三峡地区资源环境生态研究

DOI:10.11721/cqnuj20250404

基于相对阈值法的重庆市高温热浪时空变化规律研究*

周琨鸿[1]，王跃峰[1,2,3]，尹思危[1]，刘　帆[1]，杨　琴[4]
(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院，重庆 401331；2. 三峡库区地表过程与生态修复重庆市重点实验室，重庆 401331；
3. 三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站，重庆 401331；
4. 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室，重庆 401147)

摘要:有效识别高温热浪,对认识及应对极端天气具有重要意义。基于 1961—2022 年重庆市 33 个气象站的资料,采用日最高气温阈值识别高温热浪,结合热浪指数、最高温度等指标,全面分析重庆市高温热浪的时空变化,并剖析其中典型高温热浪的发生过程。结果显示:1) 重庆市高温热浪的年平均热浪指数为 2.2～7.5,年平均最高温度为 36.3～41.3 ℃,二者均呈“西部和东北部高、东南部低”的分布格局;高温热浪的年平均开始日期为 7 月 12 日—8 月 12 日,年平均结束日期为 8 月 2 日—8 月 19 日,年平均持续时间为 4.9～7 d,总体表现出中、西部晚于东南部的格局。2) 在 1961—2022 年,重庆市高温热浪的数量总体呈增加趋势、热浪指数和最高温度总体呈上升趋势,在 1990 年代后这种增加(或上升)趋势尤为明显;高温热浪的开始日期与结束日期均有所延后,单次高温热浪的持续时间由 4～5 d 增加至 6～8 d。3) 2022 年重庆市发生的典型高温热浪的平均热浪指数为 36.1,平均最高温度为 42.5 ℃,平均持续时间为 21 d 且集中于 8 月中旬。研究结果揭示了重庆市高温热浪的时空变化规律,为重庆市今后的高温热浪灾害防治工作提供了参考资料。

关键词:高温热浪;相对阈值法;时空变化;重庆市
中图分类号:P467;X43　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-6693(2025)04-0070-13

2021 年联合国政府间气候变化专门委员会发布的报告指出,2011—2020 年全球地表面平均温度比 1850—1900 年上升了 1.1 ℃[1]。《中国气候变化蓝皮书 2021》则指出,1951—2021 年中国地表温度每 10 a 的上升幅度为 0.26 ℃,而同期全球地表温度每 10 a 的上升幅度平均值仅为 0.15 ℃,因此中国属于气候变化敏感区[2]。目前,全球各地高温热浪发生的强度和频率有所增加,持续时间也有所延长;这对经济和社会发展造成了严重阻碍,对人们的生命和财产安全构成了极大的威胁[3-7]。据世界气象组织(world meteorological organization,WMO)统计,在众多天气灾害中,高温热浪引发的死亡率最高,2000—2019 年,全球平均每年因高温热浪而死亡的人数高达 48.9 万人[8]。据有关研究预测,到 2100 年,全球将有近 50%的人口面临高温热浪的威胁[9-10]。

当前,学者们已对高温热浪开展了广泛的研究,取得了丰硕的成果。就高温热浪的界定方法来看,大体可分为绝对阈值法与相对阈值法[11-19]。在采用绝对阈值法时,因全球各地自然环境特征与防灾预警能力不同,不同国家或组织对高温热浪的界定也存在差异,例如:WMO 将日最高气温高于 32 ℃且持续 3 d 以上定义为 1 次高温热浪[20];美国、加拿大利用显温来定义高温热浪[21];德国基于人体热量平衡模型,采用人体生理等效温度来界定高温热浪[22];中国将日最高气温大于 35 ℃且持续 3 d 及以上确立为高温热浪。有学者指出,阈值不同可能会造成高温热浪“偏大”或“偏小”,难以进行区域平衡,尤其在面积较大的国家或地区,采用某一固定阈值来界定高温热浪不够严谨[23]。与此同时,一些学者也开始采用相对阈值法来定义高温热浪。刘钊等人[17]将单站在 5—10 月间日最高气温的 92.5%分位数设置为高温热浪的阈值,Anderson 等人[6]将高温热浪定义为至少连续 2 日的日平均温度高于夏季日均温度的 95%分位数,Ragatoa 等人[18]则采用日最低、日均以及日最高气温等多气温序列的 90%分位数定义高温热浪。与绝对阈值法相比,上述这些研究虽然能从当地气候条件出发,识别出的高温热浪也更贴近实际,但是由于气温条件的年内和年际差异,因此得出的高温热浪相对阈值仍存在一定局限性。为此,Russo[19]提出了基于滑动窗口的相对阈值法,该方法建立了相对阈值与每日温度的紧密联系,能更加准确地识别高温热浪。此外,Lyon 等人[24]也指出,在样本序列(如日最高气温、日平均气温、日最低气温)的选取方

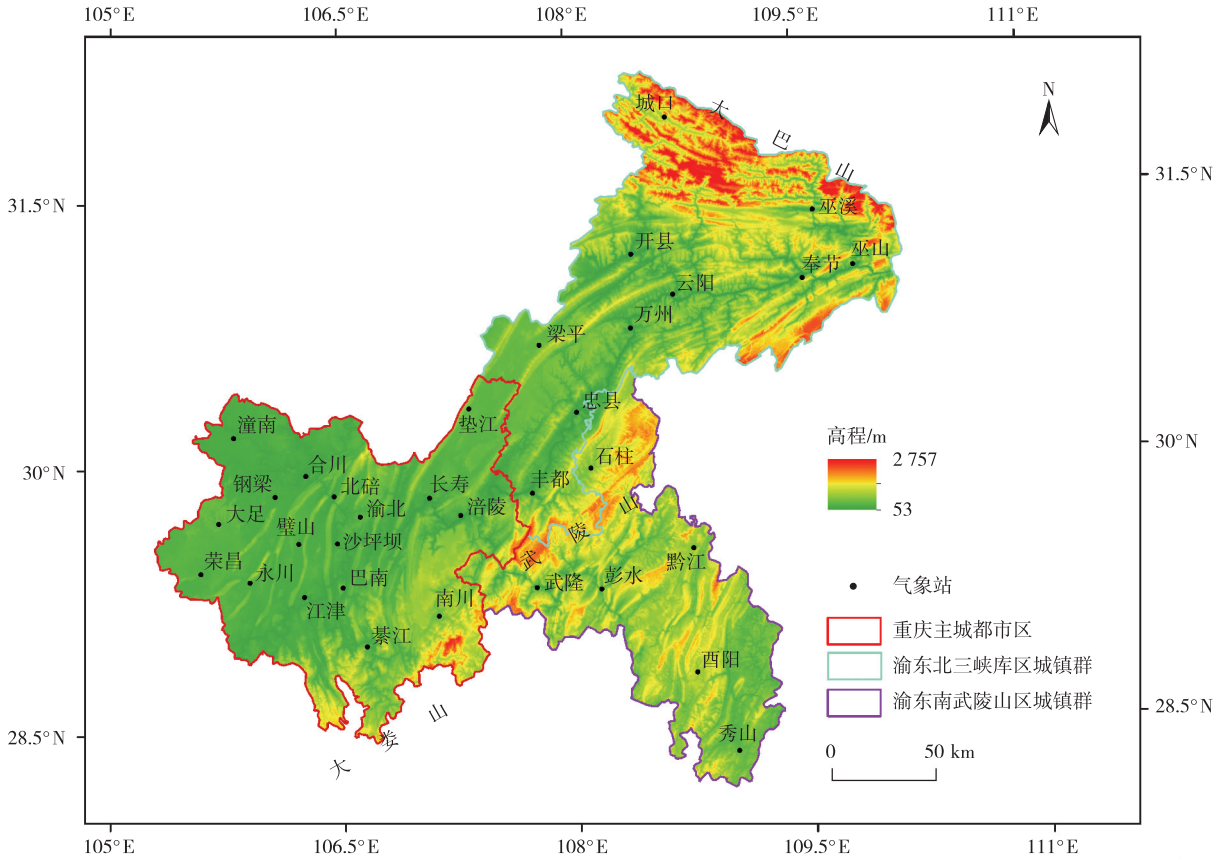
* **收稿日期**:2025-01-08　**修回日期**:2025-03-26　**网络出版时间**:2025-05-16T11:47
资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 42201045);重庆市教育委员会科学技术研究计划重点项目(No. KJZD-K202400501)
第一作者简介:周琨鸿,男,研究方向为极端天气灾害,E-mail:15310553601@163.com;**通讯作者简介**:王跃峰,男,副教授,博士,E-mail:wyf2046@163.com
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20250507.1635.015

