

1980 ~ 2019年成都夏季极端高温事件与其干湿热的时空分布特征

陈思思 赵欢 黄刚 唐颖苏

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Summer Extreme Heat Events with Dry and Humid Heat Days in Chengdu during 1980–2019

CHEN Sisi ZHAO Huan HUANG Gang TANG Haosu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2024.24003>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

中国生态脆弱区高温热浪和干旱历史变化特征分析

Historical Changes of High Temperature, Heat Waves, and Drought in Ecological Fragile Zones in China

气候与环境研究. 2022, 27(5): 604 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21044>

青藏高原土壤热通量估算及时空分布特征

Estimation and Spatiotemporal Distribution of Soil Heat Flux over the QinghaiTibetan Plateau

气候与环境研究. 2024, 29(2): 113 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23028>

基于体感温度的中国户外高温风险分布研究

Apparent Temperature-Based Outdoor Heat-Risk Distribution in China

气候与环境研究. 2021, 26(6): 637 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21055>

亚洲地区夏季风期间氨气的时空分布特征

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Ammonia during the Asian Summer Monsoon

气候与环境研究. 2023, 28(3): 263 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2022.21119>

海陆气协同作用对华北地区夏季高温热浪的影响

Effect of LandOceanAtmosphere Interaction on Summer Heat Waves in North China

气候与环境研究. 2023, 28(6): 665 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23035>

1960 ~ 2018年中国高温热浪的线性趋势分析方法与变化趋势

Linear Trends in Occurrence of High Temperature and Heat Waves in China for the 19602018 Period: Method and Analysis Results

气候与环境研究. 2020, 25(3): 225 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19134>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



陈思思, 赵欢, 黄刚, 等. 2024. 1980~2019 年成都夏季极端高温事件与其干湿热的时空分布特征 [J]. 气候与环境研究, 29(5): 534–548. CHEN Sisi, ZHAO Huan, HUANG Gang, et al. 2024. Spatiotemporal Distribution Characteristics of Summer Extreme Heat Events with Dry and Humid Heat Days in Chengdu during 1980–2019 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 29 (5): 534–548. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2024.24003

1980 ~ 2019 年成都夏季极端高温事件与其干湿热的时空分布特征

陈思思^{1,2} 赵欢¹ 黄刚³ 唐颢苏³

1 成都市气象局, 成都 610072

2 温江国家气候观象台, 成都 610072

3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘要 基于 1980~2019 年成都 14 个国家气象观测站的逐日气温、气压和相对湿度等数据, 统计 5 类极端高温指标分析成都夏季极端高温的变化, 并将成都夏季极端高温分为极端干热型和极端湿热型, 利用经验正交函数和傅里叶分解等方法对比分析两者的时空分布特征。结果表明: 1980~2019 年成都夏季极端高温主要呈西北少、东南多, 由西北向东南递增的空间分布; 极端高温的强度、频次和持续性在空间分布上有一定差异, 成都的西北部和中西部虽有高温天气出现但不易形成持续性的热浪, 西部和北部的高温天气更易以持续性的热浪发生, 东部和南部则是较强高温热浪的频发区; 40 年里成都夏季极端高温呈增长趋势并多出现在 7 月和 8 月, 2006 年和 2016 年为成都夏季极端高温较强的年份。同时, 成都夏季的极端高温以极端湿热型为主, 且呈增长趋势; 过去 40 年成都极端湿热的增幅整体大于极端干热; 极端干热存在 2 种模态的空间分布型, 分别为全区一致型和纬向“三极子”型, 相应的时间系数分别在 90 年代中期和 2000 年以后出现年际和年代际变化特征; 极端湿热主要呈现全区一致的变化特征, 对应的时间系数呈增长趋势并有明显的年际和年代际变化特征。

关键词 高温热浪 湿热 湿球黑球温度 时空分布特征

文章编号 1006-9585(2024)05-0534-15

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2024.24003

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Summer Extreme Heat Events with Dry and Humid Heat Days in Chengdu during 1980–2019

CHEN Sisi^{1,2}, ZHAO Huan¹, HUANG Gang³, and TANG Haosu³

1 Chengdu Meteorological Office, Chengdu 610072

2 Wenjiang National Climatology Observatory, Chengdu 610072

3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on daily observational data (e.g., temperature, air pressure, and relative humidity) collected from 14 ground meteorological stations in Chengdu, the spatial distributions and temporal variations of summer extreme heat

收稿日期 2024-01-05; 网络预出版日期 2024-04-01

作者简介 陈思思, 女, 1989 年出生, 博士, 主要从事极端高温研究。E-mail: 312240753@qq.com

通讯作者 黄刚, E-mail: hg@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国三峡哥伦比亚控股有限公司 CTGL-2022-CO-SA-039, 四川省科技计划 2023YFS0430

Funded by CTG Colombia Holding S.A.S. (Grant CTGL-2022-CO-SA-039), Sichuan Science and Technology Program (Grant 2023YFS0430)

events by calculating five indices of extreme heat events during 1980–2019 were investigated. In addition, the characteristics of extremely dry and humid heat days were analyzed by using the Empirical Orthogonal Function (EOF) and Fourier decomposition methods. The results reveal that the summer extreme heat events have been more frequent in the southeastern area of Chengdu than in its northwestern area. Furthermore, an increasing tendency of heat extremes is observed from northwest to southeast across Chengdu during 1980–2019. The magnitude, frequency, and duration of the extreme heat events exhibit spatial heterogeneity. In particular, hot days occur more than heat waves in the northwest and mid-west of Chengdu, while heat waves are more prevalent in the western and northern parts. The extreme hot days and heat waves are mainly concentrated in the eastern and southern regions of Chengdu. Over the past four decades, Chengdu has witnessed a significant increase in summer extreme heat events, notably in July and August, with the most severe instances occurring in 2006 and 2016. The summer extreme heat events were dominated by the humid heat extremes across Chengdu during 1980–2019. Extreme humid and dry heat days exhibited increasing trends, with the humid heat extremes growing faster than dry heat extremes during this period. EOF analysis indicates two primary modes for extreme dry heat days: The first mode is a homogeneous pattern with obvious variations after the mid-1990s, while the second mode is a zonal tripolar pattern with considerable variations after 2000. The leading EOF mode of extreme humid heat days displays a homogeneous pattern with discernible interannual and interdecadal variations.

Keywords Heat wave, Humid heat, Wet bulb globe temperature, Spatiotemporal distribution characteristic

1 引言

在气候变暖的背景下, 全球大部地区高温热浪呈增长趋势 (Meehl and Tebaldi, 2004; 段安民等, 2016; Hu and Huang, 2020)。近 60 年中国极端天气气候事件也发生了显著变化, 高温日数增多, 群发性或区域性极端天气气候事件频次增加, 范围增大 (Ren and Zhou, 2014; 秦大河, 2015; Chen et al., 2016; 杨凯等, 2023)。夏季极端高温事件增多导致的土地干旱、江河水枯和电力短缺等问题, 不仅影响人们的日常生活, 气温升高还增加了人群心脑血管疾病发生的风险, 影响老年人口和血脂异常人群的健康, 甚至威胁人体生命 (Kang et al., 2021; 陆开来等, 2022)。除了气温, 湿度也是影响人体健康的重要气象因素 (Sherwood and Huber, 2010)。与单一高温暴露相比, 高温—高湿复合暴露对人群健康的影响更为显著。湿度通过影响机体的热应激和水合状态, 放大极端温度对人体的负面健康效应。在夏季极端高温高湿的环境中, 人体的代谢及热耗散受到影响, 容易引发中暑或热射病, 同时诱发心脑血管疾病或使症状加重 (Hanna and Tait, 2015)。

近年来, 中国各区域频繁遭遇高温热浪的威胁 (杨萍等, 2010; 李纵横等, 2015; 陈思思等, 2018; Lu et al., 2023), 位于中国西南、四川盆地西部的成都也经历了夏季极端高温事件的增多 (张小玲等, 2022), 并在第六次国际耦合模式比较计划多模式不同排放场景的预估下, 在未来成都夏季极端高温

仍将呈上升趋势 (Yuan et al., 2022)。成都作为践行新发展理念的公园城市示范区和成渝地区双城经济圈建设的重要城市, 常住人口有 2119.2 万, 市区人口有 986.1 万, 人们的生产生活和城市的建设发展对气候的依赖较大, 夏季极端高温的频发严重影响成都市人民的生活和经济的增长 (成都市人民政府, 2022; <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/sjfb/tjxx/index.html>[2024-04-21])。目前, 国内外已有部分关于夏季极端高温结合湿度的研究 (Willett and Sherwood, 2012; Li and Zha, 2018; Lin and Yuan, 2022; He and Chen, 2023), 但极端高温高湿天气的区域性和阶段性差异较大, 关于成都夏季极端高温的研究多关注单一气温要素, 结合湿度的分析较少。因此有必要引入与湿度相关的极端高温指数对成都夏季极端高温事件进行大样本统计分析, 以期对成都夏季极端高温形成一个更全面的认识, 为当地政府决策部门应对极端高温灾害制定相应措施提供科学依据, 为当地政府执行部门开展夏季高温健康风险早期监测、预警和预测等相关业务提供科学支撑。

本文基于成都 40 年地面气象观测资料, 通过极端高温指数统计分析成都夏季极端高温的强度、频次和持续性, 并利用湿球黑球温度 (Wet Bulb Globe Temperature, WBGT) 将成都夏季极端高温划分为极端干热型和极端湿热型, 研究分析两者的时空变化特征。本文重点探讨以下关键科学问题: 1) 1980~2019 年间, 成都夏季极端高温如何演变?

