

1961—2020年中国北方夏季热浪时空格局

郑琬^{1,2}, 司文洋^{1,2}, 杜自强^{1,2*}, 武志涛^{1,2}, 梁寒雪^{1,2}

(1. 山西大学 黄土高原研究所, 山西 太原 030006;

2. 山西亚高山草地生态系统教育部野外科学观测研究站, 山西 忻州 034000)

摘要:在全球气候变暖的大背景下,热浪灾害在世界范围内爆发愈加频繁。基于线性趋势分析和地理空间分析方法,使用中国北方夏季逐日最高气温数据,针对我国北方地区1961—2020年发生的热浪事件,探讨了近60年来的我国北方热浪的时空变化规律。结果发现:从时间尺度看,热浪发生频次、持续日数和强度均呈显著增加的趋势,其速率分别为 0.0126 次 $\cdot a^{-1}$ 、 0.0859 d $\cdot a^{-1}$ 、 0.0078 °C $\cdot a^{-1}$ 。从空间分布看,热浪多发地区集中在研究区域中北部,而安徽和江苏省北部很少发生热浪事件。热浪发生频次、持续日数和强度除了研究区域南部呈减少或不变趋势,其他大部分地区都呈增加趋势。中国北部地区的内蒙古、甘肃和新疆等地热浪三个指标增加趋势更大。总体来看,近半个世纪以来我国北方热浪发生的频次、持续日数与强度具有空间上的高度一致性且时间上呈现逐年增加的态势。

关键词:热浪;频次;持续日数;强度;中国北方

中图分类号:P423 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2395(2026)02-0343-10

Spatio-temporal Patterns of Summer Heat Waves in North China During 1961–2020

ZHENG Wan^{1,2}, SI Wenyang^{1,2}, DU Ziqiang^{1,2*}, WU Zhitao^{1,2}, LIANG Hanxue^{1,2}

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Field Scientific Observation and Research Station of China's Ministry of Education for Shanxi Alpine Grassland Ecosystem, Xinzhou 034000, China)

Abstract: Under the background of global warming, heat wave disasters are breaking out more frequently all over the world. Based on the linear trend analysis and geospatial analysis method, using the daily maximum temperature data in summer in North China, this paper discusses the spatio-temporal variation of heat wave events in North China during 1961–2020. The results showed that the frequency, duration days and intensity of heat wave increased significantly according to the time scale, and the rates were 0.0126 times $\cdot a^{-1}$, 0.0859 d $\cdot a^{-1}$ and 0.0078 °C $\cdot a^{-1}$, respectively. From the spatial distribution, the heat wave prone areas were concentrated in the central and northern parts of the study area, while the heat wave events rarely occurred in Anhui and northern Jiangsu Province. The frequency, duration and intensity of heat wave decreased or remained unchanged in the southern part of the study area, but increased in most other regions. In North China, the heat waves in Inner Mongolia, Gansu and Xinjiang showed a greater trend of increase. In general, the frequency, duration days and intensity of heat waves in North China have a high spatial consistency and an increasing trend year by year in the past half century.

收稿日期:2023-10-13; **修回日期:**2024-05-08

基金项目:国家重点研发计划(2023YFF1305102);国家自然科学基金(U1810101);黄河流域生态系统固碳增汇山西省科技创新人才团队建设项目(202204051001010);山西省研究生教育创新项目(2023KY030)

作者简介:郑琬(1999—),女,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向为植被与生态遥感。E-mail:zheng2196@163.com

* **通信作者:**杜自强(DU Ziqiang),E-mail:duzq@sxu.edu.cn

引文格式:郑琬,司文洋,杜自强,等.1961—2020年中国北方夏季热浪时空格局[J].山西大学学报(自然科学版),2026,49(2):343–352. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2024079.

Key words: heatwave; frequency; duration days; intensity; North China

0 引言

近年来,全球温度不断创新高,给世界各地的社会和生态系统带来了越来越多的挑战^[1]。气候变化政府间专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告指出,2011—2020年地球表面的平均温度比19世纪末(工业革命之前)的平均温度高1.10℃,温度比过去12.50万年的任何时候都高^[2],并且近20年为20世纪初以来最暖的时期^[3]。近年来,热浪事件出现得更加频繁,全球发生热浪事件的陆表面积大幅度增加^[4]。2003年的热浪几乎影响整个欧洲地区,导致严重的人员死亡事件频发^[5-6]。2010年热浪侵袭了俄罗斯,造成大规模农作物枯萎和森林大火,给经济社会发展和居民生活健康带来巨大的影响^[7]。2016年澳大利亚海洋热浪事件,导致90%珊瑚白化和死亡^[8-9]。热浪事件具有高影响性和高致灾性,会使海平面上升、冰川和冻土消融,不仅危害陆地生态系统的平衡,还会给人类以及动植物的生存带来巨大影响。

由于具有高影响性和高致灾性,热浪事件现已成为全球气候变暖和快速城市化背景下国际社会普遍关注的热点。目前,国内外关于热浪的研究主要集中于热浪内涵的界定、测度与分类、时空特征、模型预测以及热浪的影响与产生机理探讨等方面。Perkins等^[10]评估了全球1950年至2014年的热浪变化趋势,发现热浪频率和持续时间有所增加,但热浪强度变化不明显。Coumou和Robinson等^[11]指出,不管是实际观测还是CMIP5的多模式模拟的结果都表明全球发生热浪事件的陆表面积在过去几十年增加了好几倍。Ullah等^[12]利用CMIP6模式预估了南亚白天和夜间热浪的时空变化,发现南亚未来可能经历白天和夜间热浪数量的增加,并且夜间热浪的频率和空间范围的增量将高于白天热浪。Zampieri等^[13]评估了全球1901年至2010年的热浪强度及其对阿尔卑斯山河流的影响,发现与20世纪初期相比,在过去几十年中热浪所覆盖的全球面积比例几乎增加了三倍。