面，使用日最高气温识别的高温热浪频率高、持续时间长，更能捕捉极端天气过程。

重庆市地处中国西南部，多岭谷地形，夏季气温易升难降，素有“火炉”之称。围绕重庆市的高温天气变化，学者们开展了卓有成效的研究。张天宇等人[25]分析了 1961—2006 年重庆市高温天气的发生频次和强度。郭渠等人[26]发现重庆高温日数具有明显年代际分布，即 1970 年代最多和 1980 年代最少。程炳岩等人[27]分析了高温日数的空间分布，指出长江和乌江的沿江区域为重庆市高温多发地带。杨溟鋆等人[28]统计分析了重庆市高温热浪的发生频次、持续日数等指标，发现当地高温热浪发生频次在 1997 年明显增加。然而总体上看，上述研究的时间阶段多集中于 2015 年之前并均采用 35 ℃的绝对阈值定义高温热浪，且多从高温次数和日数角度进行分析而较少涉及高温热浪发展过程，因此不利于深入认识重庆市极端高温天气变化，对当地防灾减灾政策制定的帮助也较为有限。重庆市地形条件复杂、气温变化的空间异质性高，加上全球气候变化和当地城市化过程的影响，因而当地长序列的高温热浪变化则更加趋于复杂。基于上述背景，本研究利用长序列的日尺度最高气温数据，采用相对阈值法识别高温热浪，提取热浪指数、最高温度、开始日期、持续时间、结束日期等关键指标，系统地揭示 1961—2022 年重庆市高温热浪的时空变化规律，以期为重庆市今后的高温热浪灾害防治工作提供参考。

1　研究区概况

重庆市位于四川盆地东南部，面积约 82 400 km^2；地形以山地、丘陵为主，山地面积约占全市总面积的 76%；地势东高西低，东北雄踞着大巴山与巫山，南部斜贯着大娄山与武陵山，中部以平行岭谷为主（图 1）。重庆市气候为亚热带湿润季风气候，雨热同期，年平均气温为 16～18 ℃，年降水量为 1 000～1 400 mm。受地形影响，重庆夏季湿度大、温度易升难降，极端高温灾害频发。2006 年 8 月，高温热浪灾害造成重庆市直接经济损失高达 66.89 亿元；2022 年 7—8 月，重庆市全境发生异常高温，平均气温、高温天数、高温强度等多项指标创 1961 年有完整气象纪录以来的同期极值，有 16 个区（县、自治县）的最高气温创造了当地历史极值，受灾人数达 88.1 万人，造成直接经济损失达 39.63 亿元。



注：底图来源于自然资源部标准地图服务（http://bzdt.ch.mnr.gov.cn），审图号：GS(2024)0650 号，下同。

图 1　重庆市气象站分布

Fig. 1　The distribution of meteorological stations in Chongqing Municipality

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

本研究收集了1961—2022年在现今重庆市范围内33个国家地面气象观测站的逐日气温资料,数据源自国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn),各站的海拔和极端最高气温多年平均值见表1,其中丰都站和酉阳站的极端最高气温多年平均值分别为最高值和最低值。为了确保数据的连续性与可靠性,本研究对存在少量缺测数据的站点如万州站、长寿站、涪陵站、武隆站等进行了数据插补,即首先将目标站点与邻近站点同期数据建立线性关系模型,然后外推至缺失时段以填补数据。此外,由于天城站与万盛站缺失数据较多,本研究予以剔除不纳入数据来源。

表1 重庆市国家地面气象站的海拔和极端最高气温的多年平均值

Tab.1 Elevation and annual average of extreme maximum temperature at each national surface meteorological station in Chongqing Municipality

站点名称	区站号	海拔/m	极端最高气温多年平均值/℃	站点名称	区站号	海拔/m	极端最高气温多年平均值/℃
城口	57333	798.2	36.9	合川	57512	364.5	39.0
开县	57338	216.5	40.2	渝北	57513	464.7	37.9
云阳	57339	297.2	40.3	璧山	57514	331.5	39.1
巫溪	57345	337.8	39.4	沙坪坝	57516	259.1	39.6
奉节	57348	299.8	38.3	江津	57517	261.4	40.1
巫山	57349	606.8	39.8	巴南	57518	506.1	39.7
潼南	57409	297.7	38.3	南川	57520	698.8	37.6
垫江	57425	433.8	38.3	长寿	57520	377.6	38.6
梁平	57426	454.5	37.8	涪陵	57522	372.8	39.7
万州	57432	186.7	39.9	丰都	57522	290.5	40.5
忠县	57437	325.6	39.7	武隆	57525	406.9	38.8
石柱	57438	632.3	37.6	黔江	57536	786.9	36.5
大足	57502	394.7	37.8	彭水	57537	322.2	39.6
荣昌	57505	338.0	38.1	綦江	57612	474.7	40.2
永川	57506	353.0	38.5	酉阳	57633	826.5	35.2
铜梁	57510	326.3	38.9	秀山	57635	548.7	37.3
北碚	57511	240.8	39.8				

2.2 研究方法

2.2.1 高温热浪识别

受复杂地形影响,山地城市气温变化的空间异质性较强,基于传统绝对阈值的方法难以准确识别高温热浪过程[25-28],此外,1961—2022年重庆各站极端最高气温的多年平均值为35.2～40.5 ℃,均高于已有研究采用的35 ℃绝对阈值,如仍以此对重庆市的高温热浪进行识别显然不够客观。因此,本研究采用基于滑动窗口的相对阈值法,通过计算日相对阈值,建立了逐日的相对阈值序列,结合时间连续性更加精确地识别高温热浪。相较于单一阈值的相对阈值法,本研究所用方法更能反映日尺度气温变化的异常。具体而言,该方法先确定数据参考期,然后基于参考期内以当日为中心前后15 d的气温数据组成1个数据集,再提取该数据集的90%分位数为当日的相对阈值,进而识别出当年最强的高温热浪[19]。

在本研究中,1次高温热浪需同时满足日最高温度大于日相对阈值和持续时间不低于3 d这2个条件,即:

$$H=\alpha\cap\beta,\alpha=T_{\max}>T_y,\beta=d_m-d_n\geqslant 3,$$

其中：H 表示 1 次高温热浪事件，α 表示日最高温度大于日相对阈值的事件集合，β 表示连续 3 d 及以上日最高温度大于日相对阈值的事件集合，$T_{\max}$ 表示日最高气温，T_y 表示日相对阈值，d_n 表示连续日最高温度大于日相对阈值的第 1 日，d_m 表示连续日最高温度大于日相对阈值的最后 1 日（图 2）。

