事件的时空特征, 由此预估未来的极端暖事件, 对高温热浪的灾害性预报预警与防灾减灾具有十分重要的理论意义和实用价值。

鉴于高温热浪事件引发的灾害性天气对个人生活和國家发展具有重大的隐患, 在这种背景下, 对高温热浪事件的研究引起了国内外学者的关注。研究表明, 全球大部分地区高温热浪事件的发生频次均呈

上升趋势[2]。在我国全国范围内,除淮河流域外,高温热浪的年频次都呈现大范围的上升趋势[3]。此外有的学者针对我国的局部区域进行研究,比如有些学者分析了我国两广地区[4]、秦岭-淮河地区[5]、珠三角地区[6]、江淮地区[7]等地的高温热浪事件的变化特征。也有学者针对某个城市或省份的高温热浪事件进行研究[8]。但我国高温热浪研究大多针对全国或我国北部,对西南地区的相关研究较少。

高温热浪事件具有多方面的危害,它会使得人体对环境的不适应从而危害人们的生理健康,致使人们患病或加重病情,甚至死亡,严重影响了人们日常的生产和生活。高温热浪还对自然环境具有很大的影响,若天气持续高温少雨,极易造成森林火灾和土地荒漠化,甚至干旱等灾害。此外,对农林牧业的生产也具有巨大危害,连续高温会影响动植物的生长繁育,使得动物减重、粮食减产,造成巨大的经济损失。目前我国对高温热浪危害的研究有许多,但针对西南地区的高温热浪事件的研究较少。因此研究该区域高温热浪事件时空变化,认识近几十年来区域气候变化的特征,将对我国社会的发展和进步有重要的意义和价值。同时这些气候变化特征将对区域高温灾害的预警预报提供很好的参考依据。

2. 资料与方法

2.1. 研究区概况

西南地区的地理区划概念与行政区划概念有所不同,从而涵盖的区域范围也是不同的。在我国的行政区划概念中,西南地区包含了云南、四川、重庆、贵州、西藏自治区。由于西藏地区位于青藏高原,高温热浪事件发生得极少,因此本研究选取云南、贵州、四川、重庆地区与广西地区作为研究区域。

2.2. 资料概况

本文所用数据选用1979~2019年夏季(6~8月)欧洲气象资料中心(ERA-interim)的再分析资料,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

目前高温热浪有许多不同的标准例如,世界气象组织(WMO)将持续3 d以上的日最高气温 $> 32^{\circ}\text{C}$ 的天气过程定义为高温热浪事件;荷兰皇家气象研究所定义最高温度大于 25°C 并持续五天以上,且至少有3天温度 $> 30^{\circ}\text{C}$ 的天气过程为一次高温热浪事件;中国气象局规定高温日为日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$,连续3 d以上都为高温日则记为高温热浪事件。由于世界各地气候状况不同,各国的标准有差异,而同一个国家的不同的区域气候状况也是不同的,所以高温热浪的定义需要因地制宜。如中国气象局还规定,各省市自治区可以根据当地具体的天气特征来规定高温热浪的阈值温度值。所以还有一些高温热浪的标准是根据当地的高温阈值的百分位进行定义的。由于中国幅员辽阔,不同地区间的气候状况差异很大,在研究高温热浪发生频次、持续时间和强度等特征的区域差异时,若采用同样的温度阈值必定会导致结果南方多北方少,因此,比起绝对阈值,利用百分位方法来定义阈值更能客观地对比区域之间高温热浪分布特征的差异[9]。

本文采用IPCC高温阈值标准,即该地最高温度的第90%分位数。取1979~2019年夏季各格点的逐日最高温度数据进行有小到大的排序,取第90%分位数为各格点的高温阈值。本研究参考文献[10]对高温热浪事件具体定义如下:

高温日:若该日的日最高气温高于所定义的高温阈值时,定义当日为高温日。

高温热浪事件:在1979~2019年的夏季(6~8月)期间,当连续3 d及以上为高温日时,记为发生了一次热浪事件。

热浪频次:1年中出现的高温热浪事件的次数。

热浪持续时间:1年中发生的所有高温热浪事件过程的累计天数(至少有3 d)。

热浪强度:1次高温热浪事件过程持续时间内最高温度大于高温阈值的温度累计至之和,单位为 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