近60年来,中国范围内热浪发生频次、持续日数和强度呈增多、增强趋势^[14]。学者们揭示了我国部分区域,比如,西南地区^[15-16]、东北地区^[17]、西北地区^[18]、江南地区^[19]等地的热浪事件的变化特征,也有针对个别城市或省份的热浪事件的研究^[20]。总体上,研究区域主要集中在国家或小区域尺度,对中国北方长时间序列、全区域高温及热浪事件关注较少。

中国北方地区是典型的气候敏感区及生态环境脆弱区,频发的热浪事件不仅给该区域的生态环境带来挑战,还会给该区域的生物多样性与人居环境带来很大威胁。另外,除了会对人体健康产生损害外,在心理健康方面,热浪会增加攻击行为和人际冲突的频率,并与一系列精神、行为和认知障碍有关。因此,需要科学的手段研究我国北方地区近几十年来热浪事件时空变化特征,从而为政府部门制定普适性的地区发展战略提供科学参考,也有助于缓解未来城市化加速发展及可能的气候变化带来的潜在生态风险。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

中国北方地区(东北、华北、西北)指秦岭—淮河一线以北、内蒙古高原以南、大兴安岭、青藏高原以东,东临渤海和黄海的大部分地区(图1)。该区域总面积约为 4.33×10^6 km²,占全国总面积的45.09%。东西横跨三层阶梯,地势差大。地形地貌复杂多样,分布有山脉、丘陵、平原、盆地、沙漠等^[21]。区域主要气候特点为冬季寒冷干燥,夏季暖热多雨,气候差异显著。年降水量自东向西逐渐减少,大部分地区为400 mm~800 mm,而年平均气温分布有明显的地域性,处于-4.81℃~16.32℃之间。研究区所跨经度范围广,植被受温度、降水、海拔的影响,具有明显的水平分异性,从东向西自然植被带依次为森林、草甸草原、典型草原、荒漠草原和戈壁荒漠。这一区域生态环境脆弱且敏感,旱涝灾害频繁发生,水土流失十分严重。

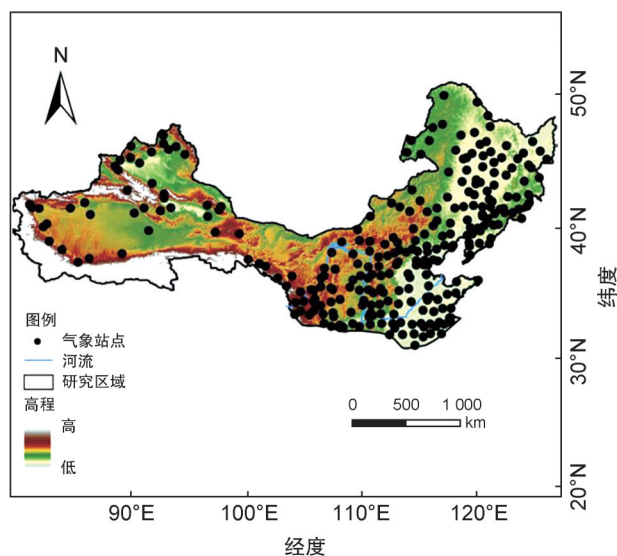


图1 研究区和气象站点位置图

Fig. 1 Location of study area and weather stations

1.2 数据来源

气温数据来源于中国气象科学数据共享服务网的中国地面气候资料日值数据集。利用了1961—2020年中国北方16省(自治区、直辖市)277个气象站点的夏季(6—8月)逐日最高气温数据。本文所使用的中国地面气候资料日值数据集经过了均一化处理。数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)来自地理空间数据云。

1.3 研究方法

目前对热浪定义的标准较多,尚无共识。本文参照Hobday等^[22-23]对热浪的定义。在30年的历史气候基准期内(1961—1990年),以当天为中心的11天为窗口选取30年的每日最高温度值,从低到高90%分位数即为当日的阈值。若连续3日或以上每日最高温度均超过当日的热浪阈值,则定义为热浪事件。这样确定的阈值随时间和空间变化,每一个站点和每一个日期都对应着不同的阈值。例如,计算某站点2023年6月1日是否发生了热浪事件,要将该站点1961—1990年,6月1日前后11天的数据,总计 11×30 天的每日最高温度数据进行统计并由低到高进行排序,数据的九十百分位数就是该天的热浪阈值。若该站点2023年6月1日至3日连续3天每日最高温度均超过本天的热浪阈值,即发生一次热浪事件。与其余方法相比,本方法更符合中国北方地区的实际情

况。以此为标准,本文对热浪事件的发生频次、持续日数和发生强度3个方面开展研究。经过统计,文中热浪事件日温度值域最低温高于 $29.60\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高温高于 $32.34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

本文的热浪频次是指热浪发生的次数,一年可以发生多次热浪事件。持续日数代表热浪的持续时间,是某个站点某年热浪事件最大持续天数。强度定义为热浪事件期间温度峰值与气候态温度 T_m 的差^[23-24]

$$I = \max(T_d - T_m), \quad (1)$$

其中 I 为该站点热浪最大强度^[22]; T_d 为该站点某日的最高温度; T_m 为气候态温度,即气候基准期内,以当天为中心的11天窗口期间逐日最大温度的平均值。

基于上述指标定义,利用中国北方277个气象站点近60年夏季逐日最高气温地面气象观测资料,采用Sen-Theil线性趋势分析方法对中国北方夏季热浪频次、持续日数和强度的时间变化特征进行分析。在ArcGIS中对中国北方夏季热浪频次、持续日数和强度的空间变化特征进行分析。采用Mann-Kendall检验方法结合滑动 t 检验法对热浪的3个指标进行相应的突变分析。