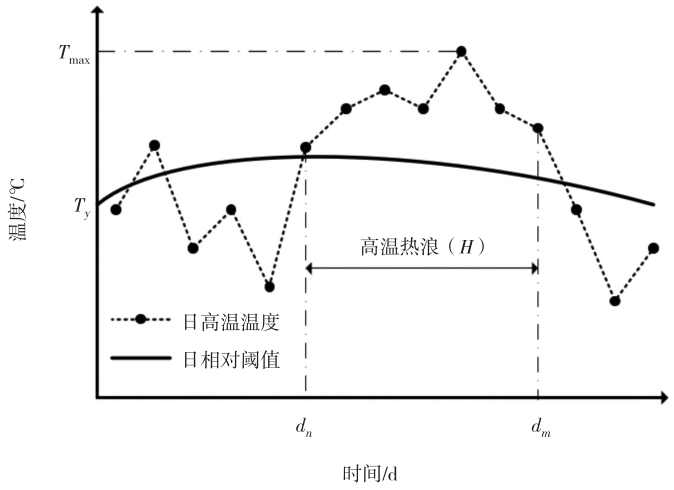


图 2　高温热浪示意图

Fig. 2　The schematic diagram of the heat wave

本研究将日相对阈值定义为基于 1981—2010 年这一参考期内每年以第 d 日（不包括闰年的 2 月 29 日）为中心的 31 d 时间窗口中每日最高温度序列组成的数据集 A_d 的 90%分位数，而 A_d 可由下式表示：

$$A_d = \bigcup_{y=1}^{30} \bigcup_{i=d-15}^{d+15} T_{y,i},$$

其中：$T_{y,i}$ 为第 y 年第 i 日的日最高气温。

在过去的研究中，学者们多从高温热浪的强度和持续性这 2 个方面进行分析[3,6]；在本研究中，高温热浪的强度通过热浪指数和最高温度来衡量，而持续性则从高温热浪的开始日期、持续时间、结束日期等方面来分析。

2.2.2　热浪指数计算

热浪指数是结合高温热浪中最高温度来综合量化高温热浪强度的指数，1 次高温热浪的热浪指数由该高温热浪期间的日热浪指数累积得到。日热浪指数（H_D）基于日最高气温以及参考期（本研究中为 1981—2010 年）内年最高气温数据组成序列的 25%分位数（$T_{25\%}$）和 75%分位数（$T_{75\%}$）计算得出，它的具体计算公式如下：

$$H_D(T_x) = \begin{cases} \dfrac{(T_x - T_{25\%})}{(T_{75\%} - T_{25\%})}, & \text{若 } T_x > T_{25\%}; \\ 0, & \text{若 } T_x \leqslant T_{25\%}。 \end{cases}$$

其中：T_x 为高温热浪期间第 x 日的最高温度。

3　结果与分析

3.1　高温热浪的空间分布分析

图 3 显示：1961—2022 年间石柱的高温热浪年份数量超过了 40 个，列于重庆市各区（县、自治县）高温热浪年份数量之首；高温热浪年份数量较少（＜30 个）的区（县、自治县）仅有 4 个，其中高温热浪年份数量最少的 2 个集中分布于重庆市东南部；其余区（县、自治县）的高温热浪年份数量都在 30～40 个之间。从 1961—2022 年重庆市高温热浪的年平均热浪指数空间分布（图 4a）来看，有 2 个年平均热浪指数高值中心分别分布在西部和东北部，而东南部年平均热浪指数最低；西部的年平均热浪指数为 5.2，最大值（7.1）出现在潼南，最小值（2.7）出现在綦江，其余区（县、自治县）的年平均热浪指数为 3～6.9；东北部的年平均热浪指数为 4，最大值（7.5）出现在奉节，最小值（2.4）出现在城口；东南部的年平均热浪指数为 2.9，最大值（4.0）出现在石柱，最小值（2.2）出现在酉阳。从同期重庆市高温热浪的年平均最高温度空间分布（图 4b）来看，全市整体的年平均最高温度为 39.6 ℃；年平均最高温度高值区分布在西部、中部和东北部地区，最大值（41.3 ℃）出现在丰都；年平均最高温度低值区主要位于东北部的城口（37.4 ℃）和东南部的酉阳（36.4 ℃）。值得注意的是，上述 2 个指标在空间上的分布并不完

全一致,例如:万州和云阳的年平均最高温度均超过了 40 ℃,但年平均热浪指数仅分别为 3.1 和 3.2;奉节、潼南、大足、永川等区(县)的年平均热浪指数均超过了 6.7,但年平均最高温度则相对不高,均小于 39.5 ℃。出现这种现象的原因可能与有关区(县)的地理位置和下垫面状况不同有关。

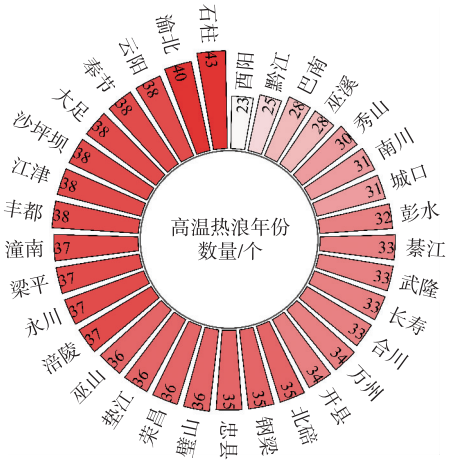
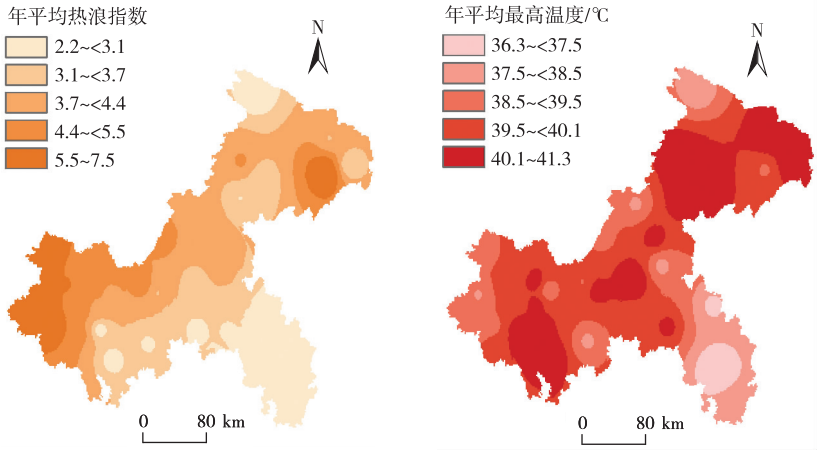


图 3　1961—2022 年重庆市各气象站高温热浪年份数量统计

Fig. 3　Statistics of the number of heat wave years in meteorological stations in Chongqing Municipality from 1961 to 2022

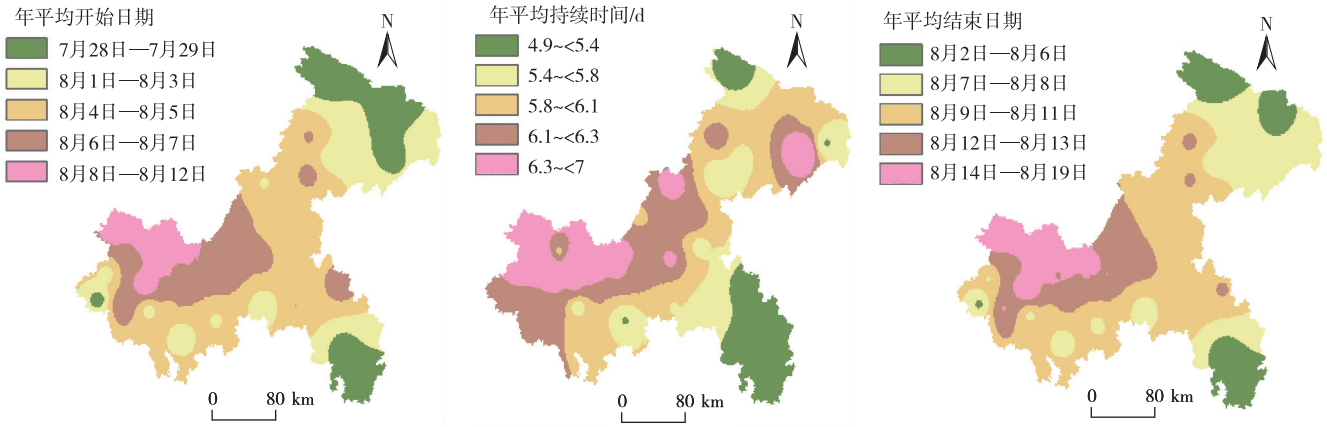


a　年平均热浪指数　　b　年平均最高温度

图 4　1961—2022 年重庆市高温热浪年平均热浪指数与年平均最高温度的空间分布

Fig. 4　The spatial distribution of annual average heat wave magnitude index and annual average maximum temperature during heat waves in Chongqing Municipality from 1961 to 2022