图 1 为高温阈值的空间分布。可从图中看出，四川地区的西部的高温阈值低，东部的阈值高；川渝交界地区高温阈值最高，重庆整体高温阈值都比较高；广西高温阈值较为均匀，大部分地区高温阈值在 $32^{\circ}\text{C}\sim 36^{\circ}\text{C}$ ；云南地区北部高温阈值低，南部高温阈值相对而言较高。整体而言研究区域高温阈值东部高，西部低。

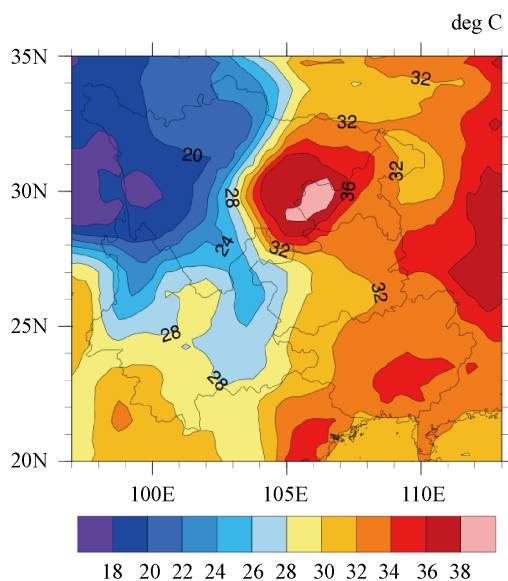


Figure 1. Distribution of the high temperature threshold in summer in 1979 - 2019

图 1. 1979~2019 年研究区域夏季高温阈值分布

2.3. 研究方法

本文用线性倾向趋势法结合显著性检验来分析高温热浪的频次、持续时间和强度等指标的多年变化趋势；用 Mann-Kendall (MK)法对其做相应的突变分析。

2.3.1. 线性倾向趋势分析

建立气候变量与时间序列间的一元线性关系[11]：

$$x_i = a + bt_i \quad (1)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \quad (2)$$

$$a = \bar{x} - b\bar{t} \quad (3)$$

$i=1, 2, 3, \dots, n$ 。 x_i 与 t_i 相对应， n 为样本量(本文 $n=41$)。上式中 a 为线性回归常数， b 为线性倾向系数， a 、 b 可以通过最小二乘法计算得到。定义气候倾向率为 $b \times 10$ ：

气候变量随时间序列变化的倾向程度可通过 b 值的大小表现出。若 $b > 0$ ，则代表随着时间序列的变化该气候变量的变化趋势是上升的，反之，若 $b < 0$ 则代表随着时间序列的变化该气候变量的变化趋势是下降的。用线性相关系数 r 来判定气候变量 x_i 随时间序列的变化趋势的显著性，经过相关系数表查得与

线性相关系数 r 相对应的显著性水平 α , 若通过了 α 的显著性检验则气候变量 x_i 随时间序列的变化趋势显著。一般而言, α 取 0.01, 0.05, 0.001 三个值为显著性水平, α 值越小, 则变化趋势越显著, 本文取 α 为 0.05, 即通过 95% 的置信度检验。

2.3.2. Mann-Kendal 法

Mann-Kendal 法是一种非参数统计检验方法, 它是世界气象组织推荐的非参数检验方法, 被已经广泛地用于分析降水与气温等要素的时间序列变化情况。其原理为[12]:

对于具有 n 个样本量的时间序列 x (本文 $n = 41$), 构造一秩序序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, 4, \dots, n) \quad (4)$$

$$\text{上式中 } r_i = \begin{cases} +1 & \text{当 } x_i \geq y_i \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (j = 1, 2, 3, 4, \dots, n) \quad (5)$$

其中, S_k 为 i 时刻的数值大于 j 时刻的数值的个数累计值。假设时间序列随机独立, 则定义统计量 UF_k 为:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, 3, 4, \dots, n) \quad (6)$$

上式中: $UF_1 = 0$; 且:

$$E(S_k) = \frac{k(k+1)}{4} \quad (7)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (8)$$