2 结果与分析

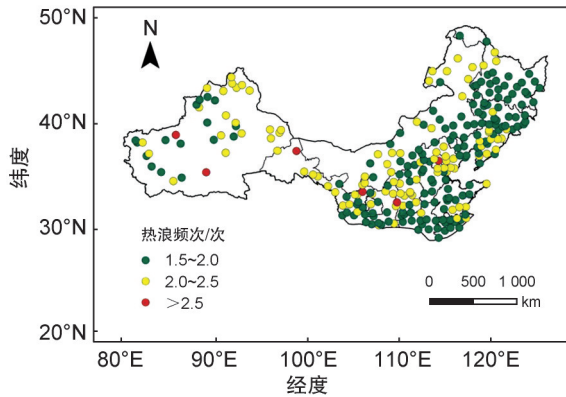
2.1 热浪频次分布特征

2.1.1 热浪频次的空间分布特征

从气象站点热浪发生频次(图2)来看,1961—2020年间中国北方所有站点都发生过热浪事件。热浪发生频次在 $1.5 \sim 2.0$ 次 $\cdot a^{-1}$ 的站点占多数,达169个。从空间分布上看,这些站点主要位于研究区域的东南部。热浪频次在 $2.0 \sim 2.5$ 次 $\cdot a^{-1}$ 之间的站点占比36.13%,主要分布于新疆、甘肃、内蒙古和山西四省。热浪频次高达2.5次以上的站点有6个。其中宁夏吴忠市的红寺堡区($106^{\circ}11'E, 37^{\circ}59'N$)热浪频次为所有站点最高,热浪频次达到2.9次 $\cdot a^{-1}$ 。总体来看,热浪频次高的站点主要分布于新疆地区、内蒙古高原和黄土高原,而热浪频次低的站点主要分布于华北平原和东北平原。

2.1.2 热浪频次的空间分布变化趋势

热浪频次的空间分布变化趋势显示(图

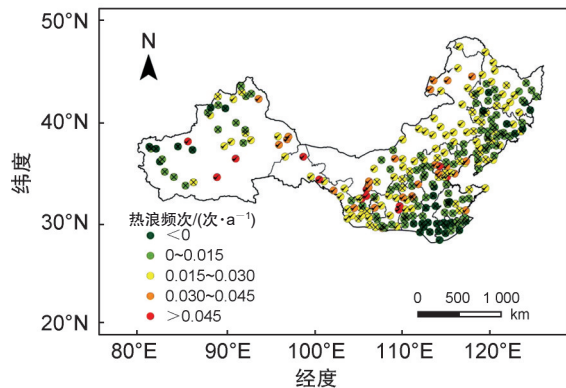


注:热浪频次指热浪发生的次数,一年可以发生多次热浪事件。

图2 1961—2020年中国北方热浪频次空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of heat wave frequency in North China during 1961-2020

3)。中国北方地区共有 34 个站点热浪频次呈降低趋势($0 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下)。其中,热浪频次变化率最低的站点位于安徽省西北部的阜阳($115^{\circ}44'E, 32^{\circ}52'N$),变化率为 $-0.019 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)。热浪频次变化率在 $0 \sim 0.015 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ 以及 $0.015 \sim 0.030 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ 的站点占北方大部分地区,其中有 99 个站点为 $0 \sim 0.015 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从空间分布上看,这些站点主要位于华北平原和东北平原;热浪频次变化率在 $0.015 \sim 0.030 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ 的站点为 101 个。位于西北地区的宁夏、甘肃和新疆地区热浪频次变化率大于 $0.045 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在所有 277 个站点中,地处黄河上游的吴忠地区($106^{\circ}11'E, 37^{\circ}59'N$)热浪频次变化率最大,达到了 $0.080 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)。总体上,热浪频次变化率呈南高北低的特征。



注:×表示未通过0.05显著性检验。

图3 1961—2020年中国北方热浪频次变化趋势及其显著性

Fig. 3 The change trend and significance level of heat wave frequency in North China during 1961-2020

2.1.3 热浪频次年际变化特征

1961—2020 年中国北方的平均热浪频次为 $1.9 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由热浪频次历年变化(图 4)可以看出,近 60 年来中国北方夏季热浪频次在 $1.0 \sim 3.2$ 次之间波动。其中 1997 年达到了历史最高值。21 世纪 2000 年以来,热浪频次在 $1.4 \sim 3.2$ 次间波动震荡,尤其 2000 年和 2002 年热浪频次都达到了 2.7 次以上。整体来看,热浪频次以约 $0.0126 \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$ 的线性速率呈现增加态势 ($P < 0.05$)。

用 Mann-Kendall 法结合滑动 t 检验法进行突变分析(图 5)。分析可知,上界自由度(Upper Bound of Freedom, UF)线和下界自由度(Lower Bound of Freedom, UB)线在 ± 1.96 间相交于 1996、1998、2002 和 2003 年。采用滑动 t 法进行检验,超过显著性水平线的是 1996 年。结合 M-K 检验和滑动 t 检验,中国北方热浪频次在 1996 年附近发生突变。

