张兴山，王娟怀，赵亮，等，2022. 1960—2020 年京津冀高温热浪时空分布特征[J]. 气象与减灾研究，45(3)：179-186.
Zhang Xingshan, Wang Juanhuai, Zhao Liang, et al, 2022. Temporal-spatial characteristics of summer heat wave in Beijing-Tianjin-Hebei region during 1960－2020[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research，45(3)：179-186.

1960—2020 年京津冀高温热浪时空分布特征

张兴山[1]，王娟怀[2]，赵　亮[3]，李　猛[1]，包永虎[1]

1. 邯郸市气象局，河北 邯郸　056001
2. 广东省气候中心，广东 广州　510080
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： 利用 1960—2020 年京津冀 83 个气象观测站常规观测资料，统计分析了京津冀高温热浪日数、频次、有效积温分布特征及变化规律。结果表明：1）气候态上，京津冀高温热浪日数、频次和有效积温在空间上均呈现南多(强)北少(弱)的分布特征，大值区均位于 39°N 以南。2）京津冀地区高温热浪具有 2—5 a 显著的短振荡周期，同时也具有“多—少—多—少”的年代际变化特征；高温热浪日数、频次和有效积温均出现了 3 次突变点，并且第一次和第二次突变较第三次突变明显。3）对比两次高温热浪日数集中偏多期发现，最近一个偏多集中期(1996—2005 年)相对于上一个(1960—1972 年)表现为北增南减的特征；对比两次偏少集中期发现，最近一个偏少集中期(2006—2020 年)相对于上一个(1973—1995 年)表现为中南部整体增加的特征，且高温热浪日数大于 4 d 的影响区域均呈扩大的态势。

关键词： 高温热浪，有效积温，时空特征，京津冀
中图分类号： P468　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1007-9033(2022)03-0179-08
doi：10.12013/qxyjzyj2022-026

Temporal-Spatial Characteristics of Summer Heat Wave in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 1960－2020

Zhang Xingshan[1], Wang Juanhuai[2], Zhao Liang[3], Li Meng[1], Bao Yonghu[1]

1. *Handan Meteorological Bureau*, *Handan* 056001, *China*
2. *Guangdong Climate Center*, *Guangzhou* 510080, *China*
3. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmosphere Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG)*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029, *China*

Abstract: Based on 83 meteorological observation stations data in Beijing-Tianjin-Hebei region during 1960－2020, the distributions of heat wave days, heat wave frequency, effective accumulated high temperature and their variations were analyzed. The results showed that: 1) The number of days, frequency and effective accumulated temperature of the high temperature heat wave in Beijing-Tianjin-Hebei all presented spatial distribution pattern of more (stronger) in the south and less (weaker) in the north, and the larger value areas located in the south of 39°N. 2) The high temperature heat wave in the Beijing-Tianjin-Hebei region presented a significant short oscillation period of 2－5 a, and the characteristics of intergenerational change showed “more-less-more-less”. Three mutations occurred in the number of days, frequency and effective accumulated temperature of the high temperature heat wave. Meanwhile, the first and second mutations were more obvious than the third one. 3) The more concentrated period of high temperature heat wave days presented “north increase and south decrease” during 1996－2005 compared with the previous one (1960－1972). Similarly, the latest less concentrated period (2006－2020) showed the charac-

收稿日期：2022-03-28；**修订日期**：2022-07-23.
基金项目：中国科学院战略性先导科技专项(A 类)子课题(编号：XDA20100304)；国家自然科学基金项目(编号：42075040).
作者简介：张兴山，工程师，主要从事天气预报及专业气象服务，E-mail：604631940@qq.com.
赵　亮(通信作者)，副高级工程师，主要从事气候预测和极端天气气候研究，E-mail：zhaol@lasg.iap.ac.cn.

teristics of "overall increase in central and southern China" and the influence areas of greater than 4 d expanded compared with the previous one (1973－1995).

Key words: heat wave; EAHT; temporal and spatial characteristics; Beijing-Tianjin-Hebei region

0 引 言

IPCC 第 6 次评估报告指出,人类影响造成的气候变暖正以 2000 年以来前所未有的速度发生,在五个排放情景下,到本世纪中叶全球地表温度都将继续上升(李柏贞等,2016;Ting et al,2021)。在气候变暖背景下,高温热浪发生愈加频繁,2015 年欧洲遭遇 500 a 来最强的一次热浪(邵勰等,2016);2021 年 8 月 3 日,希腊和土耳其一些地区的气温超过 46 ℃,突破当地历史极值。高温热浪具有高影响和高致灾性(陈正洪和杨桂芳,2012;吴绍洪等,2017),现成为气候变化研究的热点问题(陈敏等,2013;陈升孛等,2013;叶殿秀等,2013;王丽伟等,2015;杨续超等,2015;祁新华等,2016)。国内外学者对高温及高温热浪也开展了大量研究。Green 等(2016)指出近年来,英国高温热浪的发生频次与强度均呈增多(强)趋势,表现在高温热浪及极端最高气温和长时间热浪更易发生。王倩云等(2016)发现欧洲大陆热浪发生频率在 20 世纪 80 年代以后呈明显增多趋势。贾佳和胡泽勇(2017)指出中国高温热浪发生频次同样呈显著的上升趋势,沈皓俊等(2018)进一步研究发现 1998 年后全国高强度热浪频发。