UF_1 为标准正态分布, 给定显著水平 α , 经过查询正态分布表找到与显著性水平 α 对应的 U_α , 若 $|UF_i| > U_\alpha$, 则表明该序列的趋势变化显著。对 UF_k 和 UB_k 进行分析, 可以对序列的趋势变化进行进一步的分析并找到序列的突变时间。对于序列 x , 若 UF_k (UB_k) 的值 > 0 表明序列 x 呈上升的变化趋势, 若值 < 0 , 则表明序列 x 的呈下降的变化趋势。绘制出 UF_k 和 UB_k 的曲线图, 根据显著水平 α 画出两条临界直线, 当 UF (UB) 曲线超过临界直线时, 表明序列的变化趋势显著。若在某时刻 UF 或 UB 超过显著性临界值, 则说明在该时刻有很大的几率发生突变。如果 UF 线和 UB 线在两条在临界直线之间出现了交点, 那么该时刻为突变开始的时刻。

该方法考虑两个趋势检验参数, 即表示趋势变化的强弱的显著性水平 α 和表示趋势的方向和大小的倾斜度 β 。计算公式如下:

$$Z = \frac{4}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} r_i - 1 \quad (9)$$

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (10)$$

上式中: n 为数据资料时间长度, $1 < i < j < n$; 当 $\beta > 0$ 时, 表示序列呈上升趋势, $\beta < 0$ 时, 表示序列呈下降趋势。

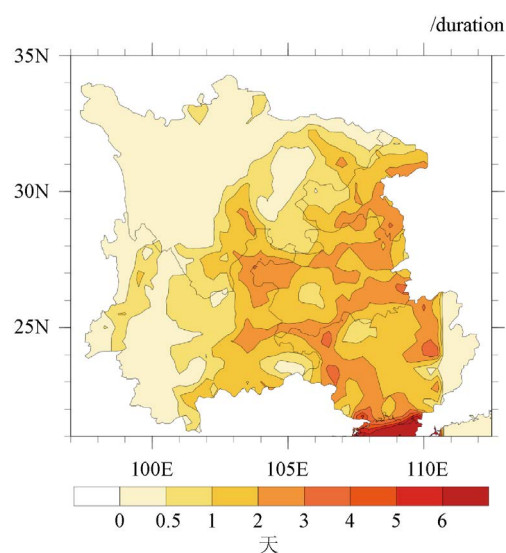
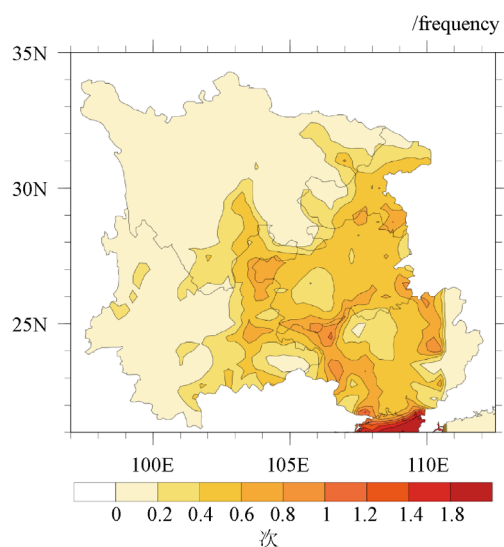
3. 研究结果

3.1. 高温热浪的空间变化特征

3.1.1. 空间分布特征

经过处理得到研究区域(云南省、贵州省、四川省、重庆市、广西壮族自治区)的近 41 年夏季平均高温热浪频次、持续时间及强度的空间分布,为图 2 所示,可以看出,研究区域 41 a 夏季平均高温热浪频次、持续时间和强度空间上的分布大体上形态相似。总体而言呈现出东南多西北少的特征,且由东南向西北减少,空间差异显著;高值区主要集中在研究区域东部,即贵州、广西等地;而四川、云南的西部为低值区,这种分布形态与研究区域的地理地形有关。

首先,从图 2 的高温热浪频次分布图可看出,1979 年到 2019 年夏季高温热浪的年均频次主要集中在研究区域的东南部,即重庆、贵州、广西地区。高温热浪过程最高在贵州南部可达 1~1.2 次,大部分地区平均每年经历 0.4~0.6 次的高温热浪过程,频次由东南向西北方向逐渐减少。而云南西部、四川大部