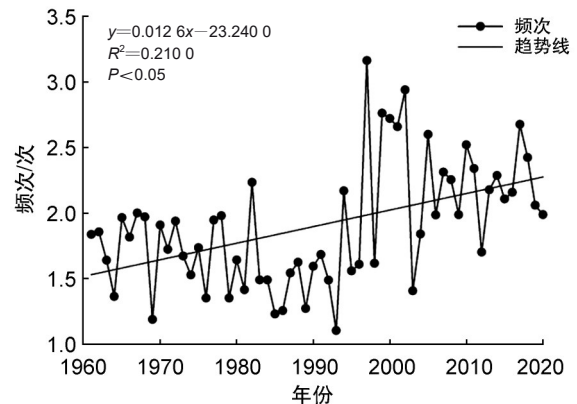


图4 1961—2020年中国北方热浪频次年际变化

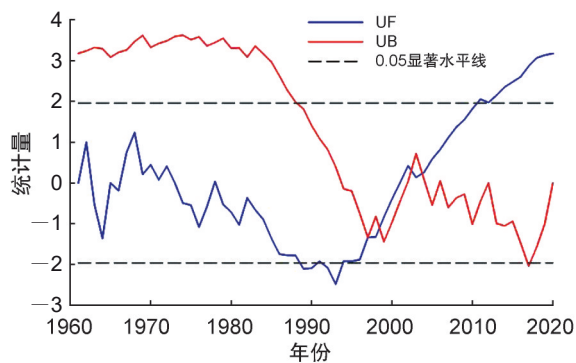
Fig. 4 Interannual variations in the heat wave frequency in North China during 1961-2020

2.2 热浪持续日数分布特征

2.2.1 热浪持续日数的空间分布特征

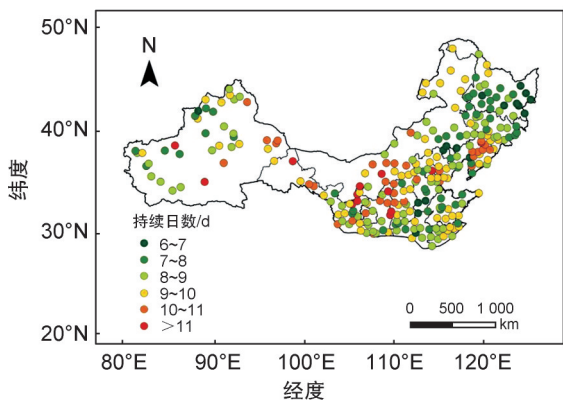
中国北方气象站点热浪持续日数的空间分布(图 6)显示,热浪持续日数在 $7 \text{d} \sim 8 \text{d}$ 、 $8 \text{d} \sim 9 \text{d}$ 以及 $9 \text{d} \sim 10 \text{d}$ 的站点共占比 73.72%,其中有 54 个站点热浪持续时间在 $7 \text{d} \sim 8 \text{d}$ 且多分布于华北平原和东北平原。热浪持续日数在 $8 \text{d} \sim 9 \text{d}$ 和 $9 \text{d} \sim 10 \text{d}$ 的站点分布于华北平原、黄土高原和东北平原。热浪持续日数大于 10d 的站点占比 20.23%。从空间分布上看,多分布在山西、陕西、甘肃、内蒙古、新疆和辽宁六省的

大部分地区。有17个站点的数据显示热浪持续日数大于11 d,其中10个站点位于西北地区。位于晋西吕梁山南麓的山西省隰县(110°57'E,36°42'N)热浪持续日数达到了14.51 d,数据表明整个夏季该地区约有14 d以上都处在热浪笼罩中。另外,位于宁夏吴忠市的红寺堡区(106°11'E,37°59'N)附近地区,热浪持续日数也达到了15.72 d。晋北和我国西北地区持续日数较长,华北平原、新疆和东三省部分地区持续时间较短。总体上,热浪持续日数的空间分布与热浪发生频次的空间分布具有一定的统一性。



注:图中M-K统计曲线为突变检验的结果,UF为标准正态分布序列,UB = -UF。当UF、UB曲线存在交点并处于置信区间(0.05显著性水平线)内,则认为该交点对应的时刻为突变点。当出现多个突变点时,使用滑动t检验对突变点进一步确定。

图5 1961—2020年中国北方热浪频次M-K统计量曲线
Fig. 5 M-K statistical curves of heat wave frequency in North China during 1961-2020

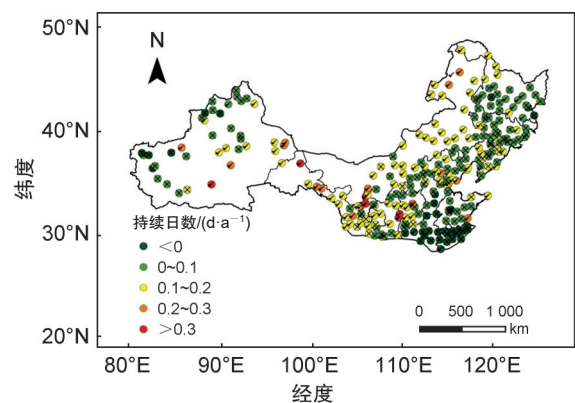


注:热浪持续日数是某个站点某年热浪事件最大持续天数。
图6 1961—2020年中国北方热浪持续日数空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of heat wave duration days in North China during 1961-2020

2.2.2 热浪持续日数的空间分布变化趋势

对近60年来中国北方热浪持续日数变化趋势进行空间分析(图7),发现热浪持续日数主要呈现增加趋势。从空间分布上看,热浪持续日数变化率呈现北高南低的特点。变化率在0以下的站点有35个,主要分布在研究区南部的华北平原。其中变化率最小值出现在安徽阜阳(115°44'E,32°52'N),该站点热浪持续日数变化率以 $-0.1 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率显著下降($P < 0.05$)。热浪持续日数变化率在 $0\sim 0.1 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.1\sim 0.2 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 的站点占据中国北方大部分地区。从空间分布上看,主要分布在东北平原和黄土高原,内蒙古、新疆和甘肃等地也有分布。热浪持续日数变化率大于 $0.3 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 的站点多位于西北地区。



注:×表示未通过0.05显著性检验。

图7 1961—2020年中国北方热浪持续日数变化趋势及其显著性

Fig. 7 The change trend and significance level of heat wave duration days in North China during 1961-2020