其时空分布呈现出哪些特征？2) 在同一时期内，成都夏季极端干热和极端湿热天气的主要特征有何变化？这些变化呈现出何种模态，在不同的时间尺度上呈现出何种趋势？

2 数据与方法

2.1 数据介绍

本文所用逐日观测数据均来自气象大数据云平台·天擎 (China Integrated Meteorological Information Sharing System, CIMISS)。为满足分析需求，选用经国家气象信息中心进行严格质量控制、汇编整编等得到的成都 14 个国家气象站 (图 1, 包括龙泉驿 56286、新都 56290、温江 56187、双流 56288、郫都 56272、新津 56276、简阳 56295、都江堰 56188、彭州 56189、邛崃 56284、崇州 56181、金堂 56296、大邑 56285、蒲江 56281) 的日最高气温、相对湿度和气压等数据，时间长度为 1980~2019 年。

文中使用了 WBGT，其基本计算方法为：

$$\text{WBGT} = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_a, \quad (1)$$

其中， T_w 、 T_g 、 T_a 分别表示湿球温度、黑球温度

和干球温度 (Lemke and Kjellstrom, 2012)。在室内或者太阳辐射可以被忽略不计的情况下，则使用如下公式计算：

$$\text{WBGT} = 0.7T_w + 0.3T_a. \quad (2)$$

成都位于四川盆地西部，多云雾阴天，少日照晴天，因此本文采用公式 (2) 计算成都的湿球黑球温度 (Yuan et al., 2022)。为得到日最高 WBGT，选用 14:00 (北京时间，下同) 观测数据，利用水汽压公式和戈夫-格雷奇 (Goff-Gratch) 饱和水汽压公式求得 T_w ：

$$e = E_{tw} - Ap(T_a - T_w), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \lg E_{tw} = & 10.79574 \left(1 - \frac{273.16}{273.15 + T_w} \right) - \\ & 5.0281 \lg \left(\frac{273.15 + T_w}{273.16} \right) + 1.50475 \times 10^{-4} \cdot \\ & \left[1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{273.15 + T_w}{273.16} - 1 \right)} \right] + 0.42873 \times \\ & 10^{-3} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{273.15 + T_w} \right)} - 1 \right] + 0.78614, \end{aligned} \quad (4)$$

其中， e 为水汽压， E_{tw} 为湿球温度 T_w 对应的纯水

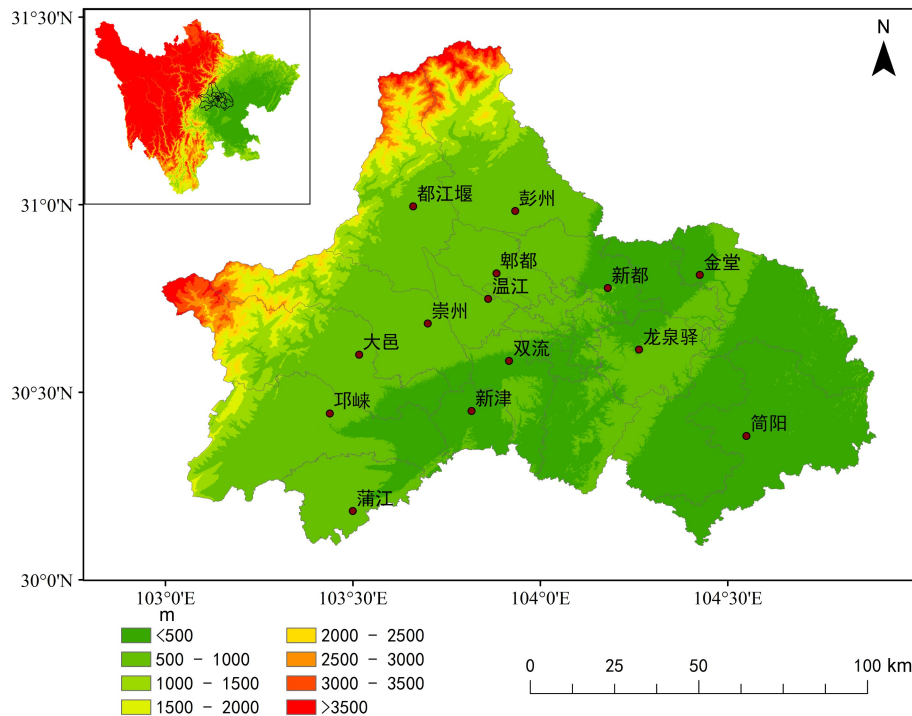


图 1 成都 14 个国家气象站的空间分布 (填色为地形高度)。

Fig. 1 Spatial distribution of 14 meteorological stations in Chengdu (colors indicate elevation of orography).

平液态面饱和水汽压, A 为干湿表系数, p 为气压, 最后结合公式 (2) 即可确定日最高 WBGT 的值。

对于成都夏季极端高温的变化特征, 本文通过统计成都 14 个站点日最高气温极值、高温日数、热浪频次、极端湿热和极端干热进行对比分析 (具体定义见表 1)。同时, 参考成都市气象台现行业务规定^①, 采用“每年 14 个站点中日最高气温的最大值记为成都市的年内日最高气温极值”, “最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的站点 ≥ 7 个的天数记为成都市的高温日数”, “日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 且持续 3 天及以上的站点 ≥ 7 个的次数记为成都市的热浪频次”和“WBGT $\geq 28^{\circ}\text{C}$ 的站点 ≥ 7 个的天数记为成都市的极端湿热”来统计分析成都市全域极端高温的时空变化。

表 1 极端高温指数定义

Table 1 Definitions of extreme high temperature events indices

极端高温指数	定义	单位
日最高气温极值	某时段内日最高气温的最大值	$^{\circ}\text{C}$
高温日数	日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的天数	d
热浪频次	日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 且持续 3 天及以上的频次	
极端湿热	日最高 WBGT $\geq 28^{\circ}\text{C}$ 的天数	d
极端干热	日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 且 WBGT $< 28^{\circ}\text{C}$ 的天数	d

2.2 统计方法

本文用到的统计学方法包括经验正交函数分析 (Empirical Orthogonal Function, EOF)、傅里叶分解 (Fast Fourier Transform, FFT)、曼-肯德尔检测法 (Mann-Kendall, M-K)、极大似然估计法 (Maximum Likelihood Estimation, MLE) (Fisher, 1922)、广义极值分布 (Generalized Extreme Value, GEV) (Coles, 2001) 和 North 准则 (North et al., 1982)。EOF 分析能够揭示极端高温事件的时空模态, 从而深入了解高温模态的空间分布以及这些模态随时间的演变 (魏凤英, 1999)。数据在 EOF 分解前进行了标准化处理, 以消除不同指数之间单位的差异。傅里叶分解把气象要素复杂的时间变化曲线分解成为若干个正弦波或余弦波的叠加, 比较分析气象要素不同时间周期中的变化特征 (魏凤英, 1999)。M-K 检测法通过计算数据点之间的差值排列, 识别时间序列中的上升或下降趋势, 因不

受数据分布形态的制约而被广泛应用于评估时间序列的趋势变化 (黄嘉佑, 2000)。GEV 分布常用于描述极端事件的概率分布, 通过构建 GEV 模型可以更准确地估计极端事件的变化趋势 (史道济, 2006)。

3 结果与分析

3.1 极端高温的时空变化特征

本节选用日最高气温极值、高温日数和热浪频次以及与湿度相关的极端湿热 4 个极端高温指数, 统计分析 1980~2019 年成都夏季极端高温的强度 (日最高气温极值)、频次 (高温日数和极端湿热) 和持续性 (热浪频次) 的变化特征。