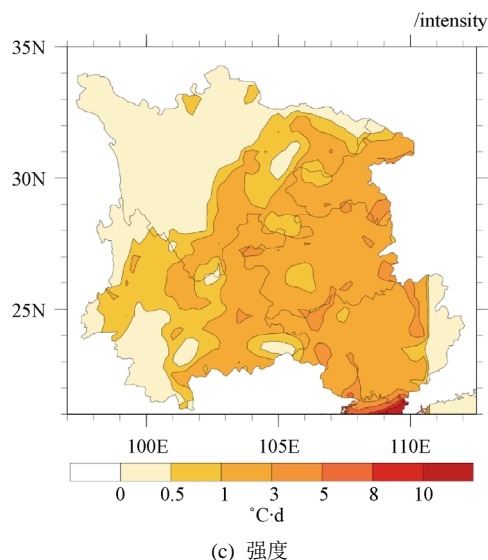


Figure 2. Spatial distribution of average annual frequency, duration, intensity of heat waves in the study area in summer in 1979 - 2019

图 2. 1979~2019 年夏季研究区域平均高温热浪频次、持续时间和强度的空间分布图

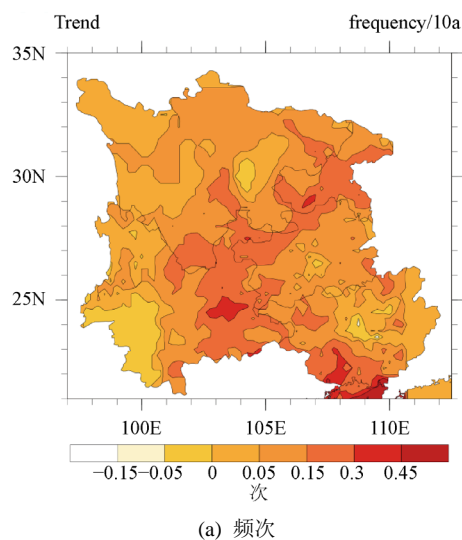
分地区年均热浪次数在 0.2 次以下。高温阈值高的区域反而频次与周围相比而言较低，原因可能是极端高温是偶尔发生的，这些地区连续达高温阈值的情况还是较少。

其次，持续时间分布也与频次分布类似，东南部偏多，西北部偏少，由东南向西北减少。年均最高持续时间最高可达 4~5 天，大部分地区达年均 1~2 天。也是高温阈值高的区域反而持续时间与周围相比而言较短。

最后，强度分布比较均匀，研究区域除了四川西北部和云南西南部，大部分地区在 $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 以上。

3.1.2. 空间分布变化趋势

计算研究区域的高温热浪 3 项指标的气候倾向率，画出研究区域的年际高温热浪频次、持续时间和强度的变化趋势分布图，设定置信度为 $\alpha = 0.05$ (图 3)。



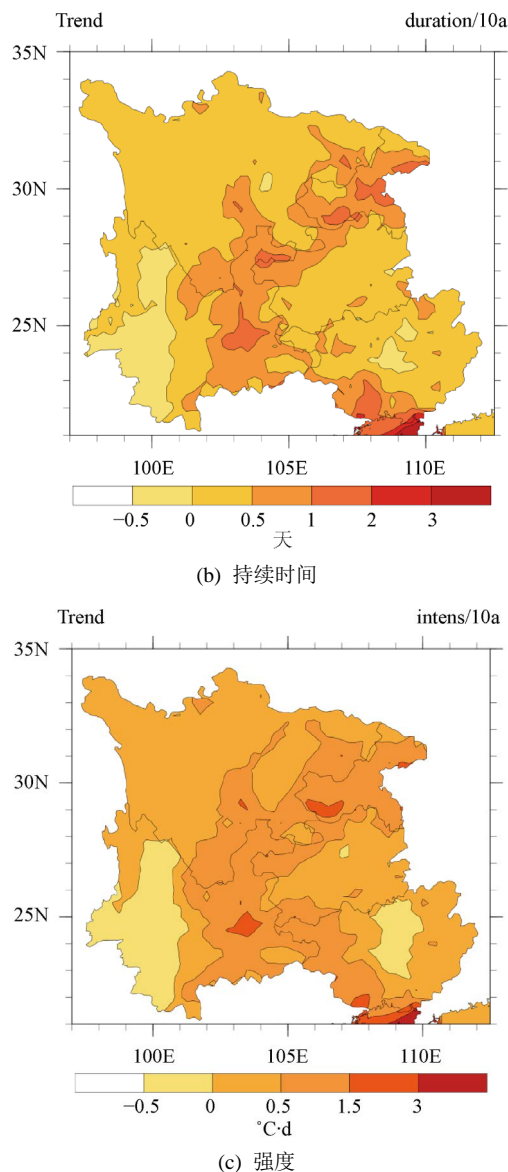


Figure 3. Spatial distribution of variation trends of frequency, duration, intensity of heat waves in the study area in summer in 1979 - 2019