2.2.3 热浪持续日数年际变化特征

1961—2020年中国北方热浪持续日数(图8)以约 $0.0859 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 的线性速率显著增加($P < 0.05$)。近60年来中国北方夏季的平均热浪持续日数为8.5 d,热浪持续日数在3 d~19 d之间波动。21世纪以来,热浪持续日数处于较高阶段,在5.0 d~17.0 d之间波动。2000—2020年间,只有两年的热浪持续日数低于8.0 d,其中2003年为5.5 d,2012年为6.3 d。

结合M-K检验和滑动t检验方法对热浪持续日数进行突变分析,分析结果如图9所示。UF线和UB线在 ± 1.96 间相交于1996、1998、2002和2004年。采用滑动t检验法进行验证,

超过显著性水平线的是1996年。结合M-K检验和滑动t检验,中国北方热浪持续日数在1996年附近发生突变。

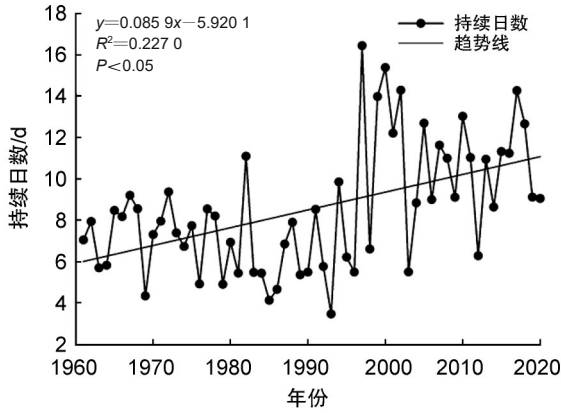
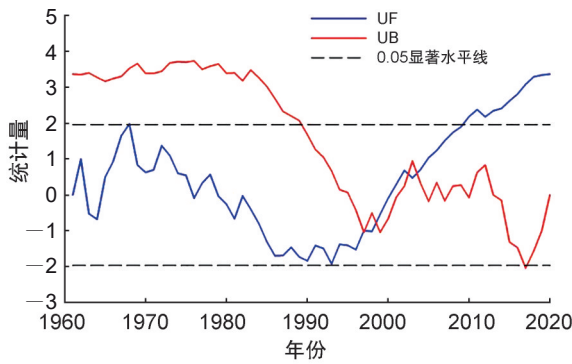


图8 1961—2020年中国北方热浪持续日数年际变化
Fig. 8 Interannual variations in the heat wave duration days in North China during 1961-2020



注:图中M-K统计曲线为突变检验的结果,UF为标准正态分布序列,UB = -UF。当UF、UB曲线存在交点并处于置信区间(0.05显著性水平线)内,则认为该交点对应的时刻为突变点。当出现多个突变点时,使用滑动t检验对突变点进一步确定。

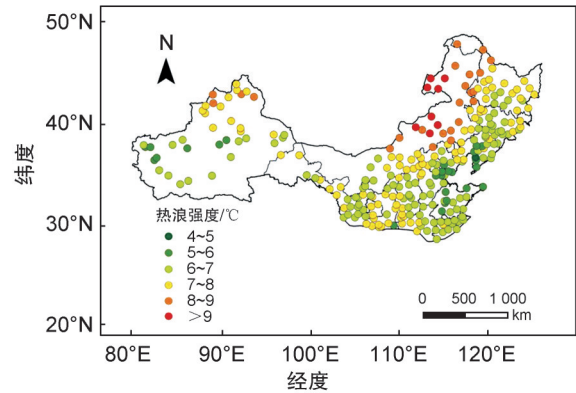
图9 1961—2020年中国北方热浪持续日数M-K统计量曲线
Fig. 9 M-K statistical curves of heat wave duration days in North China during 1961-2020

2.3 热浪强度分布特征

2.3.1 热浪强度的空间分布特征

由中国北方热浪强度的空间分布(图10)来看,热浪强度总体呈现北高南低的特征,且空间差异显著。辽宁营口(122°10'E,40°39'N)热浪强度最低,为4.9℃。热浪强度在6℃~7℃之间的站点占比42.66%,从空间分布上看,站点分布分散,整个研究区都有分布。热浪强度在8~9℃之间的站点占比10.83%,大部分处于新疆、内蒙古和东北三省地区。热浪强度大于9.0℃

的站点有8个,全部站点都位于内蒙古自治区。

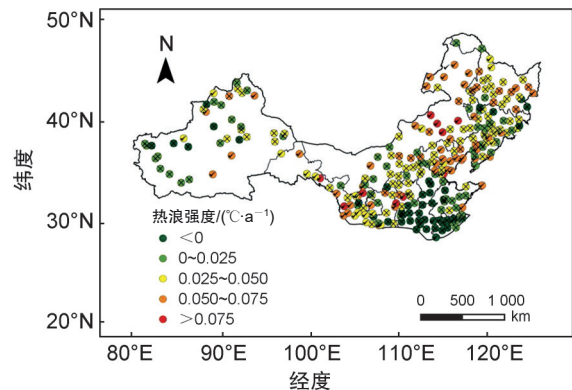


注:热浪强度为热浪事件期间温度峰值与气候态温度的差;气候态温度为气候基准期内,以当天为中心的11天窗口期间逐日最大温度的平均值。

图10 1961—2020年中国北方热浪强度空间分布特征
Fig. 10 Spatial distribution characteristics of heat wave intensity in North China during 1961-2020

2.3.2 热浪强度的空间分布变化趋势

从气象站点热浪发生强度变化趋势(图11)来看,热浪强度变化率在0.025~0.050℃·a⁻¹的站点占多数,有95个站点。热浪强度变化率低于0的站点多处于研究区南部的华北平原,其中安徽砀山(116°20'E,34°26'N)热浪强度变化率最低,为-0.060℃·a⁻¹(P<0.05)。热浪频次在0.050~0.075℃·a⁻¹之间的站点主要分布于东北三省、新疆、甘肃和内蒙古地区。热浪强度变化率在0.075℃·a⁻¹以上的站点有15个。总体来看,热浪强度变化率高的站点处于内蒙古高原和黄土高原,而热浪强度变化率低的站点处于华北平原。