3.1.1 空间分布

图 2 为 1980~2019 年成都夏季极端高温 4 个指数的空间分布。图 2 表明, 1980~2019 年成都夏季极端高温具有空间差异, 主要呈现出西北地区极端高温事件少、东南地区极端高温事件多 (最小值出现在西北部的都江堰, 最大值均出现在东南部的简阳), 由西北向东南递增的分布特征。从 4 个极端高温指数的具体数值所示, 1980~2019 年成都 14 个站点日最高气温极值的范围在 $36.2\sim 40.3^{\circ}\text{C}$ 之间, 最高值与最低值之间相差 4.1°C , 低于 37°C 的区域位于成都西北部, 包括都江堰、崇州和温江 3 个站点, 高于 40°C 的站点仅有成都东南部的简阳, 其他区域站点日最高气温极值在 $38\pm 1^{\circ}\text{C}$, 其中超过 37.5°C 的站点有 9 个 (图 2a); 成都 14 个站点高温日数 40 年累计的最小值为 19 d, 最大值为 379 d, 差值达 360 d, 西北部 6 个站点 (包括都江堰、温江、彭州、郫都、崇州和大邑, 数值升序) 的高温日数低于 100 d, 其中温江和彭州数量相等为 65 d, 东南部 3 个站点 (包括龙泉驿、金堂和简阳, 数值升序) 高于 200 d, 其中简阳超过 300 d (图 2b); 极端湿热天数累计最少为 45 d, 最多为 505 d, 差值达 460 d, 其余站点的极端湿热累计天数在 200 ± 100 d, 其中南部和东部 4 个站点 (包括双流、龙泉驿、金堂和简阳) 超过 200 d (图 2c); 热浪频次与前三种极端高温指数的空间分布略有差异, 整体呈现由西北部和中西部区域向东、西方向递增的分布特征, 成都西北部和中西

① 成都市气象局. 2018. 成都市气象台气象灾害预警发布实施办法 (2018 版), 10pp.

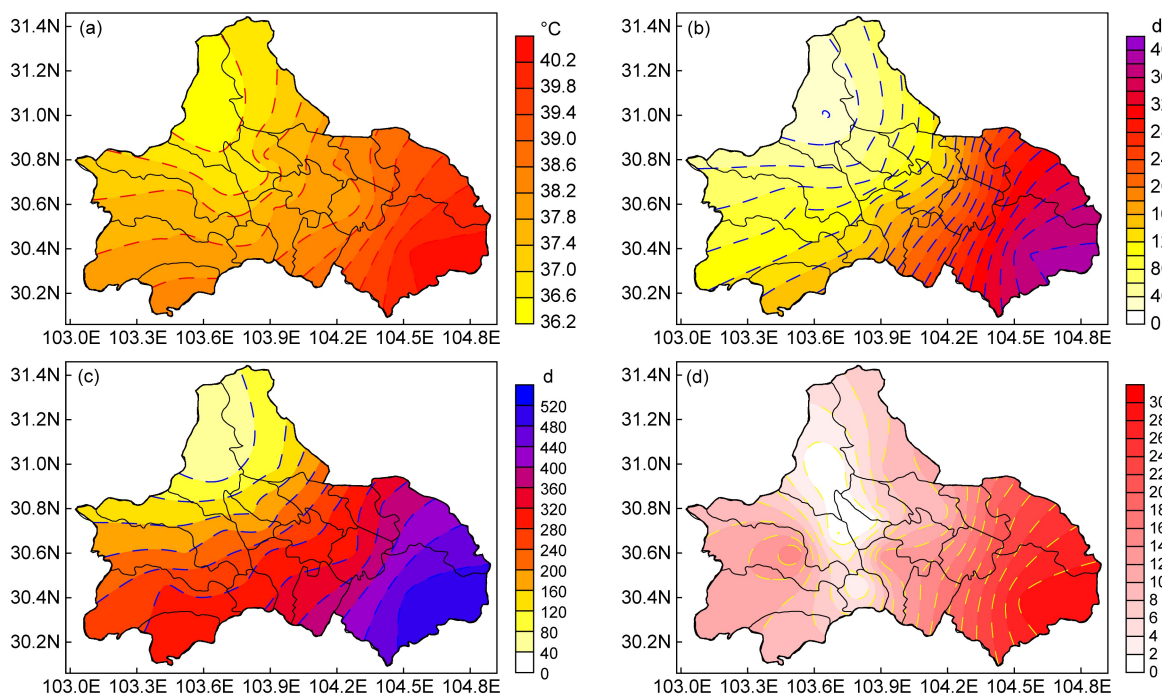


图2 1980~2019年成都夏季极端高温的空间分布:(a)日最高气温极值;(b)高温日数;(c)极端湿热;(d)热浪频次。

Fig. 2 Spatial distributions of (a) the extreme daily maximum temperatures, (b) the hot days, (c) the extreme humid heat days, and (d) the heat waves (times) in Chengdu during 1980–2019.

部区域的都江堰、崇州和温江在过去40年里均未出现过热浪(热浪频次为0),而成都东南部简阳的热浪频次最高为29次,40年里热浪频次少于10次的站点主要位于成都西部和北部(除大邑和邛崃),超过20次的站点仅有东部的金堂和简阳(图2d)。4个极端高温指数的空间分布表明,1980~2019年成都夏季极端高温的空间分布具有明显差异性,极端高温极值强度(日最高气温极值)在西北部与东南部的差异达 4°C 左右,极端高温发生频次(高温日数和极端湿热)在西北部与东南部的差异在百天以上,极端高温持续性(热浪频次)在西北部和中西部与东南部相差数十次。

考虑高温日数和热浪频次定义中的包含关系(即发生热浪的前提是有高温发生),根据成都14个站点高温热浪空间分布的统计值表明,成都各区域高温热浪的发生具有一定差异性。对比1980~2019年14个站点的高温日数和热浪频次的具体数值发现,仅成都西北部的都江堰和东南部的简阳分别为成都高温热浪最少和最多的站点;对于高温日数同样为65d的温江和彭州,位于成都中西部的温江并未发生过热浪,而北部的彭州有9次;对于同样出现了9次热浪的彭州、蒲江和新都,位于成都西南部的蒲江和北部的新都高温日数都超过

了100d(分别为154d和134d),但彭州仅有65d;对比成都西部的大邑和南部的简阳,西部大邑的高温日数为99d,热浪发生了16次,而南部简阳的高温日数为133d,热浪仅出现了2次。这一结果表明,成都西北部 and 中西部区域虽有高温天气出现但不易形成持续性的热浪;成都西部和北部的高温天气更易以持续性的热浪发生,而成都东部和南部则是高温热浪较多发生的区域。

3.1.2 时间变化

1980~2019年成都市和14个站点夏季极端高温均呈增长趋势(图3),但仅有成都市的日最高气温极值的上升趋势具有显著突变(M-K检测通过了 $\alpha=0.05$ 显著性检验)。1980~2019年成都市日最高气温极值多年平均为 35.5°C 且以 $0.77^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速度上升(图3a)。同时,为进一步确定成都市逐年日最高气温极值的变化趋势,建立非平稳的GEV模型和时间趋势函数,通过极大似然估计得到成都市日最高气温极值每十年约上升 0.8°C ,估计值的标准误差为 0.011°C ,上升趋势显著。对成都市日最高气温极值年变化的时间序列进行M-K检测的结果显示(图4),从1985年开始成都市日最高气温极值呈持续增长趋势,并在2000年后增长趋势显著(显著性水平 $\alpha=0.05$),2005年以