图 3. 1979~2019 年夏季研究区域高温热浪频次, 持续时间, 强度的变化趋势(倾向率)空间分布

由图 3 可以看出, 1979 年至 2019 年的 41 a 以来, 除了云南西部明显减少, 四川西部高原地区不变以外, 研究区域的大部地区都呈现出增加的趋势, 且研究区域的中部增加最明显, 增加速率 ≥ 0.15 次/10a。且增加幅度在 0.15 次/10a 以上的区域大部分都通过了显著性检验。

高温热浪持续时间减少区域仍然集中在云南西部, 而增加区域主要在研究地区中部, 相比频次, 增加幅度大的地区范围更小, 中部地区增加速率 ≥ 0.5 d/10a, 其中增幅在 1 d/10a 的地区通过了显著性检验。

高温热浪强度的减少区域在云南西部、广西中部, 其他研究地区呈增加趋势, 依旧是研究区域中部增加幅度较大, 通过显著性检验的区域也集中在研究区域中部。

总的来说研究区域西南部呈减少趋势, 但整体趋势不显著; 西北部维持现状; 中部、东部增加, 但

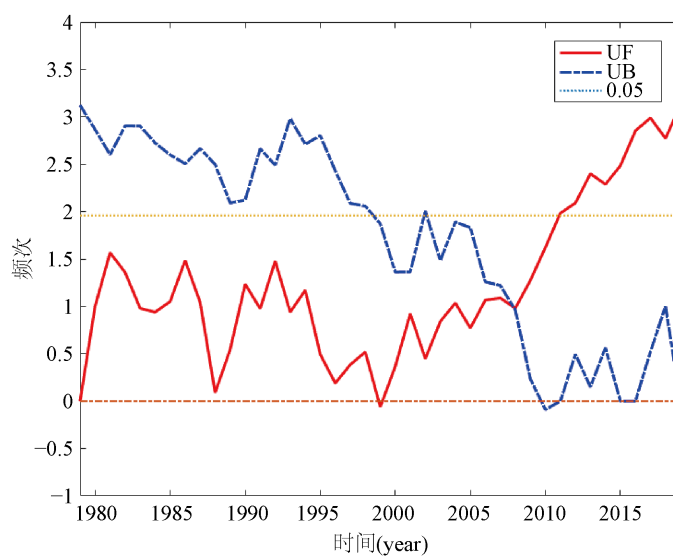
中部增加趋势比较显著。

3.2. 高温热浪的时间变化特征

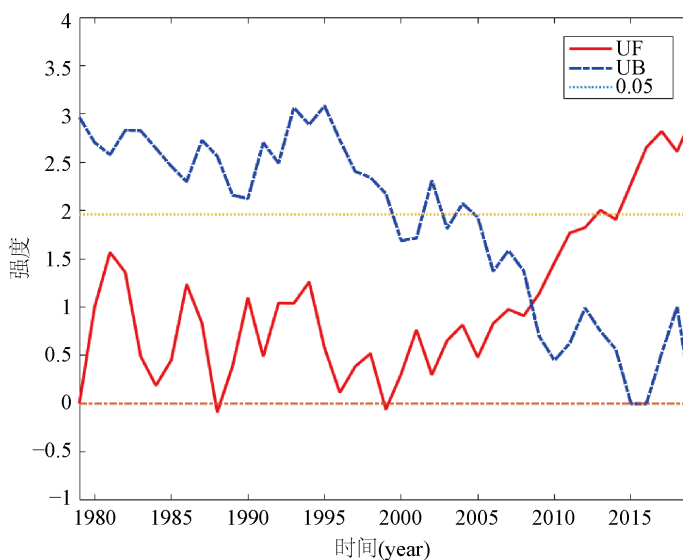
3.2.1. 突变检验

运用 Mann-Kendall 法分别对这 3 个时间序列进行突变分析, 设定置信度水平为 0.05。从图 4 可以看出这 3 个指标的变化趋势基本呈现同步变化的特点。在研究时段内 2008 年的频次、持续时间和强度的 UF 曲线与 UB 曲线均相交, 根据突变时间的定义, 若以 2008 年作为突变点, 则在突变前后的 3 个指标变化趋势相同, 都是上升的趋势, 而且 UF 线与 UB 线均未超越 0.05 置信度水平临界线(± 1.96), 因此对本次研究的高温热浪频次、持续时间和强度 3 项指标而言, 在 2008 年并未发生突变现象。