注:×表示未通过0.05显著性检验。

图11 1961—2020年中国北方热浪强度变化趋势及其显著性
Fig. 11 The change trend and significance level of heat wave intensity in North China during 1961-2020

2.3.3 热浪强度年际变化特征

由热浪强度年际变化(图12)可以看出,近60年来中国北方夏季热浪强度在 $5.9^{\circ}\text{C}\sim 8.2^{\circ}\text{C}$ 之间波动。其中1972年、2000年、2001年、2010年热浪强度超过了 8.0°C 。21世纪以来,热浪强度在 $6.5^{\circ}\text{C}\sim 8.2^{\circ}\text{C}$ 间波动震荡,2001年达到峰值(8.3°C)。整体来看,热浪频次以约 $0.0078^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 的线性速率显著增加($P<0.05$)。

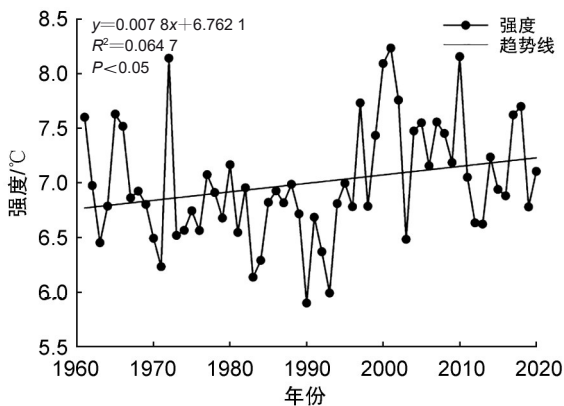
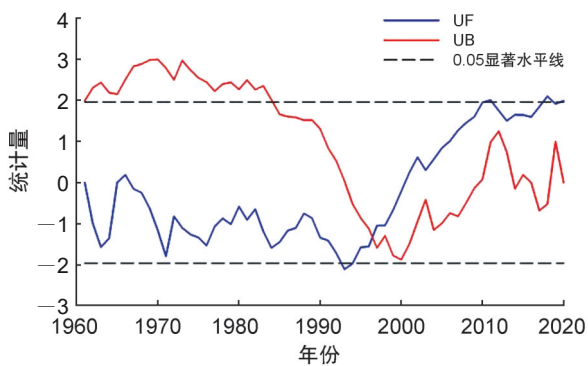


图12 1961—2020年中国北方热浪强度年际变化

Fig. 12 Interannual variations in the heat wave intensity in North China during 1961-2020

结合M-K检验和滑动t检验方法对热浪持续日数进行突变分析,分析结果如图13。从结果可以看出,UF线和UB线在 ± 1.96 间相交于1996年。说明中国北方热浪强度在1996年附近发生突变。



注:图中M-K统计曲线为突变检验的结果,UF为标准正态分布序列,UB = -UF。当UF、UB曲线存在交点并处于置信区间(0.05显著性水平线)内,则认为该交点对应的时刻为突变点。当出现多个突变点时,使用滑动t检验对突变点进一步确定。

图13 1961—2020年中国北方热浪强度M-K统计量曲线

Fig. 13 M-K statistical curves of heat wave intensity in North China during 1961-2020

3 讨论

本文研究结果表明20世纪60年代以来,我国热浪频次、持续日数和强度总体呈现增多、增强趋势,这种变化态势与前人有关研究的结论基本一致。比如:邢佩等^[25]研究了华北地区热浪时空特征,本文的研究结果与之类似。吴锦成等^[14]、贾佳^[26]等分析了中国热浪时空变化,本文与之重叠部分的研究结果相似。贾佳等^[26]提出,华北和西北地区热浪频次的突变年份为1996年,与本文研究结果相同。本文的热浪时空变化趋势也与吴瑞曦等^[27]和贾佳等^[26]关于中国北方热浪频次、持续日数、强度时空变化研究结果基本一致。热浪在中国北部的高纬度高海拔寒冷地区增加趋势更显著,本文结论与肖安等^[28]研究结果大致相同。

从空间分布来看,我国北方地区热浪频次、持续日数和强度具有高度统一性。热浪频次、持续日数和强度变化率较小的站点位于东北地区和华北南部。出现以上结果的主要原因如下^[29]:首先,随着城市化和工业化速度的加快,极端气候事件日益增多,城市化和工业化速度较快的北京、天津等地热浪增多。其次,中国北方水资源分布不均。研究表明,近年来新疆的灌溉水需求增加,而东北地区灌溉水需求表现为负增长,水资源充足。因此东北三省的部分地区热浪频次、持续日数和强度变化趋势很小。最后,三北防护林、退耕还林、退耕还草等生态工程大幅提高了研究区东北部的植被覆盖。因此,中国北方地区植被覆盖度增加的区域集中在华北南部和东北地区。

从时间变化来看,中国北方热浪频次、持续日数和强度均呈现显著增加的趋势,并在1996年附近发生突变。中国北方热浪三个指标均在1996年前后发生突变,可能与北大西洋涛动有关^[30]。在20世纪90年代中期,北大西洋涛动进行了一个正负相位转变。当夏季北大西洋涛动位于负位相,涡旋驱动的急流会导致北大西洋急流东伸,这会进一步造成北大西洋急流和亚非急流之间连接,增强波导。而急流出口区域异常气旋性涡旋会激发Rossby波更容易进入亚非急流,进一步增强了研究区上空反气旋环流异常,导致水汽输送不足,降水减少,引起热