图 5 显示了 1961—2022 年重庆市高温热浪的年平均开始日期、年平均持续时间和年平均结束日期的空间分布。从高温热浪的年平均开始日期(图 5a)来看,整体表现为高温热浪在东北部和东南部出现早、在中部和西部出现晚。城口、秀山、巫溪和奉节的高温热浪开始日期在 7 月末,其余区(县、自治县)的高温热浪都出现在 8 月。北碚、合川和璧山这 3 个区高温热浪年平均开始日期最晚,均为 8 月 12 日。从高温热浪的年平均持续时间(图 5b)来看,中西部高温热浪的年平均持续时间明显长于东北部和东南部。铜梁、潼南、大足等 7 个区(县)高温热浪的年平均持续时间都达到了 7 d。酉阳高温热浪的年平均持续时间最短,不足 5 d。从高温热浪的年平均结束日期(图 5c)来看,它空间分布与年平均开始日期相似。东北部的城口、巫溪和东南部的秀山、酉阳高温热浪一般在 8 月上旬结束,西部的北碚、合川、璧山、潼南等区(县)高温热浪的年平均结束日期多晚于 8 月 15 日,其中北碚的这一日期最晚,为 8 月 19 日。



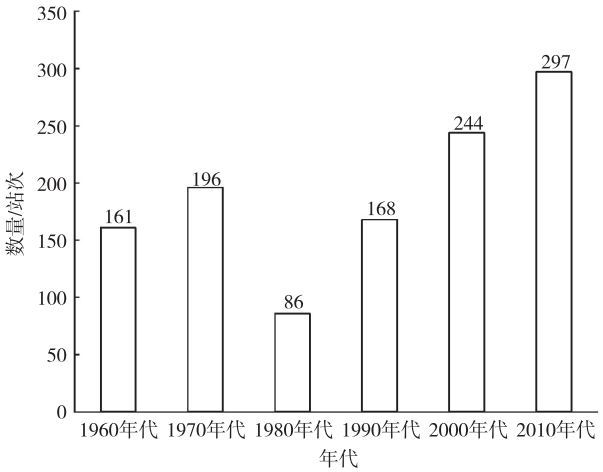
a　年平均开始日期　　b　年平均持续时间　　c　年平均结束日期

图 5　1961—2022 年重庆市高温热浪的年平均开始日期、年平均持续时间与年平均结束日期的空间分布

Fig. 5　The spatial distribution of annual average start time, annual average duration, and annual average end time during heat waves in Chongqing Municipality from 1961 to 2022

3.2　高温热浪的时间变化分析

图 6 显示，1961—2022 年重庆市高温热浪的数量总体呈快速增加趋势。除 1980 年代（1981—1990 年）高温热浪的数量相对较少仅有 8.6 站次·a^{-1} 以外，其余各年代的高温热浪数量均超过了 16 站次·a^{-1}。在 1960 年代（1961—1970 年），全市范围内仅巫溪没有发生过高温热浪；1980 年代的高温热浪数量最低，大足在此期间无高温热浪发生；高温热浪数量在 1990 年代（1991—2000 年）后呈逐步上升趋势，其中东北部的奉节、中部的长寿、重庆市中心城区的沙坪坝以及西部的江津在 2010 年后每年都发生了高温热浪。

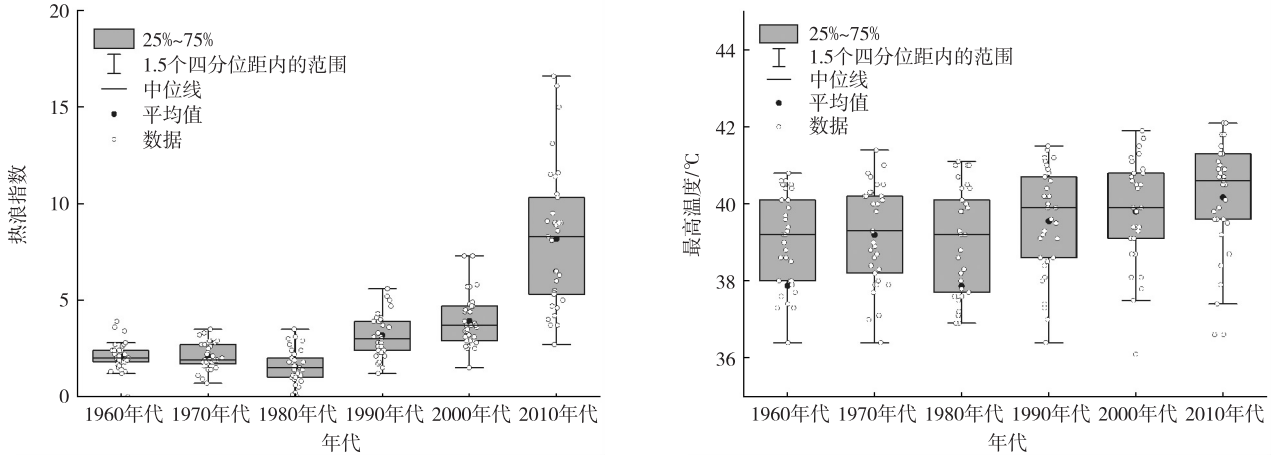


注：本研究中 1960、1970、1980、1990、2000 和 2010 年代分别为 1961—1970 年、1971—1980 年、1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年和 2011—2022 年，下同。

图 6　1961—2022 年重庆市高温热浪数量的年代际变化

Fig. 6　Decadal changes in the number of heat waves in Chongqing Municipality

图 7 对 1961—2022 年重庆市高温热浪的热浪指数和最高温度进行了统计，二者在总体变化趋势方面与图 6 类似。从各年代平均热浪指数的变化趋势（图 7a）来看，1980 年代之前该指数相对较低，1990 年代之后该指数迅速升高，2010 年代（2011—2022 年）的平均热浪指数最高（8.2），这与该时期高温热浪频发的实际状况相吻合。从各年代平均最高温度变化趋势（图 7b）来看，1990 年代前的各年代平均最高温度普遍低于 39.2 ℃，1990 年代后该指标数值逐步上升；2010 年代的平均最高温度达 40.1 ℃，较 1980 年代上升了 1.1 ℃，每 10 a 的上升幅度为 0.37 ℃。



a　热浪指数变化　　**b　最高温度变化**

图 7　1961—2022 年重庆市平均热浪指数与平均最高温度的年代际变化

Fig. 7　Decadal changes of average heat wave magnitude index and average maximum temperature in Chongqing Municipality from 1961 to 2022

图8显示了1961—2022年重庆市高温热浪过程。从开始日期看,1960年代与1980年代的高温热浪均始于7月,而1990年代后的高温热浪则多始于8月并具有提前的趋势。在1980年代,城口、万州以及江津的高温热浪开始于6月。1990年代高温热浪发生时间最晚,平均开始日期为8月16日,较1980年代有较大的延后;其中城口高温热浪开始日期最晚(8月25日)而南川高温热浪开始日期最早(8月2日)。2000年代(2001—2010年)的高温热浪平均开始日期为8月3日,其中璧山高温热浪开始日期最晚(8月22日)而巫溪高温热浪开始日期最早(7月16日)。2010年代高温热浪平均开始日期与2000年代相同,其中巫溪高温热浪开始日期最早(7月25日)而巴南高温热浪开始日期最晚(8月12日)。高温热浪持续时间在1961—2022年有明显延长趋势。1960年代与1970年代(1971—1980年)高温热浪持续时间的全市平均值为5 d,其中铜梁高温热浪持续时间最长(8 d)而黔江高温热浪持续时间最短(3 d)。1980年代高温热浪持续时间的全市平均值降到4 d,其中巫溪高温热浪持续时间最长(7 d)而潼南、永川等地高温热浪持续时间最短(3 d);1990年代与2000年代高温热浪持续时间的全市平均值升至6 d,其中酉阳高温热浪持续时间最短(3 d)而忠县、垫江、丰都等地高温热浪持续时间最长(7 d);2010年代后高温热浪持续时间的全市平均值则达到8 d,其中巴南高温热浪持续时间最长(13 d)而城口高温热浪持续时间最短(5 d)。