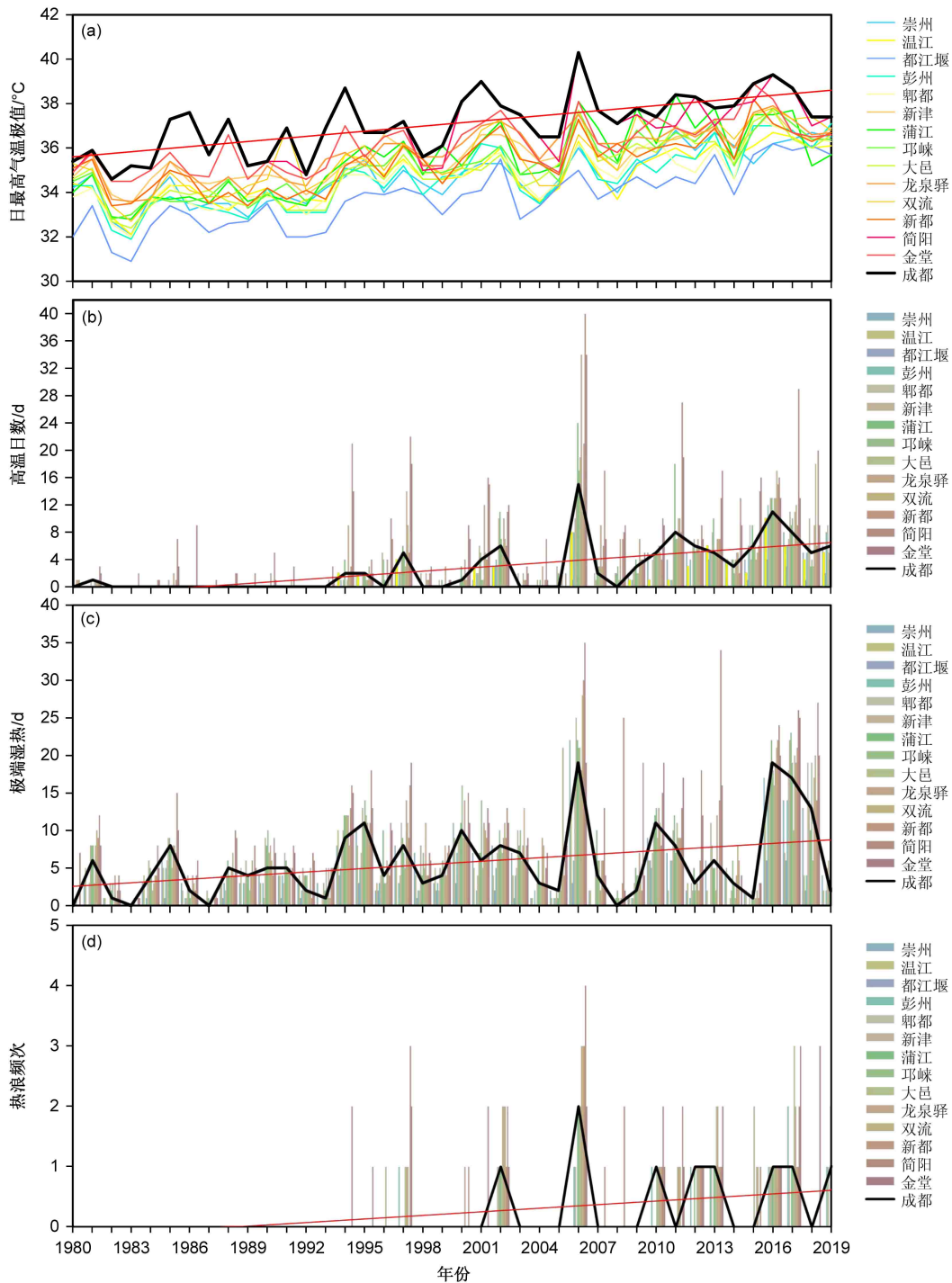


图3 同图2, 但为时间序列。

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for time series.

后增长趋势甚至超过了 $\alpha=0.01$ 显著性水平。同时, 成都市日最高气温极值的年增长趋势在 90 年代中后期发生了突变现象, 突变的具体时间为 1997 年。1997 年以后成都市日最高气温极值的年平均由 1997 年之前的 35.3°C 增长到 37°C , 但增长率有所减缓, 从 1997 年之前的 $1^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 下降为 $0.6^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

90 年代中期以前, 成都市的高温天气较少发生, 高温日数多为 0, 虽个别站点有高温天气出现但每年高温日数均未超过 10 d; 90 年代中期以后, 成都市和 14 个站点的高温日数均明显增多, 在 2006 年成都市及其 10 个站点的高温日数达到最多, 其中成都市为 15 d, 2016 年次之 (图 3b)。1980~

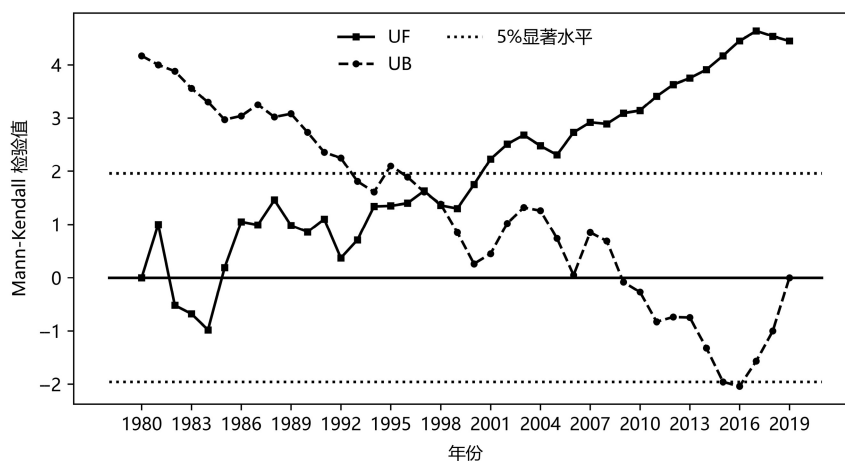


图4 1980~2019年成都市日最高气温极值的M-K检测(横线线±1.96为显著性 $\alpha=0.05$)。

Fig. 4 Mann-Kendall (M-K) test for the extreme daily maximum temperature of Chengdu during 1980–2019 (the two dot horizontal lines representing values ± 1.96 are the $\alpha=0.05$ significance levels).

2019年成都市和14个站点高温日数的增幅为0.5~4.5 d/10 a, 其中成都市为2 d/10 a, 增幅最大的简阳为4.5 d/10 a, 最小的都江堰为0.5 d/10 a, 其余站点增幅多在 2 ± 1 d/10 a。过去40年里成都市的极端湿热年均发生6 d并有明显年际变化特征, 在2006年和2016年出现最大值为19 d, 成都市和14个站点的极端湿热天数增幅在0.5~3.8 d/10 a, 其中成都市为1.6 d/10 a (图3c)。1980~2019年成都市和14个站点的极端湿热天数整体比高温日数多但增幅小。成都14个站点在90年代中期以前均无热浪发生, 而成都市则是在2000年之后才有热浪出现但频次较少, 并在2006年成都市热浪频次达到最高为2次(图3d)。1980~2019年4个极端高温指数的时间序列表明, 成都市和14个站点夏季极端高温的强度、频次和持续性整体均呈增长趋势。90年代中期以后, 成都市日最高气温极值发生显著突增, 高温和湿热天气增多, 2000年后出现热浪。成都市夏季极端高温在2006年达到最强, 2016年次之。对比成都市和14个站点高温日数和极端湿热天气的数值表明, 极端湿热天数整体比高温日数多, 过去40年成都市夏季更易发生极端湿热天气, 但增幅比高温日数小。

表2列出了1980~2019年成都市年内日最高气温极值出现的时间、站点和数值。从历年成都市日最高气温极值出现的站点信息表明, 过去40年成都市日最高气温极值均出现在其东部和南部。其中, 以东部的简阳最多有28年, 其次是西南部的蒲江有4年, 接着是东部的龙泉驿和金堂分别为

3年, 最后是南部的双流有2年。结合表中站点随年份的变化发现, 成都市年内日最高气温极值多出现在其东部, 但有向南部发展的趋势。从表2气温的具体数值发现, 过去40年成都市年内日最高气温极值的最大值出现在2006年7月16日的简阳

表2 1980~2019年成都市逐年日最高气温极值

Table 2 Annual value of the extreme daily maximum temperature in Chengdu during 1980–2019

时间				时间			
年	月-日	站点	气温/°C	年	月-日	站点	气温/°C
1980	5-14	龙泉驿	35.4	2000	7-26	简阳	38.1
1981	5-8	简阳	35.9	2001	7-7	简阳	39
1982	8-3	简阳	34.6	2002	7-16	简阳	37.9
1983	5-12	简阳	35.2	2003	7-31	简阳	37.5
1984	8-10	简阳	35.1	2004	7-11	简阳	36.5
1985	8-5	简阳	37.3	2005	7-23	龙泉驿	36.5
1986	8-10	简阳	37.6	2006	7-16	简阳	40.3
1987	6-3	简阳	35.7	2007	8-22	简阳	37.7
1988	5-3	简阳	37.3	2008	6-5	简阳	37.1
1989	7-21	简阳	35.2	2009	6-22	蒲江	37.8
1990	8-7	金堂	35.4	2010	7-31	金堂	37.4
1991	9-8	双流	36.9	2011	6-24	蒲江	38.4
1992	8-10	简阳	34.8	2012	8-13	简阳	38.3
1993	6-23	简阳	36.9	2013	8-23	蒲江	37.8
1994	8-12	简阳	38.7	2014	7-28	简阳	37.9
1995	9-5	简阳	36.7	2015	7-25	金堂	38.9
1996	8-7	简阳	36.7	2016	8-25	简阳	39.3
1997	8-26	简阳	37.2	2017	7-28	简阳	38.7
1998	7-17	龙泉驿	35.6	2018	8-15	双流	37.4
1999	8-1	蒲江	36.1	2019	8-26	简阳	37.4