浪事件频发。

总体来看,大气环流异常特别是西太平洋副热带高压的异常,是造成持续高温天气最直接的原因。另外,在城市化进程加快的大背景下,城市热岛效应成为影响热浪事件的另一重要原因^[29]。最后,地理位置和地形因素也会影响热浪。中国北方地区地势西高东低。本文结果显示,热浪频次、持续日数、强度等指标较高的站点多分布于内蒙古高原、黄土高原等地,而热浪3个指标较低的站点分布于东北平原等地,且指标变化的倾向率也呈现西部高东部低的特征。

尽管本文较为清楚地阐明了近60年中国北方范围内的热浪的变化态势,但对于研究区内热浪事件的产生机理及其对社会经济发展、居民健康生活以及生态环境变化等的影响方面仍有待进一步深入分析,以便更深入地了解当前的气候变化、并为解释未来的气候预测提供坚实的基础。

4 结论

利用1961—2020年中国北方气象站点逐日最高气温观测数据,本文分析了中国北方夏季热浪频次、持续日数和强度等时空变化特征。研究发现:从空间分布来看,近60年来,中国北方地区全部站点均出现过热浪过程。热浪三个指标的高值区域均分布在新疆、内蒙古和黄土高原地区;低值区域分布在安徽地区、江苏地区、华北平原和东北平原地区。中国北方各站点热浪发生频次、持续日数与强度变化趋势均以增加为主。总体而言呈现北高南低的变化特征。从时间尺度上看,1961至2020年研究区夏季热浪频次、持续日数和强度均呈现显著增加趋势。

参考文献:

- [1] LENTON T M, XU C, ABRAMS J F, *et al.* Quantifying the Human Cost of Global Warming[J]. *Nat Sustain*, 2023, **6**: 1237–1247. DOI: 10.1038/s41558-023-01620-9.
- [2] IELPI A, LAPÔTRE M G A, FINOTELLO A, *et al.* Large Sinuous Rivers are Slowing down in a Warming Arctic[J]. *Nat Clim Change*, 2023, **13**: 375–381. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.08.08.
- [3] BAO T, JIA G S, XU X Y. Weakening Greenhouse Gas Sink of Pristine Wetlands Under Warming[J]. *Nat Clim Change*, 2023, **13**: 462–469. DOI: 10.1038/s41558-023-01637-0.
- [4] WANYAMA D, BUNTING E L, WEIL N, *et al.* Delineating and Characterizing Changes in Heat Wave Events Across the United States Climate Regions[J]. *Clim Change*, 2023, **176** (2): 6. DOI: 10.1007/s10584-022-03476-y.
- [5] COWAN T, UNDORF S, HEGERL G C, *et al.* Present-day Greenhouse Gases could Cause more Frequent and Longer Dust Bowl Heatwaves[J]. *Nat Clim Change*, 2020, **10**: 505–510. DOI: 10.1038/s41558-020-0771-7.
- [6] KING M J, REEDER M J. Extreme Heat Events from an Object Viewpoint with Application to South-east Australia[J]. *Int J Climatol*, 2021, **41**(4): 2693–2709. DOI: 10.1002/joc.6984.
- [7] PALACIOS-PEÑA L, STIER P, LORENTE-PLAZAS R, *et al.* Quantifying the Sensitivity of Aerosol Optical Properties to the Parameterizations of Physico-chemical Processes during the 2010 Russian Wildfires and Heatwave[J]. *Atmos Chem Phys*, 2020, **20**(16): 9679–9700. DOI: 10.5194/acp-20-9679-2020.
- [8] 蔡榕硕, 郭海峡, AMRO A, 等. 全球变化背景下暖水珊瑚礁生态系统的适应性及修复研究[J]. *应用海洋学报*, 2021, **40**(1): 12–25. DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972.2021.01.002.
- CAI R S, GUO H X, AMRO A, *et al.* A Study on the Adaptation and Restoration of Warm Water Coral Reef Ecosystem in the Context of Global Change[J]. *J Appl Oceanogr*, 2021, **40**(1): 12–25. DOI: 10.3969/J. ISSN.2095-4972.2021.01.002.
- [9] DALTON S J, CARROLL A G, SAMPAYO E, *et al.* Successive Marine Heatwaves Cause Disproportionate Coral Bleaching During a Fast Phase Transition from El Niño to La Niña[J]. *Sci Total Environ*, 2020, **715**: 136951. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136951.
- [10] PERKINS-KIRKPATRICK S E, LEWIS S C. Increasing Trends in Regional Heatwaves[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 3357. DOI: 10.1038/s41467-020-16970-7.
- [11] COUMOU D, ROBINSON A, RAHMSTORF S. Global Increase in Record-breaking Monthly-mean Temperatures[J]. *Clim Change*, 2013, **118**(3): 771–782. DOI: 10.1007/s10584-012-0668-1.
- [12] ULLAH S, YOU Q L, CHEN D L, *et al.* Future Population Exposure to Daytime and Nighttime Heat Waves in South Asia[J]. *Earth's Future*, 2022, **10**(5): e2021EF002511. DOI: 10.1029/2021ef002511.
- [13] ZAMPIERI M, RUSSO S, DI SABATINO S, *et al.*