3 项指标的 UF 曲线分别在 2011、2013、2013 年超越了 0.05 置信度临界线($+1.96$)。因此, 本文取 2013 年作为 1979 至 2019 年高温热浪研究的突变年份来分析高温热浪的 3 项指标的变化情况。结果如图 4 所



(a) 频次



(b) 强度

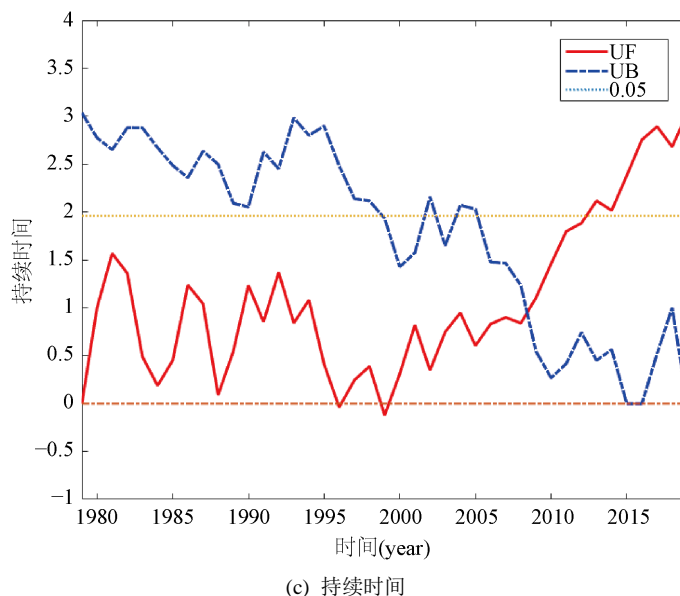


Figure 4. Mann-Kendall mutation test curves of frequency (a), intensity (b) and duration (c) of heat waves in the study area in summer in 1979 - 2019

图 4. 1979~2019 年研究区域高温热浪的频次(a), 强度(b), 持续时间(c)的 MK 突变检验曲线

示, 1979 至 2013 年高温热浪频次、持续时间和强度均呈现出增加的趋势, 但趋势不显著; 在 2013 年至 2019 年, 高温热浪的 3 项指标均呈现出显著的上升趋势。突变前后相比高温热浪的频次、持续时间以及强度分别上升了 0.15 次, 0.54 d, 0.83 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

所以 1979 年至 2019 年研究区域夏季高温热浪频次, 持续时间和强度整体呈上升的趋势, 2013 年以前上升趋势不显著, 但在 2013 年以后呈显著上升的趋势。

3.2.2. 线性趋势

经过 Mann-Kendall 检验法检验选定 2013 年为高温热浪的频次, 持续时间和强度的突变年份。因此利用欧洲气象资料中心的再分析资料统计出 1979~2019 年夏季高温热浪的频次、持续时间和强度的数据, 再运用线性倾向估计法, 以 2013 年为间断点, 进行分段线性拟合来描述研究区域的这 3 项指标的历年变化趋势(图 5)。

首先, 1979 年至 2019 年间研究区域平均夏季高温热浪频次为 0.25 次; 持续时间为 0.79 d; 强度为 0.75 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。从图 5 中可以看出, 高温热浪频次、持续时间和强度的变化趋势较为一致, 在总体上均呈现出线性增加的趋势; 在 2019 年附近达到历史最大值, 其高温热浪频次、持续时间和强度为 0.94 次、4.86 d、3.93 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$; 在 1988 年附近达到历史最低值, 其高温热浪频次、持续时间和强度为 0.02 次、0.04 d、0.06 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。最后拟合出一条高温热浪频次、持续时间和强度的变化趋势线, 变化呈上升趋势, 速率分别为 0.09 次/10a、0.37 d/10a、0.44 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 且趋势系数均通过了 0.05 显著性检验, 表明增加趋势显著。