为 40.3°C, 最小值也出现在简阳为 1982 年 8 月 3 日的 34.6°C。2000 年以前, 成都市每年的日最高气温极值多在 37°C 以下, 仅 1994 年超过 38°C, 而在 1982 年和 1992 年无高温天气出现; 2000 年以后, 成都市年内日最高气温极值多在 37°C 以上, 仅 2004 年和 2005 年两年低于 37°C, 而 2000 年、2001 年、2006 年、2011 年、2012 年、2015~2017 年则超过 38°C。结合逐年的月份信息, 过去 40 年成都市年内日最高气温极值多发生在 7 月和 8 月, 并有向 7 月和 8 月集中的趋势。

图 5 表明 1980~2019 年成都 14 个站点的高温日数和极端湿热主要出现在 7 月和 8 月, 其次是 6 月。高温日数在 5 月较少, 9 月最少 (图 5a); 极端湿热则在 9 月较少, 5 月最少 (图 5b)。整体上极端湿热的天数比高温日数多。在 2006 年 7 月、8 月, 2016 年 8 月和 2017 年 7 月成都 14 个站点的高温日数和极端湿热均较多, 除此之外, 极端湿热的天数在 2000 年 7 月和 1994 年 8 月也较多。表 3

为成都市热浪发生的起始年月日及持续时间。表中热浪发生的起始时间表明, 成都市热浪发生在 2000 年以后并在 2010 年之后更频繁, 平均每 2 年就有 1 次热浪发生, 2006 年成都市热浪发生的频次达到最高为 2。同时, 成都市热浪发生在 7 月中旬至 8 月中旬。表中持续天数表明, 成都市热浪以持续 3 d 为主, 2016 年 8 月 19 日开始的热浪持续时间最长为 7 d, 其次是 2006 年 8 月 9 日开始的热浪持续了 6 d, 然后是 2012 年 8 月 9 日开始的热浪持续了 5 d。

从 4 个极端高温指数的统计结果表明, 1980~2019 年成都强度较强、频次较多和持续性较长的极端高温多发生在 7 月和 8 月, 且在 2006 年和 2016 年出现极大值。

3.2 极端干热和极端湿热天数的时空变化特征

根据高温日数和极端湿热的定义, 两者的统计结果会出现重复计算的数据, 干扰对比分析结果。本节利用极端干热和极端湿热指数对成都极端高温

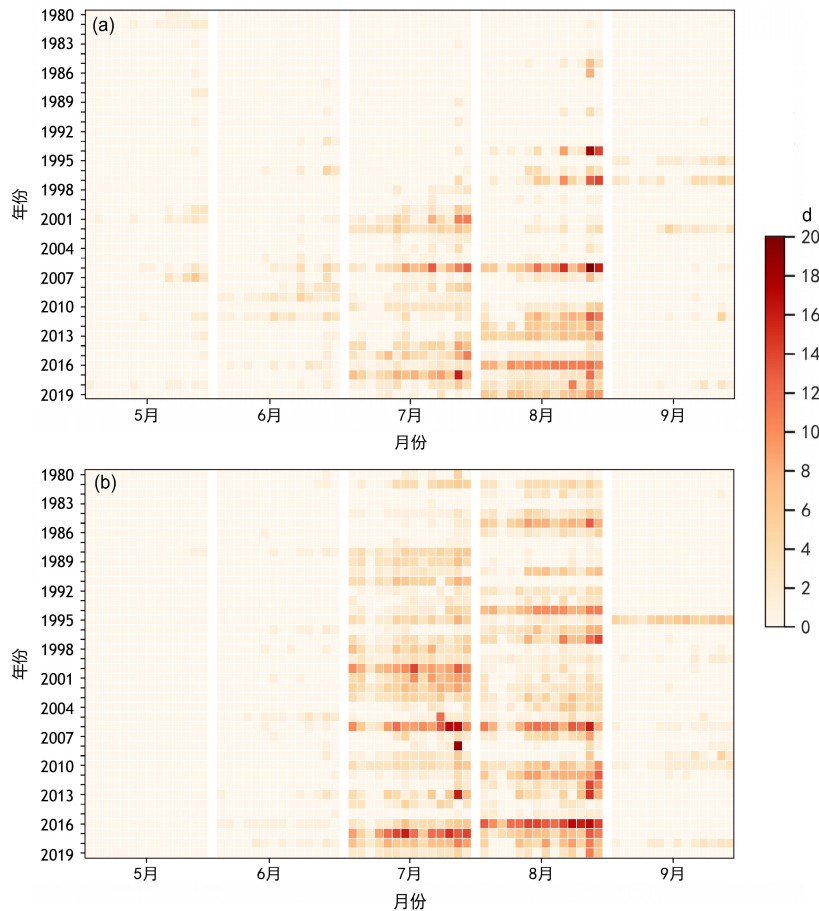


图 5 1980~2019 年成都 14 个站点 (a) 高温日数和 (b) 极端湿热分月的逐年变化。

Fig. 5 Monthly changes of (a) the hot days and (b) the extreme humid heat days in 14 meteorological stations of Chengdu during 1980-2019.

表 3 1980~2019 年成都市热浪发生的时间及持续天数

Table 3 Time and duration of heat waves in Chengdu during 1980–2019

年	起始时间		持续天数/d
	月	日	
2002	7	14	3
2006	7	15	3
	8	9	6
2010	7	29	3
2012	8	9	5
2013	8	16	3
2016	8	19	7
2017	7	10	3
2019	8	10	3

进行干、湿分型统计 (表 1), 对比分析成都极端干、湿热的时空变化特征。

图 6 给出了 1980~2019 年成都 14 个站点极端干热天数 (图 6a) 和极端湿热天数 (图 6b) 40 年平均的空间分布。如图所示, 成都极端干热天数和极端湿热天数多年平均的空间分布相似, 都呈西北向东南递增的空间分布, 最小值位于西北部的都江堰 (极端干热为 0.3 d, 极端湿热为 1.1 d), 最大值位于东南部的简阳 (极端干热为 4.2 d, 极端湿热为 12.6 d)。成都 14 个站点极端干热天数的 40 年平均在 0.3~4.2 d, 成都市极端干热天数多年平均的区域均值为 1.6 d; 成都 14 个站点极端湿热天数的 40 年平均在 1.1~12.6 d, 成都市极端湿热天数多年平均的区域均值为 6.4 d。过去 40 年成都市和 14 个站点极端湿热天数的多年平均都多于极端干热, 成都的极端高温以极端湿热型为主。

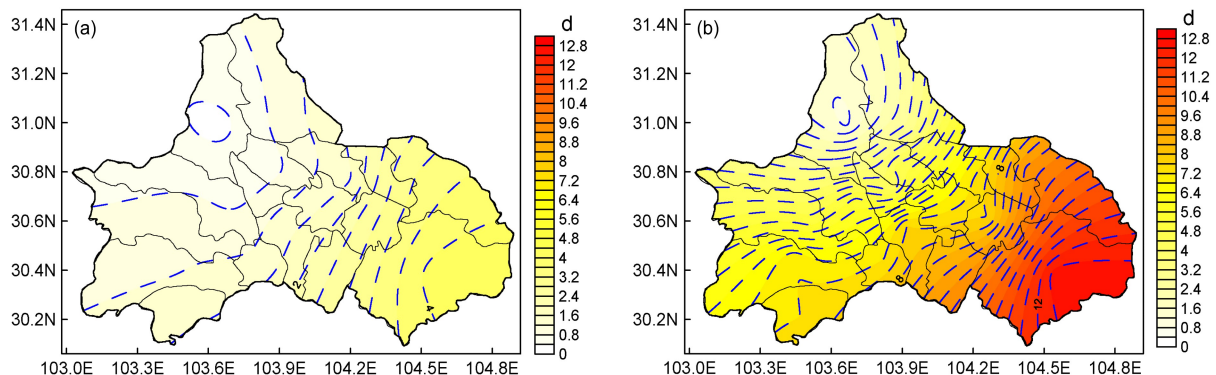


图 6 1980~2019 年成都 (a) 极端干热天数和 (b) 极端湿热天数多年平均的空间分布。

Fig. 6 Spatial distributions of the climate mean state of (a) the extreme dry heat days and (b) the extreme humid heat days in Chengdu during 1980–2019.