- Global Assessment of Heat Wave Magnitudes from 1901 to 2010 and Implications for the River Discharge of the Alps[J]. *Sci Total Environ*, 2016, **571**: 1330–1339. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.008.
- [14] 吴锦成, 朱焯, 刘懿, 等. 中国热浪时空变化特征分析[J]. 水文, 2022, **42**(3): 72–77. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210402.
WU J C, ZHU Y, LIU Y, *et al.* Spatial-temporal Characteristics of Heat Waves in China[J]. *J China Hydrol*, 2022, **42**(3): 72–77. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210402.
- [15] 张月, 肖天贵, 曾珏桃, 等. 1979—2019年我国西南地区高温热浪时空分布特征研究[J]. 自然科学, 2020, **8**(4): 207–219. DOI: 10.12677/ojns.2020.84027.
ZHANG Y, XIAO T G, ZENG J T, *et al.* Study on Spatiotemporal Distribution Characteristics of High Temperature and Heat Waves in Southwest China from 1979 to 2019[J]. *Open J Nat Sci*, 2020, **8**(4): 207–219. DOI: 10.12677/ojns.2020.84027.
- [16] CHENG Q P, JIN H Y, REN Y T. Compound Daytime and Nighttime Heatwaves for Air and Surface Temperature Based on Relative and Absolute Threshold Dynamic Classified in Southwest China, 1980-2019[J]. *Sustain Cities Soc*, 2023, **91**: 104433. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104433.
- [17] TAO P H, ZHANG Y C. Large-scale Circulation Features Associated with the Heat Wave over Northeast China in Summer 2018[J]. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2019, **12**(4): 254–260. DOI: 10.1080/16742834.2019.1610326.
- [18] ZHOU J, YU H P, XU P Q, *et al.* Extreme Heat Event over Northwest China Driven by Silk Road Pattern Teleconnection and Its Possible Mechanism[J]. *Atmos Res*, 2024, **297**: 107090. DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107090.
- [19] LI Y, GAO Q J, YOU Q, *et al.* Intraseasonal Oscillation Features of the Two Types of Persistent High Temperature Events over Jiangnan Region[J]. *Atmosphere*, 2023, **14**(1): 185. DOI: 10.3390/atmos14010185.
- [20] 何苗, 徐永明, 莫亚萍, 等. 基于多源遥感数据的北京市高温热浪风险综合评估[J]. 地理科学, 2023, **43**(7): 1270–1280. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.07.014.
HE M, XU Y M, MO Y P, *et al.* Assessment of Heat Wave Risk in Beijing Using Multi-source Remote Sensing Data[J]. *Sci Geogr Sin*, 2023, **43**(7): 1270–1280. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.07.014.
- [21] 陈阳, 马龙, 刘廷玺, 等. 中国北方地区年降水与气温关系及其时空变异性[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(1): 135–145. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.01.016.
CHEN Y, MA L, LIU T X, *et al.* The Relationship between Annual Precipitation and Temperature and Its Spatiotemporal Variability in Northern China[J]. *Ecol Environ Sci*, 2021, **30**(1): 135–145. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.01.016.
- [22] HOBDAY A J, ALEXANDER L V, PERKINS S E, *et al.* A Hierarchical Approach to Defining Marine Heatwaves[J]. *Prog Oceanogr*, 2016, **141**: 227–238. DOI: 10.1016/j.pocean.2015.12.014.
- [23] 王爱梅, 王慧, 范文静, 等. 2019年中国近海海洋热浪特征研究[J]. 海洋学报, 2021, **43**(6): 35–44. DOI: 10.12284/hyxb2021076.
WANG A M, WANG H, FAN W J, *et al.* Study on Characteristics of Marine Heatwave in the China Offshore in 2019[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, **43**(6): 35–44. DOI: 10.12284/hyxb2021076.
- [24] LI L, WANG L, FENG T, *et al.* Multi-index Analysis of Spatiotemporal Variations of Dry Heat Waves and Humid Heat Waves in China[J]. *Atmosphere*, 2023, **14**(11): 1660. DOI: 10.3390/atmos14111660.
- [25] 邢佩, 杨若子, 杜吴鹏, 等. 1961—2017年华北地区高温日数及高温热浪时空变化特征[J]. 地理科学, 2020, **40**(8): 1365–1376. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.08.016.
XING P, YANG R Z, DU W P, *et al.* Spatiotemporal Variation of High Temperature Day and Heat Wave in North China During 1961-2017[J]. *Sci Geogr Sin*, 2020, **40**(8): 1365–1376. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.08.016.
- [26] 贾佳, 胡泽勇. 中国不同等级高温热浪的时空分布特征及趋势[J]. 地球科学进展, 2017, **32**(5): 546–559. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2017.05.0546.
JIA J, HU Z Y. Spatial and Temporal Features and Trend of Different Level Heat Waves over China[J]. *Adv Earth Sci*, 2017, **32**(5): 546–559. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2017.05.0546.
- [27] 吴瑞曦, 曾刚, 杨效业, 等. 中国北方盛夏高温日数的年代际变化特征及其与蒙古高原土壤湿度的联系[J]. 地球物理学进展, 2021, **36**(1): 78–87. DOI: 10.6038/pg2021EE0078.
WU R X, ZENG G, YANG X Y, *et al.* Interdecadal Variability of Mid-summer High Temperature Days in Northern China and Its Association with Soil Moisture in Mongolian Plateau[J]. *Prog Geophys*, 2021, **36**(1): 78–87. DOI: 10.6038/pg2021EE0078.
- [28] 肖安, 周长艳. 基于超热因子的中国热浪事件气候特征分析[J]. 气象, 2017, **43**(8): 943–952. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.005.
XIAO A, ZHOU C Y. Characteristic Analysis of the Heat Wave Events over China Based on Excess Heat Factor[J]. *Meteor Mon*, 2017, **43**(8): 943–952. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.005.

- 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.005.
- [29] 邓甜甜, 耿广坡, 杨睿, 等. 1980—2020年渭河流域高温热浪时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2023, **46**(2): 211-221. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2022.214.
- DENG T T, GENG G P, YANG R, *et al.* Temporal and Spatial Variation Characteristics of High Temperature and Heat Wave in the Weihe River Basin from 1980 to 2020[J]. *Arid Land Geogr*, 2023, **46**(2): 211-221. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2022.214.
- [30] DU Y B, ZHANG J, ZHAO S W, *et al.* Impact of the Eastward Shift in the Negative-phase NAO on Extreme Drought over Northern China in Summer[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2020, **125**(16): e2019jd032019. DOI: 10.1029/2019jd032019.