3.3. 高温热浪事件的成因

关于我国高温热浪的成因, 有许多学者进行了研究, 如谈建国等[13]研究了我国高温热浪分布形态的成因, 研究得出华南华北地区的高温天气与大尺度天气系统有关, 华北与大陆变性高压型和副高相关, 而华南与副高和热带气旋相关; 而西北和内陆地区由于地形阻挡作用, 来自大西洋和印度洋的暖湿气流

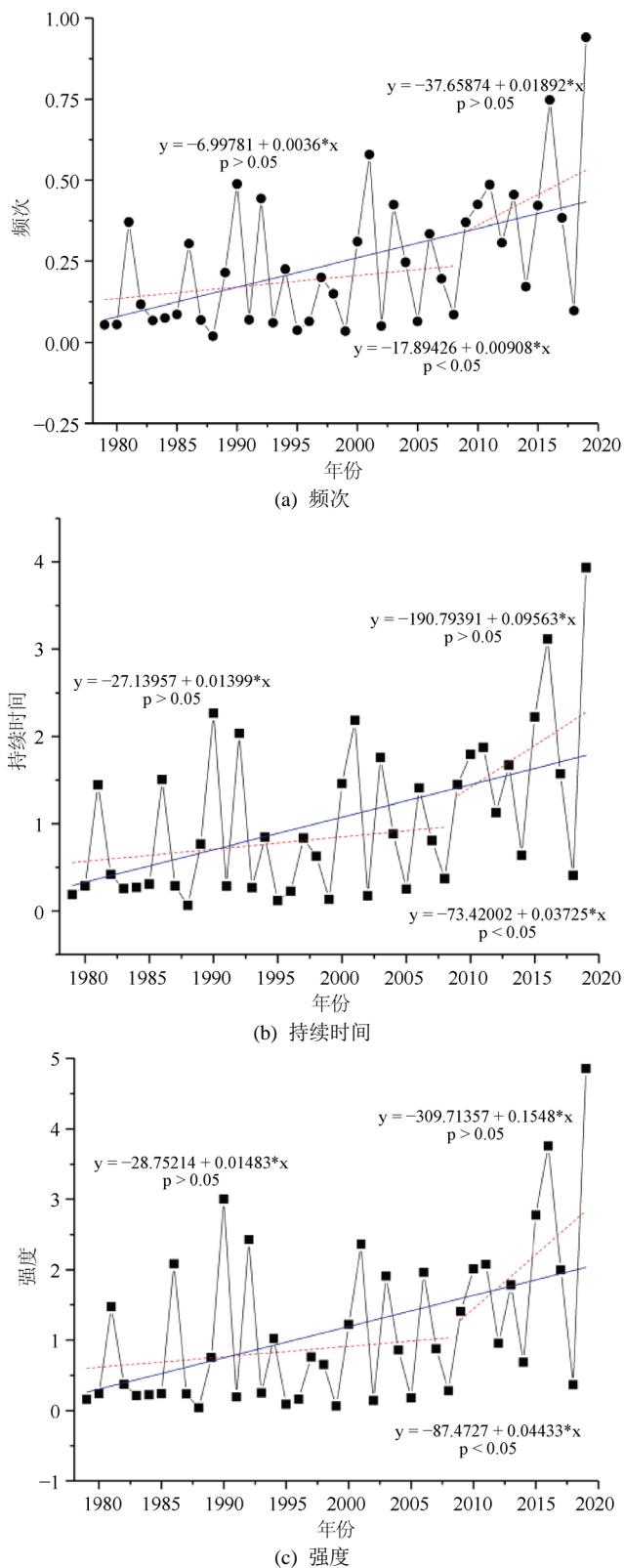


Figure 5. Interannual trends in frequency (a), duration (b), and intensity (c) of heat waves in the study area in 1979 - 2019

图 5. 1979~2019 年研究区域高温热浪的频次(a), 持续时间(b)和强度(c)的际年变化趋势

北阻挡在外无法进入, 当大陆暖高压或强大的西伸副高控制这些地区时天气晴朗, 由于持续的日照导致这些地区不断增温而形成高温天气。陈敏等[14]研究得出导致我国高温热浪偏强的重要原因是北半球夏季副热带高压异常偏强、西太平洋副高异常偏西、印缅低槽异常偏弱。此外, 还有一些学者认为我国的高温热浪天气与南亚高压也有着一定的联系[15]。