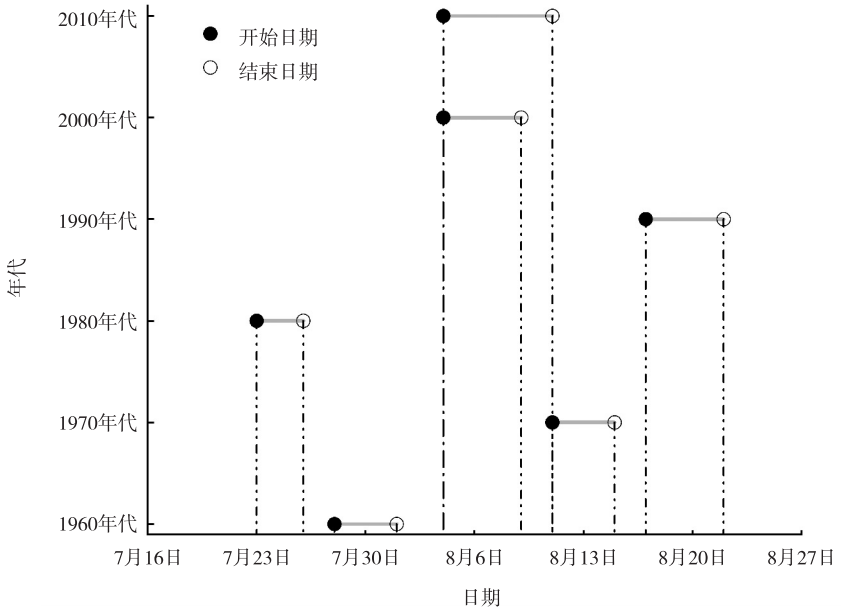


图8 1961—2022年重庆市高温热浪过程

Fig. 8 The process of heat waves in Chongqing Municipality from 1961 to 2022

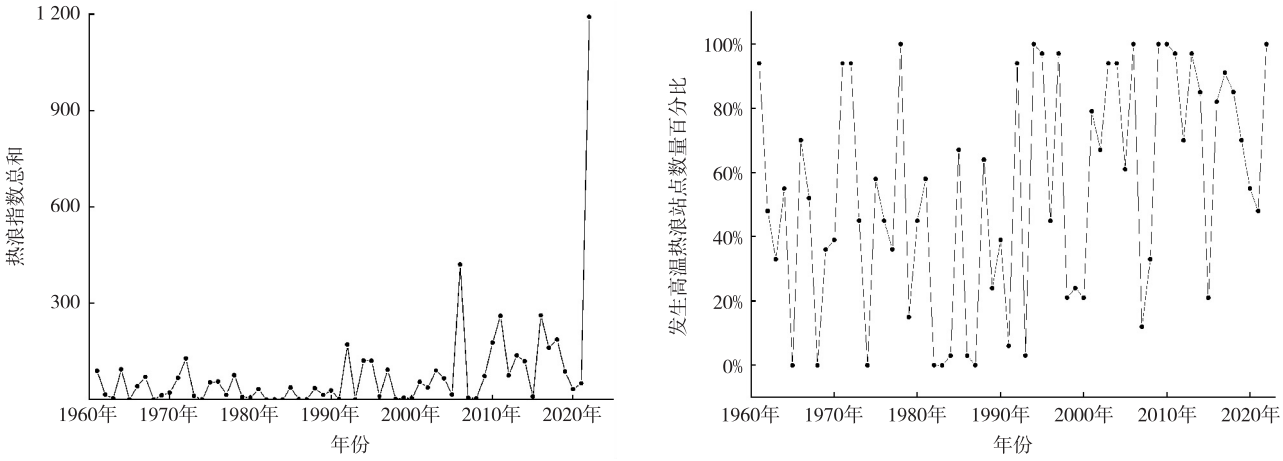
3.3 典型高温热浪特征分析

2022年夏季,重庆市遭遇了严重的极端高温天气;这一极端天气状况持续时间长、影响范围广,在历史上相当罕见[29]。有研究表明此次剧烈的高温天气过程主要分为2段,且均在大陆高压与副热带高压控制下形成[30]。除受大尺度环流影响外,复杂的岭谷地形造成当地气温易升难降、高温迅速蔓延,也加剧了这一天气灾害的形成[31]。对1961—2022年的热浪指数总和与发生高温热浪的站点数量百分比进行统计后发现,2022年的热浪指数总和为1 192.3,为历年最高,33个气象站在同一阶段发生了高温热浪(图9)。因此,本研究以2022年重庆市发生的高温热浪为典型进行深入剖析。

图10显示了2022年重庆市高温热浪的热浪指数与最高温度的空间分布状况。从热浪指数来看,重庆市范围内平均热浪指数为36.1;热浪指数高值区主要分布在西部(平均值为58.9),最大值(94.2)出现在大足;东北部平均热浪指数为25.1,以最大值(60.9)所在的奉节为中心形成1个高值区;东南部平均热浪指数为15.4,最大值(43.0)出现在石柱。热浪指数低值区以东南部与东北部为主,包括东南部的黔江(4.5)、东北部的城口(3.6)等。从最高温度来看,重庆市范围内平均最高温度为42.5 ℃。最高温度高值区包括西部的潼南(45 ℃)、铜梁(45 ℃)、重庆市中心城区的北碚(45 ℃)以及东部的奉节(44.4 ℃);最高温度低值区包括东南部的酉阳(36.7 ℃)、黔江(37.1 ℃)、秀山(38.3 ℃)以及东北部的城口(38 ℃),除上述4个区(自治县)以外,其余区(县、自治县)的最

高温度均超过了 40 ℃。就 2022 年重庆市大范围的高温热浪而言，各区（县、自治县）的热浪指数与最高温度值均超过了历史平均水平。

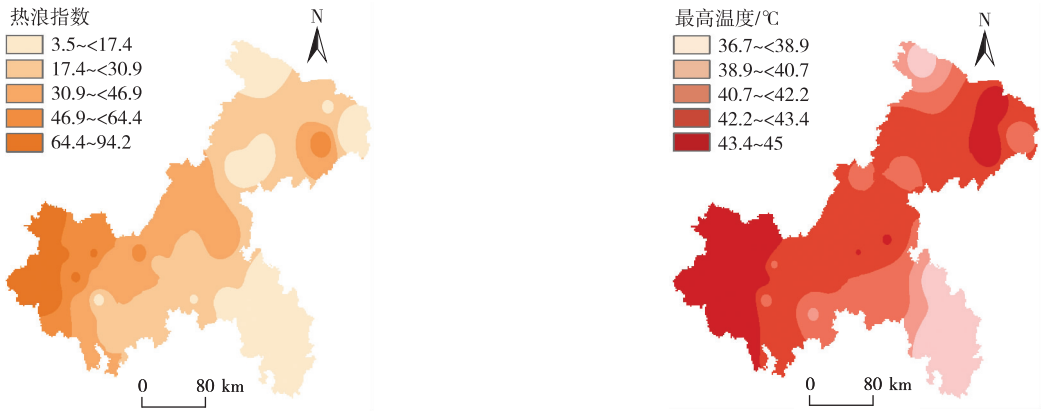
为进一步揭示 2022 年重庆市高温热浪的发展过程，对 33 个站点的有关数据进行了统计（图 11）。总体来看，此次高温热浪覆盖了重庆市全境，平均持续时间达到了 21 d。从开始日期来看，高温热浪最先出现在西部的潼南、大足，中部的长寿以及东北部的奉节（7 月 29 日）；高温热浪最晚出现在东北部的万州（8 月 20 日）。从持续时间方面看，西部高温热浪持续时间的平均值为 25.3 d，明显长于东南部的 16.3 d 与东北部的 17 d；奉节、潼南、大足、北碚以及长寿的高温热浪持续时间最长，均达到了 31 d；城口、万州和秀山高温热浪持续时间最短，仅为 6 d。从结束日期来看，此次大范围的高温热浪最早结束于东北部的巫山与巫溪（8 月 16 日），最晚结束于南川（8 月 31 日）；33 个站点中有 20 个站点记录到的高温热浪结束日期一致，为 8 月 29 日。



a　热浪指数总和　　b　发生高温热浪站点数量百分比

图 9　1961—2022 年重庆市逐年热浪指数总和变化以及发生高温热浪的站点数量百分比

Fig. 9　The sum of annual heatwave magnitude index changes, and the percentage of meteorological stations experiencing heatwaves in Chongqing Municipality from 1961 to 2022



a　热浪指数　　b　最高温度

图 10　2022 年重庆市高温热浪的热浪指数与最高温度空间分布

Fig. 10　The spatial distribution of heat wave magnitude index and maximum temperature of the heat waves in Chongqing Municipality in 2022