表 4 为 1980~2019 年成都 14 个站点极端干热天数和极端湿热天数的增幅。过去 40 年成都 14 个站点极端干热天数的增幅为 0.4~1.9 d/10 a, 增幅最小出现在西北部的都江堰为 0.4 d/10 a, 增幅最大出现在东部的龙泉驿为 1.2 d/10 a; 极端湿热天数的增幅在 0.5~3.8 d/10 a, 增幅最小仍然出现在西北部的都江堰约为 0.5 d/10 a, 增幅最大则出现在东部的简阳为 3.8 d/10 a。除去中西部的温江和北部的彭州以外, 成都极端湿热天数的增幅大于极端干热天数。

3.2.1 极端干热和极端湿热天数的 EOF 分析

本节将对 1980~2019 年成都极端干热天数和极端湿热天数分别进行 EOF 分解得到空间特征向量和时间序列, 以表征成都极端干热和极端湿热的典型时空变化特征。经过统计检验 (North 准则), 极端干热保留 EOF 分解后前二项, 累计方差贡献率达 78%; 极端湿热保留 EOF 分解后第一项, 方差贡献率 79%。

图 7 是成都极端干热天数 EOF 分解第一模态的空间分布 (图 7a) 及对应的时间系数 (图 7b), 该模态的解释方差为 63%, 能够显著表征成都极端干热天数主要的分布结构。成都极端干热天数第一模态的空间分布均表现为正位相, 绝对值的大值区域主要位于成都的西南部和东北部。这一空间分布特征反映了极端干热天数一致的变化趋势并且在成都的西南部和东北部变化最强。成都极端干热天数 EOF 分解第一模态对应的时间系数 (图 7b) 表现出增长的趋势, 在 90 年代中期以前为负位相且变化特征不明显, 90 年代中期以后转变为正位相且有明显的年际变化特征。图 7 表明, 成都极端干

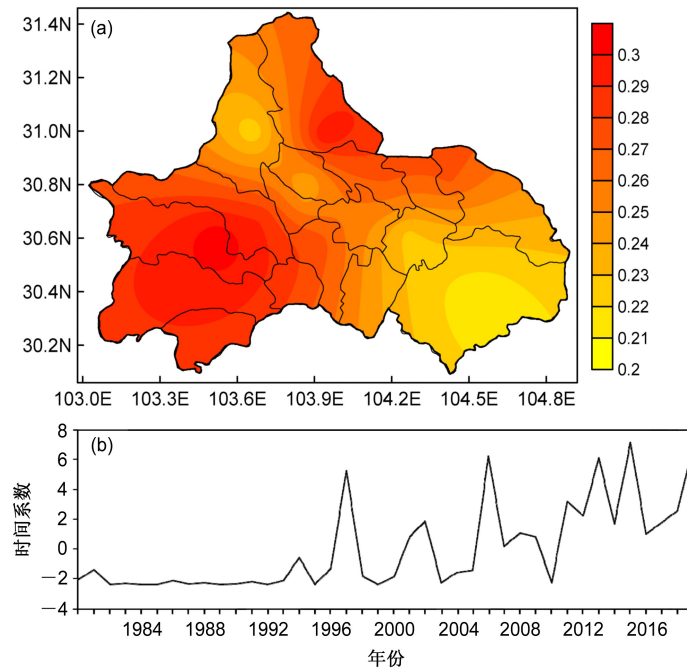


图 7 1980~2019 年成都极端干热天数 EOF 分解第一模态的 (a) 空间分布及对应的 (b) 时间系数。

Fig. 7 (a) Spatial distribution and (b) time series of the first leading Empirical Orthogonal Function (EOF1) of the extreme dry heat days in Chengdu during 1980–2019.

表 4 1980~2019 年成都 14 个站点极端干热天数和极端湿热天数的增幅

Table 4 Growth rates of the extreme dry and humid heat days in Chengdu during 1980–2019 d/10 a

站点	天数的增幅		站点	天数的增幅	
	极端干热	极端湿热		极端干热	极端湿热
崇州	0.7	1.7	邛崃	0.9	1.8
温江	0.8	0.5	大邑	0.9	1.3
都江堰	0.4	0.5	龙泉驿	1.2	1.9
彭州	1.0	1.0	双流	1.1	2.5
郫都	0.7	2.1	新都	0.9	2.3
新津	0.9	1.5	简阳	1.9	3.8
蒲江	1.1	1.8	金堂	1.6	2.7

热天数在 90 年代中期以前一致偏少且变化不明显；90 年代中期以后整体偏多且有明显年际变化并呈增长趋势，仅在 1998~2000 年、2003~2005 年和 2010 年呈整体偏少的空间分布。成都的西南部和东北部为极端干热天数变化最大的区域，在 1997 年、2006 年、2013 年、2015 年和 2019 年成都极端干热天数一致偏多较明显。

图 8 是成都极端干热天数 EOF 分解第二模态的空间分布 (图 8a) 及对应的时间系数 (图 8b)，该模态的解释方差为 15%，能够表征成都极端干

热天数的第二类空间分布特征。成都极端干热天数第二模态的空间分布表现为成都自西向东“正负正”的纬向“三极子”型分布特征。成都西北部和中西部区域为负位相，其东、西区域为正位相，且中东部正位相中心区的变化强于中西部负位相中心区。成都极端干热天数 EOF 分解第二模态对应的时间系数 (图 8b) 在 2004 年以前变化特征不明显且接近于 0，2004 年之后有明显年际变化特征；位相变化在 90 年代中期以前和 2010 年之后主要为负，90 年代中期至 2010 年主要为正。图 8 表明，成都极端干热天数在 2004 年以前虽有纬向“三极子型”分布的变化特征，但不明显；2004~2010 年自西向东呈“多少多”分布的变化特征较明显；2011 年以后主要呈“少多少”分布的空间结构变化特征。在成都极端干热天数的第二类空间分布型中，成都的中东部和中西部反相变化的特征较其他区域强，且中东部变化特征最强。2006 年成都极端干热天数为西北部和中西部区域偏少，其东、西区域偏多的空间分布特征最显著的一年，2013 年则为反向空间分布特征最显著的年份。

图 9 给出了成都极端湿热天数 EOF 分解第一模态的空间分布 (图 9a) 及对应的时间系数 (图 9b)，该模态的解释方差为 79%，能够表征

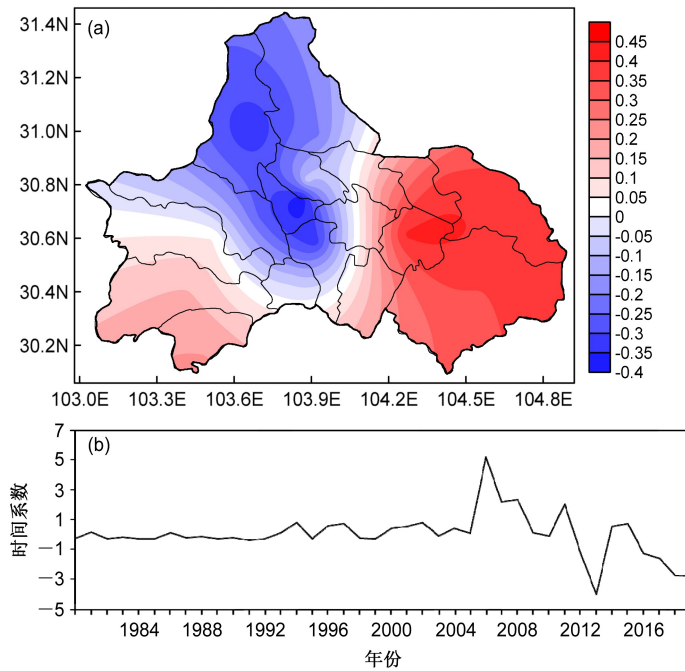


图 8 1980~2019 年成都极端干热天数 EOF 分解第二模态的 (a) 空间分布及对应的 (b) 时间系数。

Fig. 8 (a) Spatial distribution and (b) time series of the second leading Empirical Orthogonal Function (EOF2) of the extreme dry heat days in Chengdu during 1980–2019.

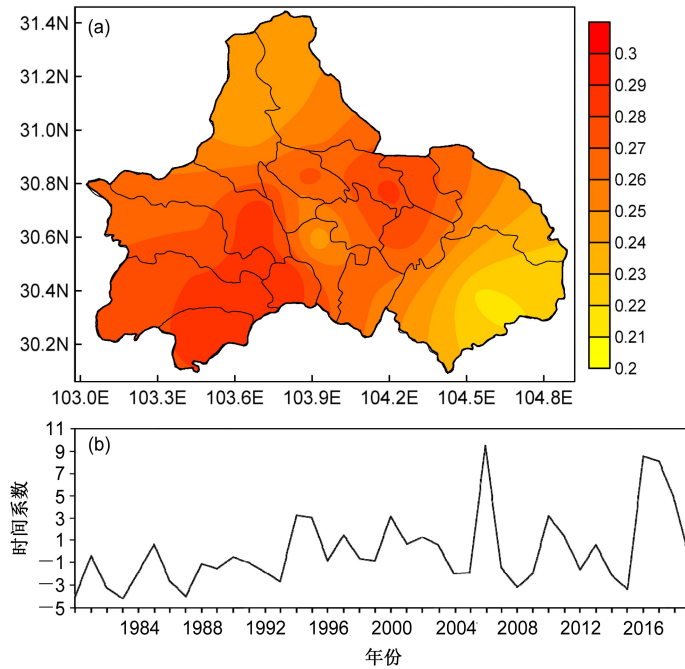


图 9 同图 7, 但为极端湿热天数。

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for the extreme humid heat days.