4. 结论

本文采用云南省、贵州省、四川省、重庆市、广西壮族自治区等地的欧洲中期天气预报中心 1979 年至 2019 年夏季 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的逐日气温数据, 运用分段线性倾向趋势法结合显著性检验、Mann-Kendall 检验等方法, 对研究区域的高温热浪的频次、持续时间和强度的时空分布特征进行了研究, 得到以下初步结论:

(1) 研究区域 41 a 夏季平均高温热浪频次、持续时间和强度空间上的分布大体上形态相似。总体而言呈现出东南多西北少的特征, 且由东南向西北减少, 空间差异显著。而高温热浪的空间分布变化趋势在研究区域内西南部呈减少趋势, 但整体趋势不显著; 西北部维持现状; 中部、东部增加, 但中部增加趋势比较显著。

(2) 1979 年至 2019 年研究区域夏季高温热浪频次、持续时间和强度的变化趋势较为一致, 在总体上均呈现出线性增加的趋势; 在 2013 年发生突变, 2013 年以前上升趋势不显著, 但在 2013 年以后呈显著上升的趋势; 3 项指标在 2019 年附近达到历史最大值; 在 1988 年附近达到历史最低值。

(3) 我国高温热浪的成因根据不同地区可能分别与大陆变性高压型、西太平洋副热带高压、热带气旋、大陆暖高压、印缅低槽、南亚高压以及地理地形有关。

(4) 在全球变暖背景下, 西南地区与广西高温热浪频率越来越高, 强度越来越强, 持续时间也越来越长。这主要与全球气候变暖有关, 其次是西南地区在不断发展, 城市化进程加快, 城市规模也不断扩大, 人口更加密集, 城市热岛效应更加明显, 加重了夏季极端高温事件的发生。

参考文献

- [1] IPCC/Climate Change 2013: The Physical Science Basis.
- [2] Erdenebat, E. and Sato, T. (2016) Recent Increase in Heat Wave Frequency around Mongolia: Role of Atmospheric Forcing and Possible Influence of Soil Moisture Deficit. *Atmospheric Science Letters*, **17**, 135-140. <https://doi.org/10.1002/asl.616>
- [3] 沈皓俊, 游庆龙, 王朋岭, 等. 1961-2014 年中国高温热浪变化特征分析[J]. *气象科学*, 2018, 38(1): 28-36.
- [4] 张平, 延军平, 李英杰, 唐宝琪, 王文静. 1960-2015 年两广地区夏季高温热浪变化特征[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2018, 45(1): 73-81.
- [5] 李双双, 延军平, 杨赛霓, 胡书山, 赵怡. 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.
- [6] 程迪, 王咏薇, 刘寿东, 肖帆. 1959-2012 年夏季珠三角地区高温热浪的时空分布特征及其城市热岛效应的影响分析[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(1): 273-283.
- [7] 董晓晓, 武炳义. 江淮地区夏季高温事件与北极冷异常的动力联系[J]. *应用气象学报*, 2019, 30(4): 431-442.
- [8] 刘嘉慧敏, 郑然, 姜盼星, 梁绵. 2017 年 7 月陕西高温热浪天气成因及前期信号初探[J]. *干旱气象*, 2019, 37(2): 233-242.
- [9] You, Q.L., Jiang, Z.H., Lei, K., et al. (2016) A Comparison of Heat Wave Climatologies and Trends in China Based on Multiple Definitions. *Climate Dynamics*, **1**, 15. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3315-0>
- [10] 叶殿秀, 尹继福, 陈正洪, 郑有飞, 吴荣军. 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*, 2013, 9(1): 15-20.
- [11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.

-
- [12] 唐共地, 包赢. 基于有序聚类分析法和 Mann-Kendall 法的水沙系列突变点研究[J]. 江淮水利科技, 2015(6): 35-37.
- [13] 谈建国, 郑有飞, 彭丽, 等. 城市热岛对上海夏季高温热浪的影响[J]. 高原气象, 2008, 27(S): 144-149.
- [14] 陈敏, 耿福海, 马雷鸣, 等. 近 138 年上海地区高温热浪事件分析[J]. 高原气象, 2013, 32(2): 597-607.
- [15] 张志薇, 王式功, 尚可政. 等. 华中地区近 50 年高温事件及大气环流成因分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, 47(2): 50-55.