4　讨论

本研究基于 1961—2022 年重庆市 33 个气象站的资料，通过热浪指数量化高温热浪强度，并结合最高温度、开始日期、持续时间、结束日期等指标分析了在此期间重庆市高温热浪的演变特征。与已有研究不同的是，本研究采用相对阈值法从时间和空间这 2 个维度揭示了重庆市在上述 60 余年内的高温热浪变化。

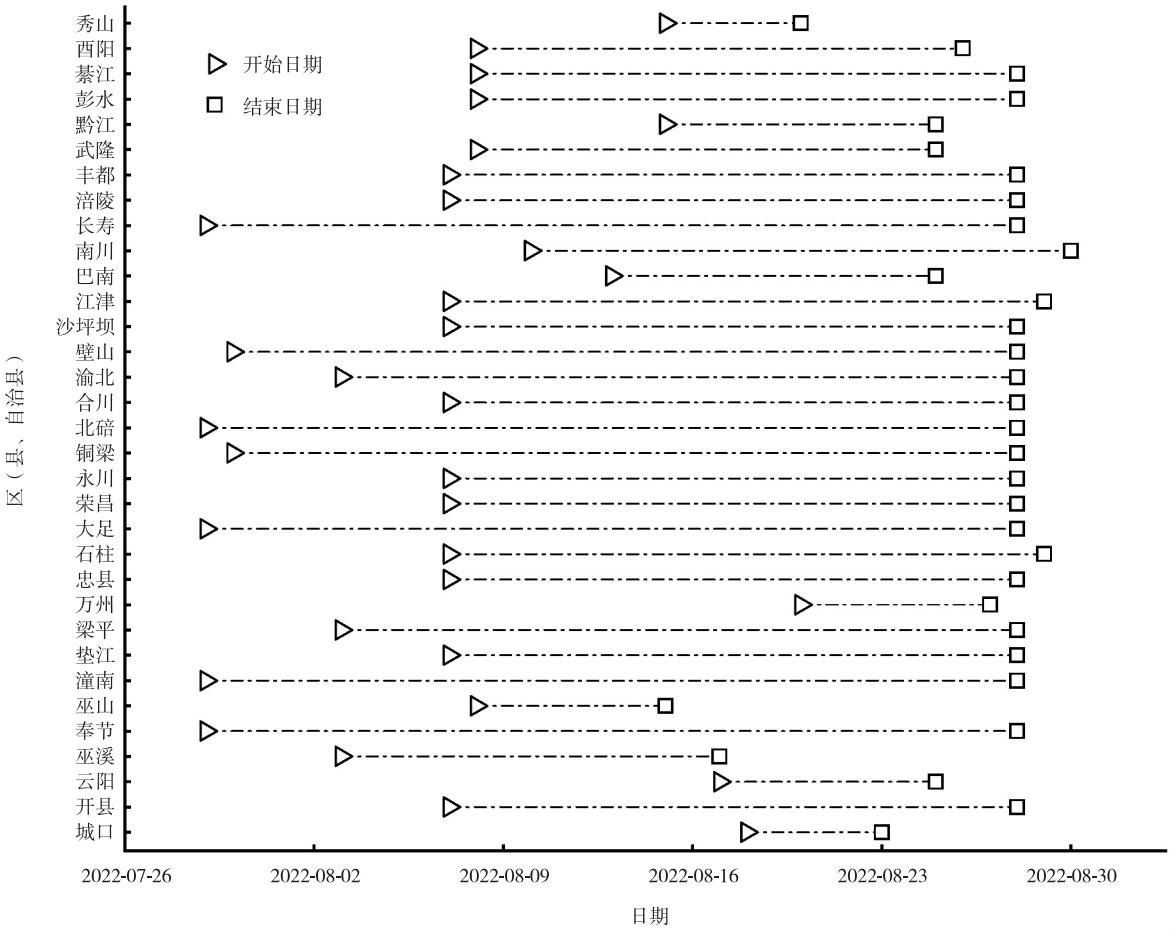


图 11 2022年重庆市高温热浪发展过程

Fig. 11 The development of heat waves in Chongqing Municipality in 2022

从空间上看,西部高温热浪的热浪指数、最高温度及持续时间都明显高于其他地区,这主要与当地地形地貌有关。重庆市地势呈东北部、东南部高而西部低,西部海拔多低于400 m。表2显示各气象站所在区(县、自治县)的高温热浪指标与该站点海拔的相关系数均为负,其中热浪指数、开始日期、持续时间和结束日期与海拔的相关性在 $p<0.01$ 水平上均有统计学意义。这表明随着海拔升高,高温热浪的强度会降低,且开始日期和结束日期会偏早[32]。同时,西部纵向岭谷地貌发育,严重制约了槽谷区的热量交换,导致当地夏季降温能力远不及山岭区,且槽谷平均地表温度全年高于山岭地表温度,更易发生高温热浪[33]。与西部相比,东南部的高温热浪数量偏少、强度偏低且持续时间短。这主要与东南部海拔较高有关,同时当地位于大娄山和武陵山交汇地带,较高的森林覆盖率对气候的调节作用也相对更强,可在一定程度上控制高温热浪强度[34]。此外,本研究还发现重庆市部分地区的热浪指数与最高温度变化不一致的现象,如潼南、大足等区(县)的热浪指数较高,但最高温度均低于全市平均最高温度(39.6 ℃)。这表明城市化发展对高温热浪的促进主要表现在提升平均温度、最低温度、日较差等方面,而对瞬时极端最高温度的提升作用相对有限[35-36]。

表 2 海拔、经度和纬度分别与热浪指数、最高温度、持续时间、开始日期、持续时间和结束日期的相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis of altitude, longitude, latitude and heat wave magnitude index, maximum temperature, duration, start date, duration, and end time, respectively

参数	热浪指数	最高温度	开始日期	持续时间	结束日期
海拔	−0.48**	−0.16	−0.62**	−0.50**	−0.64**
经度	0.08	0.22	−0.14	0.12	−0.11
纬度	−0.52**	−0.06	−0.49**	−0.50**	−0.52**

注:"*""**"分别表示相关性分析结果在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平上具有统计学意义。

从时间上看，1961—2022 年重庆市高温热浪数量、强度和持续性整体呈上升趋势且有明显的阶段性，先后经历了 1960 年代和 1970 年代的偏高、1980 年代的偏低以及 1990 年代后的快速上升这 3 个阶段，这一结果与过去研究中重庆市年均气温的年代际变化相一致[37-38]。除 1980 年代外，其余阶段高温热浪变化总体上也与全球气温变化相一致，而 1980 年代的气温偏低主要是因为这一时期较强的 ENSO 事件频发，导致西太平洋副高环流系统异常，致使中国西南地区多云雨天气，进而削弱了太阳辐射[39-41]。1990 年代后高温热浪频次明显上升、强度明显增强，这主要是因为这一时期夏季南亚高压与副高叠加削弱了经向环流，使得冷空气南下受阻，加剧了夏季高温热浪的形成[26]。还有研究发现，城市化过程对城市本身具有增温效应，每 10 a 的升温幅度达到 0.21 ℃[42]，重庆市自 1990 年代后期城市化进程加快，城市建成区面积由刚成为直辖市时的 282.51 km^2 增加至 2022 年的 1 640.8 km^2，这在一定程度上提高了高温热浪强度[43]。