成都极端湿热天数最主要的结构分布特征。成都极端湿热天数第一模态的空间分布均表现为正位相, 绝对值的大值区域主要位于成都的西南部和东北部。这一空间分布特征反映了成都极端湿热天数一致的变化趋势并且在成都的西南部和东北部变化最强。

成都极端湿热天数 EOF 分解第一模态对应的时间系数 (图 9b) 表现出增长的趋势并具有明显的年际变化特征, 在 90 年代中期以前主要为负位相, 90 年代中期以后主要为正位相。图 9 表明, 成都极端湿热天数呈增长趋势并具有明显年际变化特征,

在 90 年代中期以前一致偏少, 90 年代中期以后整体偏多。成都的西南部和东北部为极端湿热天数变化最大的区域, 在 2006 年和 2016 年成都极端湿热天数一致偏多最显著。

3.2.2 极端干热和极端湿热天数的各时间尺度变率

进一步将 1980~2019 年成都极端干热天数和极端湿热天数 EOF 分解的时间系数进行傅里叶分解, 更直观地分析两者在年际和年代际尺度上的变化特征 (图 10)。成都极端干热天数第一模态 (图 10a) 和第二模态 (图 10b) 的时间系数分别在 1996 年和 2005 年以前年际和年代际变化特征均

不明显; 而极端湿热天数第一模态的时间系数 (图 10c) 则在 40 年里表现出明显的年际和年代际变化特征。成都极端干热天数第一模态的时间系数在 1996 年之后有明显的年际和年代际变化特征, 年际变化的波动幅度最大在 1997 年为 5.2 d; 年代际变化呈增长趋势并在 2000 年以后增长趋势显著。成都极端干热第二模态的时间系数在 2005 年之后有明显的年际和年代际变化特征, 年际变化的波动幅度最大在 2011 年为 3 d; 年代际变化呈减少趋势但不明显。成都极端湿热天数第一模态时间系数的年际变化幅度整体大于极端干热天数, 波动幅度最

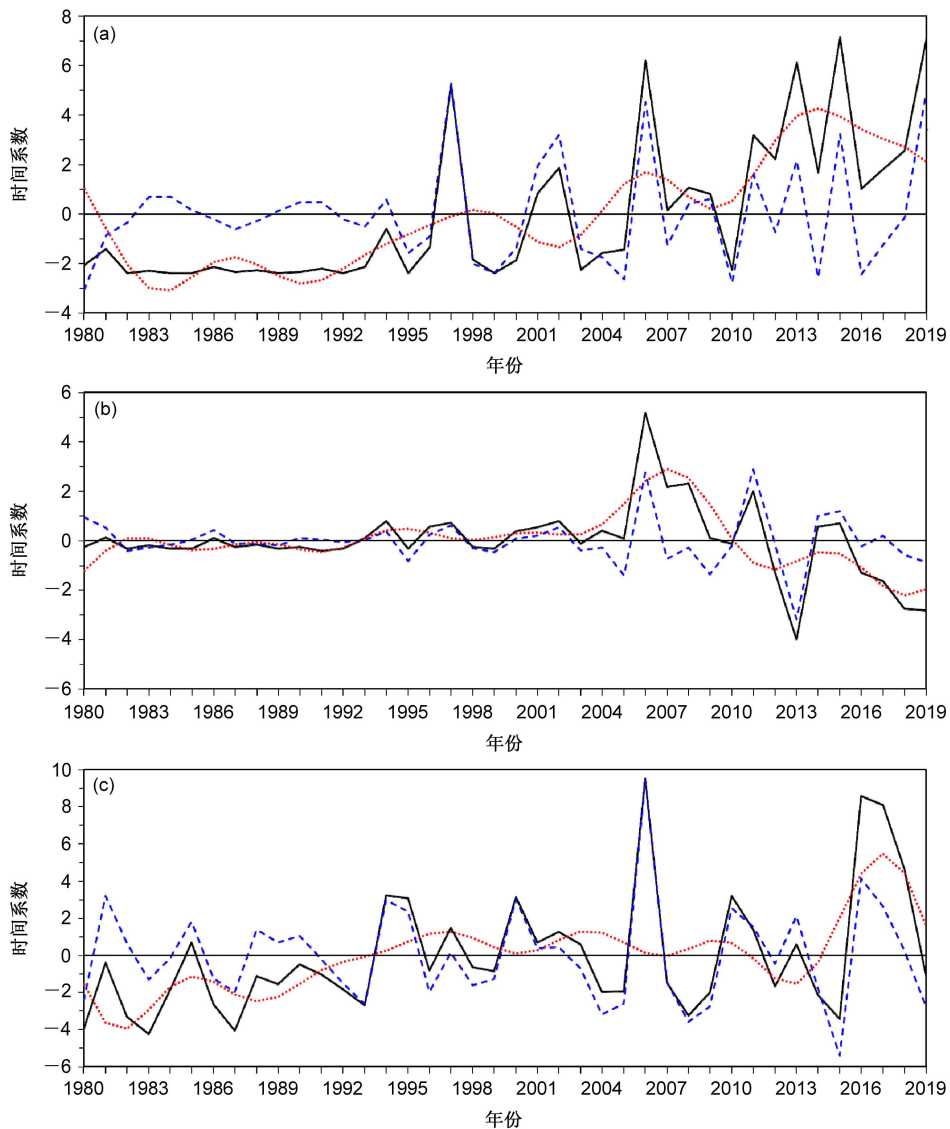


图 10 1980~2019 年成都极端干热天数 (a) 第一模态、(b) 第二模态和极端湿热天数 (c) 第一模态的时间系数 (黑实线) 及其年际 (蓝短线) 和年代际 (红短线) 分量的时间序列。

Fig. 10 Time series of the values (black solid line), the interannual component (blue short line), the interdecadal component (red solid line) of (a) the EOF1 and (b) the EOF2 of the extreme dry heat days, and (c) the EOF1 of the extreme humid heat days in Chengdu during 1980–2019.

大在 2006 年为 9.5 d, 年代际变化呈增长趋势并在 1996~2008 年增长趋势显著。

4 总结与讨论

近年来, 我国西南部夏季极端高温事件频发且呈现出温湿复合型特征, 严重威胁人体健康、制约经济增长, 给当地人民生产生活和社会发展带来严重影响 (Yuan et al., 2022; Chen et al., 2024)。本文利用 1980~2019 年成都 14 个国家气象观测站逐日资料, 通过 5 类极端高温指标 (日最高气温极值、高温日数、热浪频次、极端湿热和极端干热) 对成都夏季极端高温的强度、频次和持续性进行了统计分析, 并将成都极端高温分为极端干热型和极端湿热型分析它们各自的时空分布特征, 得出以下主要结论:

(1) 成都夏季极端高温的强度 (日最高气温极值)、频次 (高温日数和极端湿热) 和持续性 (热浪频次) 在空间分布上具有差异性。强度和频次的空间分布主要呈西北低、东南高, 由西北向东南递增的分布; 而持续性的空间分呈现由西北部和中西部区域向东、西递增的分布特征。

(2) 成都夏季高温热浪的发生在空间上缺乏一致性。成都西北部和中西部虽有高温天气出现但不易形成持续性的热浪; 西部和北部的高温天气更易以持续性的热浪发生; 东部和南部则是较强高温热浪的频发区。

(3) 1980~2019 年成都夏季极端高温的强度、频次和持续性均呈增长趋势, 并在 2006 年和 2016 年达到峰值或次峰值。90 年代中期以后极端高温的强度显著突增, 高温和湿热天气增多, 2000 年后出现热浪。过去 40 年成都夏季强度较强、频次较多和持续性较长的极端高温多发生在 7 月和 8 月。

(4) 1980~2019 年成都夏季极端高温以极端湿热型为主, 且呈增长趋势, 其增幅整体大于极端干热。

(5) 成都极端干热存在 2 种模态的空间型, 分别为全区一致型和纬向“三极子”型。相应的时间系数分别在 90 年代中期和 2000 年以后出现年际和年代际变化特征。