5　结束语

本研究分析了 1961—2022 年重庆市高温热浪的时空演变特征和 2022 年重庆市出现的典型高温热浪，得到以下主要结果：

1）从空间分布来看，重庆市高温热浪的年平均热浪指数为 2.2～7.5，年平均最高温度为 36.3～41.3 ℃，二者均呈“西部和东北部高、东南部低”的分布格局；高温热浪的年平均开始日期为 7 月 12 日—8 月 12 日，年平均结束日期为 8 月 2 日—8 月 19 日，年平均持续时间为 4.9～7 d，总体表现出中、西部晚于东南部的格局。

2）从时间变化来看，在 1961—2022 年的 60 余年间，重庆市高温热浪的数量总体呈增加趋势、热浪指数和最高温度总体呈上升趋势，在 1990 年代后这种增加（或上升）趋势尤为明显；高温热浪的开始日期与结束日期均有所延后，由 7 月下旬推迟到 8 月中上旬，单次高温热浪的持续时间由 4～5 d 增加至 6～8 d。

3）2022 年的高温热浪覆盖了重庆市全境，平均热浪指数为 36.1，平均最高温度为 42.5 ℃，均突破历史纪录。此次大范围的高温热浪最先出现在 7 月 29 日的奉节、潼南、大足、北碚和长寿，最晚结束于 8 月 31 日的南川；此次高温热浪的平均持续时间达到 21 d，为历史最高。

综合来看，本研究基于相对阈值法，从强度和持续性这 2 个方面揭示了典型山地城市的高温热浪时空变化，虽然较已有研究而言有一定改进，但研究结果仍存在一些不确定性。首先，本研究中个别站点的缺测数据通过线性插补方法获取，由此引起的误差可能会对结果造成影响；其次，本研究中的高温热浪过程主要基于日最高气温来量化，而仅用气温这一指标来衡量上述过程对于理解极端高温天气是有限的。因此，在后续研究中还可引入日最低气温、湿度等气象指标来综合界定热浪过程[44]。此外，在全球变暖和快速城市化背景下，今后还可从“自然-人为”耦合的角度来探究高温热浪的潜在危害性，从而为山地城市应对极端灾害天气和防灾减灾奠定理论基础。

参考文献：

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2021: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 4-31.

[2] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书 2021[M]. 北京：科学出版社，2021.
Climate Change Center of China Meteorological Administration. Blue book on climate change in China 2021[M]. Beijing: Science Press, 2021.

[3] KEELLINGS D, MORADKHANI H. Spatiotemporal evolution of heat wave severity and coverage across the United States[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(9): e2020GL087097.

[4] SENEVIRATNE S I, DONAT M G, MUELLER B, et al. No pause in the increase of hot temperature extremes[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(3): 161-163.

[5] WANYAMA D, BUNTING E L, WEIL N, et al. Delineating and characterizing changes in heat wave events across the United States climate regions[J]. Climatic Change, 2023, 176(2): 6.

[6] ANDERSON G B, BELL M L. Heat waves in the United States: mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U. S. communities[J]. Environmental Health Perspectives, 2011, 119(2): 210-218.

[7] XU P Q, WANG L, HUANG P, et al. Disentangling dynamical and thermodynamical contributions to the record-breaking heatwave over Central Europe in June 2019[J]. Atmospheric Research, 2021, 252: 105446.

[8] 中国气象报社. WMO《2023年全球气候状况》报告速览[N]. 中国气象报,2024-03-26(4).
China Meteorological News Press. Report highlights of *state of the global climate 2023* by WMO[N]China Meteorological News,2024-03-26(4).

[9] JONES B,O'NEILL B C,MCDANIEL L,et al. Future population exposure to US heat extremes[J]. Nature Climate Change,2015,5(7):652-655.

[10] MORA C,DOUSSET B,CALDWELL I R,et al. Global risk of deadly heat[J]. Nature Climate Change,2017,7(7):501-506.

[11] CECCHERINI G,RUSSO S,AMEZTOY I,et al. Heat waves in Africa 1981—2015,observations and reanalysis[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2017,17(1):115-125.

[12] 张灵,郭广芬,熊开国,等. 长江流域2022年夏季高温过程的成因分析[J]. 地理科学进展,2023,42(5):971-981.
ZHANG L,GUO G F,XIONG K G,et al. Causes of the high temperature process in the Yangtze River Basin in 2022[J]. Progress in Geography,2023,42(5):971-981.

[13] SHAFIEI SHIVA J,CHANDLER D G,KUNKEL K E. Localized changes in heat wave properties across the United States[J]. Earth's Future,2019,7(3):300-319.

[14] 韦春竹,弯媛美,黄耿志,等. 中国沿海城市热浪时空特征与人口暴露研究[J]. 遥感技术与应用,2024,39(3):679-689.
WEI C Z,WAN Y M,HUANG G Z,et al. Spatial and temporal characteristics and population exposure of heat waves in China's coastal regions[J]. Remote Sensing Technology and Application,2024,39(3):679-689.

[15] YIN C,YANG Y P,CHEN X N,et al. Changes in global heat waves and its socioeconomic exposure in a warmer future[J]. Climate Risk Management,2022,38:100459.

[16] RUSSO S,DOSIO A,GRAVERSEN R G,et al. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2014,119(22):12.

[17] 刘钊,闫凯,王铸,等. 1961—2020年中国31个城市热浪强度时空特征分析[J]. 自然灾害学报,2021,30(4):1-9.
LIU Z,YAN K,WANG Z,et al. Analysis of spatial and temporal characteristics of heat wave intensity in 31 Chinese cities from 1961 to 2020[J]. Journal of Natural Disasters,2021,30(4):1-9.

[18] RAGATOA D S,OGUNJOBI K O,KLUTSE N A B,et al. A change comparison of heat wave aspects in climatic zones of Nigeria[J]. Environmental Earth Sciences,2019,78(4):111.

[19] RUSSO S,SILLMANN J,FISCHER E M. Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades [J]. Environmental Research Letters,2015,10(12):124003.

[20] 祁新华,程煜,李达谋,等. 西方高温热浪研究述评[J]. 生态学报,2016,36(9):2773-2778.
QI X H,CHENG Y,LI D M,et al. A review of western research on heat wave[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(9):2773-2778.

[21] SHERIDAN S C,LEE C C. Temporal trends in absolute and relative extreme temperature events across North America[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2018,123(21):11.

[22] KETTERER C,MATZARAKIS A. Mapping the Physiologically Equivalent Temperature in urban areas using artificial neural network[J]. Landscape and Urban Planning,2016,150:1-9.

[23] PERKINS S E. A review on the scientific understanding of heatwaves:their measurement,driving mechanisms,and changes at the global scale[J]. Atmospheric Research,2015,164/165:242-267.

[24] LYON B,BARNSTON A G. Diverse characteristics of U. S. summer heat waves[J]. Journal of Climate,2017,30(19):7827-7845.

[25] 张天宇,程炳岩,刘晓冉,等. 重庆极端高温的变化特征及其对区域性增暖的响应[J]. 气象,2008,34(2):69-76.
ZHANG T Y,CHENG B Y,LIU X R,et al. Variability of extreme high temperature and response to regional warming over Chongqing[J]. Meteorological Monthly,2008,34(2):69-76.

[26] 郭渠,孙卫国,程炳岩,等. 重庆近48年来高温天气气候特征及其环流形势[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(1):52-59.
GUO Q,SUN W G,CHENG B Y,et al. Analyses on climatic characteristics of high temperature and circulation situation in recent 48 years in Chongqing city[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2009,18(1):52-59.

[27] 程炳岩,孙卫国,郭渠. 重庆地区夏季高温的气候特征与环流形势分析[J]. 西南大学学报(自然科学版),2010,32(1):73-80.
CHENG B Y,SUN W G,GUO Q. Analyses of climatological features of the summer high temperature and circulation situation in Chongqing[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2010,32(1):73-80.