(6) 成都极端湿热 EOF 第一模态的空间分布呈全区一致的变化特征, 与极端干热 EOF 第一模

态的空间分布相似但两者大值区略有不同。极端湿热 EOF 第一模态空间分布的大值区域更接近成都中部, 对应的时间系数呈增长趋势并有明显年际和年代际变化。

有研究表明, 城市极端高温事件发生概率的增大或与全球变暖、城市热岛和土地利用变化等因素有关 (秦大河, 2015; Yuan et al., 2022; 张小玲等, 2022)。而前人有研究指出, 20 世纪 90 年代以来, 成都东部高温天气显著增多, 大气降水明显减少且变化形势已经影响到该区域地表径流以及地下水位 (周长艳等, 2013)。当气温升高时, 会导致更多水分蒸发使局地土壤更干燥而进一步升高气温; 干燥的土壤会减少水分蒸发影响云的形成而导致降水减少, 使土壤湿度进一步下降。“气温升高—土壤干燥—降水减少”三者形成正反馈机制, 成都极端高温东西分布的差异可能与区域空气湿度和土壤湿度以及这种正反馈机制有关。同时, 对于成都夏季极端高温的变化, 人为外强迫 (如人类活动引起的温室气体排放、土地利用变化等) 和内部变率 (大气环流模态、海温变化等) 所起的相对贡献也值得进一步开展研究。通过认识外强迫和内部变率对成都极端高温变化的影响, 可以有效评估未来气候变化的趋势, 为下一步准确预测和采取应对措施提供科学支撑。本文仍存在一些不足之处。例如, 文中所用国家气象观测站的数据缺少均一化处理, 结果可能存在非均一性影响。但文中采用了较多站台的数据进行分析, 尽量避免了数据非均一性及其带来的问题。此外, 本文重点关注了成都地区极端高温的干、湿分型, 相关方法与结论是否适用全国其他城市, 值得深入探讨。

参考文献 (References)

- Chen H P, He W Y, Zhang S H. 2024. Recent urbanization increases exposure to humid-heat extreme events over populated regions of China [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 17(2): 100409. doi:10.1016/j.aosl.2023.100409
- Chen S S, Zhang J Y, Huang G. 2016. An interdecadal shift in the number of hot nights around 1997 over eastern China [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 17(9): 501–509. doi:10.1002/asl.684
- 陈思思, 张井勇, 黄刚. 2018. 时间尺度分离在华南夏季极端高温预测中的应用 [J]. *气候与环境研究*, 23(2): 185–198. Chen Sisi, Zhang Jingyong, Huang Gang. 2018. Application of time-scale decomposition statistical method in climatic prediction of summer extreme high-temperature events in South China [J]. *Climatic Environ. Res. (in Chinese)*, 23(2): 185–198. doi:10.3878/j.issn.1006-

- 9585.2017.16220
成都市人民政府. 2022. 成都年鉴 2022 [M]. 成都: 成都年鉴社, 668pp. Chengdu Municipal People's Government. 2022. Chengdu Yearbook 2022 (in Chinese) [M]. Chengdu: Chengdu Year Book Press, 668pp.
- Coles S. 2001. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values [M]. London: Springer. doi:10.1007/978-1-4471-3675-0
- 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 2016. 1979~2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征 [J]. 气候变化研究进展, 12(5): 374-381. Duan Anmin, Xiao Zhixiang, Wu Guoxiong. 2016. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979-2014 [J]. Climate Change Res. (in Chinese), 12(5): 374-381. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2016.039
- Fisher R A. 1922. On the mathematical foundations of theoretical statistics [J]. Phil. Trans. Roy. Soc. A: Math., Phys. Eng. Sci., 222(594-604): 309-368. doi:10.1098/rsta.1922.0009
- Hanna E G, Tait P W. 2015. Limitations to thermoregulation and acclimatization challenge human adaptation to global warming [J]. Int. J. Environ. Res. Public Health, 12(7): 8034-8074. doi:10.3390/ijerph120708034
- He W Y, Chen H P. 2023. More extreme-heat occurrences related to humidity in China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 16(5): 100391. doi:10.1016/j.aosl.2023.100391
- Hu L S, Huang G. 2020. The changes of high-temperature extremes and their links with atmospheric circulation over the Northern Hemisphere [J]. Theor. Appl. Climatol., 139(1-2): 261-274. doi:10.1007/s00704-019-02970-1
- 黄嘉佑. 2000. 气象统计分析方法与预报方法 (2 版) [M]. 北京: 气象出版社, 298pp. Huang Jiayou. 2000. Statistic Analysis and Forecast Methods in Meteorology (2nd ed.) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 298pp.
- Kang Y T, Tang H S, Zhang L F, et al. 2021. Long-term temperature variability and the incidence of cardiovascular diseases: A large, representative cohort study in China [J]. Environ. Pollut., 278: 116831. doi:10.1016/j.envpol.2021.116831
- Lemke B, Kjellstrom T. 2012. Calculating workplace WBGT from meteorological data: A tool for climate change assessment [J]. Ind. Health, 50(4): 267-278. doi:10.2486/indhealth.MS1352
- Li L, Zha Y. 2018. Mapping relative humidity, average and extreme temperature in hot summer over China [J]. Sci. Total Environ., 615: 875-881. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.10.022
- 李纵横, 李崇银, 宋洁, 等. 2015. 1960~2011 年江淮地区夏季极端高温日数的特征及成因分析 [J]. 气候与环境研究, 20(5): 511-522. Li Zongheng, Li Chongyin, Song Jie, et al. 2015. An analysis of the characteristics and causes of extremely high temperature days in the Yangtze-Huaihe River basins in summer 1960-2011 [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 20(5): 511-522. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14157
- Lin Q Y, Yuan J C. 2022. Linkages between amplified quasi-stationary waves and humid heat extremes in Northern Hemisphere midlatitudes [J]. J. Climate, 35(24): 4645-4658. doi:10.1175/JCLI-D-21-0952.1
- 陆开来, 班婕, 王情, 等. 2022. 不同气候变化情景下未来中国热相关死亡风险的预估 [J]. 气象学报, 80(3): 349-357. Lu Kailai, Ban Jie, Wang Qing, et al. 2022. Prediction of future heat-related death risk in China under different climate change scenarios [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 80(3): 349-357. doi:10.11676/qxb2022.037
- Lu R Y, Xu K, Chen R D, et al. 2023. Heat waves in summer 2022 and increasing concern regarding heat waves in general [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 16(1): 100290. doi:10.1016/j.aosl.2022.100290
- Meehl G A, Tebaldi C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century [J]. Science, 305(5686): 994-997. doi:10.1126/science.1098704
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon. Wea. Rev., 110 (7): 699-706. doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2
- 秦大河. 2015. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告 (精华版) [M]. 北京: 科学出版社, 377pp. Qin Dahe. 2015. China National Assessment Report on Risk Management and Adaptation of Climate Extremes and Disasters (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 377pp.
- Ren G Y, Zhou Y Q. 2014. Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over mainland of China, 1961-2008 [J]. J. Climate, 27(6): 2340-2360. doi:10.1175/jcli-d-13-00393.1
- Sherwood S C, Huber M. 2010. An adaptability limit to climate change due to heat stress [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 107(21): 9552-9555. doi:10.1073/pnas.0913352107
- 史道济. 2006. 实用极值统计方法 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 209pp. Shi Daoji. 2006. Practical Statistical Method of Extreme Values (in Chinese) [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 209pp.
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 296pp. Wei Fengying. 1999. Modern Statistical Technology in Climatological Diagnoses and Prediction (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 296pp.
- Willett K M, Sherwood S. 2012. Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature [J]. Int. J. Climatol., 32(2): 161-177. doi:10.1002/joc.2257
- 杨凯, 冯信贤, 黄刚. 2023. 海陆气协同作用对华北地区夏季高温热浪的影响 [J]. 气候与环境研究, 28(6): 665-675. Yang Kai, Feng Xinxian, Huang Gang. 2023. Effect of land-ocean-atmosphere interaction on summer heat waves in North China [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 28(6): 665-675. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23035
- 杨萍, 刘伟东, 王启光, 等. 2010. 近 40 年我国极端温度变化趋势和季节特征 [J]. 应用气象学报, 21(1): 29-36. Yang Ping, Liu Weidong, Wang Qiguang, et al. 2010. The climatic change trend and seasonal characteristics of daily temperature extremes in China for the latest 40 years [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 21(1): 29-36. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.01.004
- Yuan J C, Lin Q Y, Chen S S, et al. 2022. Influence of global warming

and urbanization on regional climate of Megacity: A case study of Chengdu, China [J]. *Urban Climate*, 44: 101227. doi:[10.1016/j.uclim.2022.101227](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101227)

张小玲, 刘梦娜, 青泉, 等. 2022. 1960~2018 年成都地区极端气温变化及城市化贡献分析 [J]. *高原山地气象研究*, 42(1): 10-17. Zhang Xiaoling, Liu Mengna, Qing Quan, et al. 2022. Extreme temperature change and urbanization contribution in Chengdu from 1960 to 2018 [J]. *Plateau Mt. Meteor. Res.* (in Chinese), 42(1): 10-17. doi:[10.3969/](https://doi.org/10.3969/)

[j.issn.1674-2184.2022.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2184.2022.01.002)

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. Zhou Changyan, Zhang Shunqian, Qi Dongmei, et al. 2013. Variation features and impact of high temperature in Sichuan during last 50 years [J]. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 32(6): 1720-1728. doi:[10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00161](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00161)