[28] 杨溟鋆,杜钦,王咏薇,等. 重庆市1959—2018年夏季高温热浪及湿度影响特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(10):2492-2501.

YANG M J，DU Q，WANG Y W，et al. Characteristic analysis of high temperature heat wave and humidity in Chongqing from 1959 to 2018 summer[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2021，30(10)：2492-2501.

[29] 彭京备，孙淑清，林大伟. 2022 年 8 月长江流域持续性极端高温事件成因[J]. 应用气象学报，2023，34(5)：527-539.
PENG J B，SUN S Q，LIN D W. The extreme hot event along the Yangtze basins in August 2022[J]. Journal of Applied Meteorological Science，2023，34(5)：527-539.

[30] 罗娟，邓承之，朱岩，等. 2022 年盛夏重庆不同阶段高温特征及成因对比[J]. 气象，2023，49(9)：1108-1118.
LUO J，DENG C Z，ZHU Y，et al. Comparison on characteristics and causes at different stages of the extreme heat event in Chongqing in the 2022 midsummer[J]. Meteorological Monthly，2023，49(9)：1108-1118.

[31] 肖尧，马明国，赵伟，等. 川东平行岭谷地表温度时空分布驱动机制分析[J]. 遥感信息，2021，36(4)：47-54.
XIAO Y，MA M G，ZHAO W，et al. Analysis of driving mechanism of temporal and spatial distribution of surface temperature in parallel ridge valley of east Sichuan[J]. Remote Sensing Information，2021，36(4)：47-54.

[32] 周梦甜，李军，何君，等. 起伏地形对气温时空分布的影响：以重庆市为例[J]. 水土保持通报，2016，36(5)：346-351.
ZHOU M T，LI J，HE J，et al. Effects of rugged terrain on spatial and temporal distribution of temperature：taking Chongqing City as a case study[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2016，36(5)：346-351.

[33] 潘韬，吴绍洪，何大明，等. 纵向岭谷区地表格局的生态效应及其区域分异[J]. 地理学报，2012，67(1)：13-26.
PAN T，WU S H，HE D M，et al. Ecological effects of longitudinal range-gorge land surface pattern and its regional differentiation[J]. Acta Geographica Sinica，2012，67(1)：13-26.

[34] 康博文，王得祥，刘建军，等. 城市不同绿地类型降温增湿效应的研究[J]. 西北林学院学报，2005，20(2)：54-56.
KANG B W，WANG D X，LIU J J，et al. Study on cooling and humidifying effects of different urban green space types[J]. Journal of Northwest Forestry University，2005，20(2)：54-56.

[35] ZHAO L，OPPENHEIMER M，ZHU Q，et al. Interactions between urban heat islands and heat waves[J]. Environmental Research Letters，2018，13(3)：034003.

[36] 白莹莹，程炳岩，王勇，等. 城市化进程对重庆夏季高温炎热天气的影响[J]. 气象，2015，41(3)：319-327.
BAI Y Y，CHENG B Y，WANG Y，et al. Influences of urbanization speed on the summer high temperature and sultry weather in Chongqing[J]. Meteorological Monthly，2015，41(3)：319-327.

[37] 周浩，杨宝钢，程炳岩. 重庆近 46 年气候变化特征分析[J]. 中国农业气象，2008，29(1)：23-27.
ZHOU H，YANG B G，CHENG B Y. Analysis of characteristics of climate change over last 46 years in Chongqing[J]. Chinese Journal of Agrometeorology，2008，29(1)：23-27.

[38] 唐晓萍，陈志军，何泽能. 1961—2010 年重庆地区气温和总辐射变化分析[J]. 高原山地气象研究，2013，33(3)：43-47.
TANG X P，CHEN Z J，HE Z N. Analysis of temperature and total radiation trend in Chongqing area during 1961—2010[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research，2013，33(3)：43-47.

[39] 郭渠，孙卫国，程炳岩，等. 重庆市气温变化趋势及其可能原因分析[J]. 气候与环境研究，2009，14(6)：646-656.
GUO Q，SUN W G，CHENG B Y，et al. The trend of temperature variation and its possible causes in Chongqing[J]. Climatic and Environmental Research，2009，14(6)：646-656.

[40] 赵文虎，孙卫国，程炳岩. 近 50 年川渝地区的气温变化及其原因分析[J]. 高原山地气象研究，2008，28(3)：59-67.
ZHAO W H，SUN W G，CHENG B Y. Analysis of temperature changes and their causes in Sichuan and Chongqing in recent 50 years[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research，2008，28(3)：59-67.

[41] 刘德，李永华，阳作明，等. 重庆市年平均气温变化多时间尺度特征的诊断研究[J]. 应用气象学报，2004，15(2)：251-256.
LIU D，LI Y H，YANG Z M，et al. A diagnostic analysis of multi-time-scale variations of temperture in Chongqing[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology，2004，15(2)：251-256.

[42] QIAO Z，WANG N，CHEN J Y，et al. Understanding the differences in the contribution and impact of urbanization on urban warming during heatwave and non-heatwave periods in China[J]. Journal of Cleaner Production，2024，474：143626.

[43] 张德军，杨世琦，祝好，等. 重庆市主城都市区热岛效应定量评估[J]. 应用气象学报，2023，34(1)：91-103.
ZHANG D J，YANG S Q，ZHU H，et al. Quantitative evaluation of heat island effect in Chongqing metropolitan circle[J]. Journal of Applied Meteorological Science，2023，34(1)：91-103.

[44] 李丽蓉，黄一民，张秋锦，等. 洞庭湖流域高温热浪持续天数预测[J]. 地理科学，2024，44(12)：2247-2257.
LI L R，HUANG Y M，ZHANG Q J，et al. Prediction of duration of high temperature heat wave in the Dongting Lake Basin [J]. Scientia Geographica Sinica，2024，44(12)：2247-2257.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Spatiotemporal Changes in Heat Waves Based on the Relative Threshold of Daily Maximum Temperature in Chongqing Muncipality

ZHOU Kunhong[1], WANG Yuefeng[1,2,3], YIN Siwei[1], LIU Fan[1], YANG Qin[4]

(1. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331;
2. Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Ecological Restoration in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331; 3. Chongqing Field Observation and Research Station of Surface Ecological Process in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331; 4. CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing 401147, China)

Abstract: Accurate identification of heat waves holds significant importance for understanding and addressing extreme weather phenomena. Utilizing data from 33 meteorological stations in Chongqing municipality spanning 1961－2022, a daily maximum temperature threshold is employed to identify heat waves, comprehensive analyses of spatiotemporal changes in heat waves are conducted through the integration of key metrics such as the heat wave magnitude index and maximum temperature, while the evolutionary process of representative heat waves is also dissected. Key findings include: 1) The annual average heat wave magnitude index in Chongqing Muncipality ranges from 2.2 to 7.5, with the annual average maximum temperatures oscillating between 36.3 to 41.3 ℃. Both metrics show higher values in the west and northeast, contrasting with lower values in the east. The annual average start time for these heat waves lies between July 12th and August 12th, with the annual average end time ranging from August 2nd to August 19th. The annual average duration of these heat waves was found to be 4.9～7 days. The central and western regions typically experienced these events later than the southeastern areas. 2) From 1961 to 2022, there has been an overall increase in the number of heat waves, the average heat wave magnitude index, and the average maximum temperature in Chongqing Muncipality. This upward trend has became pronounced since the 1990s. The onset and end times of these heat waves have also shifted later. Furthermore, the duration of a single heatwave has increased from 4～5 days to 6～8 days. 3) In 2022, the average heat wave magnitude index of typical heatwaves occurring in Chongqing Muncipality was 36.1, with an average maximum temperature reaching a staggering 42.5 ℃. Heat waves lasted on average for 21 days, typically concentrated in mid-August. The results reveal the spatiotemporal variation patterns of heatwaves in Chongqing Muncipality, providing references for future heatwave disaster prevention and control.

Keywords: heat waves; relative threshold; spatiotemporal changes; Chongqing Muncipality

(责任编辑 方 兴)