京津冀(113°29′—119°58′E,36°01′—42°35′N)地处华北平原北部,西倚太行,北连蒙古高原,东濒渤海。全境大体由高原、山地和平原三部分组成,并自西北向东南依次排列,形成西北高、东南低的地势(图 1)。京津冀气候属于温带半湿润半干旱大陆性季风气候,夏季炎热潮湿,在盛夏人畜因高温而死亡或间接死亡的事件时有发生。近几十年,随着京津冀一体化进程不断加快,城市化过程举世瞩目,已有学者对京津冀的高温热浪过程进行了研究。施洪波(2011)分析 1960—2008 年京津冀地区夏季高温日数时空变化特征,发现京津冀地区夏季高温日数在空间上呈南多北少,且南减北增的变化趋势;史印山等(2009)对京津冀高温天气时空分布和环流特征进行分析,指出京津冀地区高温天气与区域干旱具有高耦合性,北半球 500 hPa 环流异常可作为高温天气预测依据;李双双等(2015)对京津冀地区热浪时空变化特征及影响因素,指出西太平洋副热带高压和青藏高原反气旋环流与京津冀地区热浪异常关系最为显著,对热浪异常是一种稳定且强烈的指示信号。以上研究虽然在京津冀地区气候变化和高温天气事件认识取得了成效,但是所选用的资料时段均比较短,未能完全体现最近十多年来京津冀高温频发的特征。因此,考虑到京津冀长时间序列、全区域高温及高温热浪空间变化研究较少,文中选取京津冀地区作为研究对象,利用线性倾向率、突变检验、Morlet 小波分析等方法,对 1960—2020 年京津冀高温热浪的空间特征、变化趋势、突变和周期进行分析,揭示京津冀高温热浪发生、发展和演变规律,以期为科学适应和应对气候变化提供参考。

1 数据与方法

文中选取河北省气象局整编的 1960—2020 年京津冀地区 83 个地面气象站夏季(6—8 月)逐日最高气温数据,站点分布如图 1 所示。

根据中国气象局规定,日最高气温大于等于 35 ℃为一个高温日。文中定义高温日连续 3 d 及以上为一次高温热浪过程。其中高温热浪日数为高温热浪期间的高温日数;高温热浪频次为高温热浪发生的次数;高温有效积温为高温热浪期间每日最高气温与35℃阈值之差的累积和,有效积温越大炎

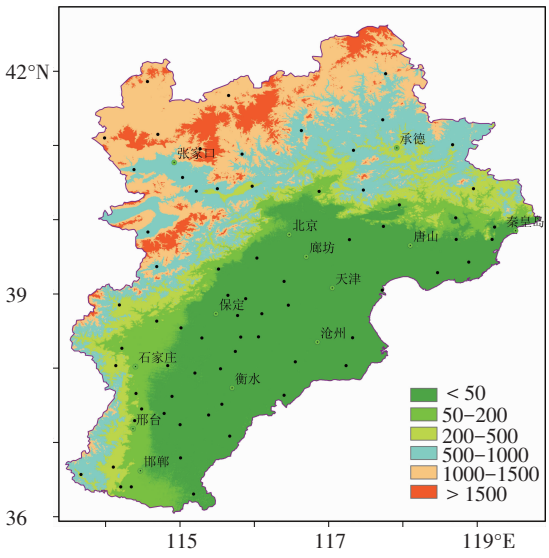


图 1 京津冀地形高程(单位:m)及气象站点分布

Fig. 1 Geographic map (unit: m) and distribution of meteorological stations in Beijing-Tianjin-Hebei Region

热程度越重。在计算地区平均时,参考高荣等(2008)的方法,去除气候平均高温热浪日数小于 1 d 的站点,只对高温热浪日数大于等于 1 d 的站点的高温热浪日数、频次、有效积温进行平均。气候变化趋势为站点时间序列的线性回归系数。

2 空间分布特征

分析 1960—2020 年京津冀夏季平均高温热浪日数、频次、有效积温的空间分布(图 2)可见,高温热浪日数、频次分布形态较类似,整体呈现南多北少的分布特征,大值区均位于 39°N 以南,大值中心位于邢台中东部地区。而高温热浪有效积温的空间分布,整体虽然呈南多北少特征,但大值中心向西北沿山一带偏移,中心位于石家庄赞皇地区。

1960—2020 年夏季平均高温热浪日数空间变化较大(图 2a),范围为 0(西北康宝等地)—9.3 d/a(邢台南宫),全省平均为 4.3 d/a,39°N 以南地区热浪期间高温日数基本在 5 d/a 以上,对高温日数的贡献率达到 50%左右,尤其中南部平原地区贡献率达到 55.4%(邢台冀州),39°N 以北地区分布较为分散,贡献率为 20%—40%,并向北递减。

1960—2020 年夏季平均每年高温热浪频次(图 2b)范围为 0(西北康宝等地)—2.3 次(邢台隆尧),换言之,西北康宝等地在此期间没有发生过高温热浪,而邢台隆尧地区年均出现 2.3 次高温热浪,夏季全省平均每年为 1.1 次。39°N 以南地区基本在 1 次以上,83 个台站中有 7 站年均出现 2 次以上,1—2 次的有 38 个站,1 次以下的有 31 个站,没有出现过高温热浪的有 7 个站。

夏季高温热浪有效积温的空间分布(图 2c)则反映了京津冀夏季的炎热程度及高温危害程度,其范围为 0(西北康宝等地)—9.7 ℃/次(石家庄赞皇),39°N 以南地区平均有效积温在 7 ℃/次以上,以赞皇为中心向北、东、南方向递减,大值中心相对高温日数、高温热浪频次向西北沿山一带偏移,其他地区分布形态与高温日数、高温热浪频次等相似,即石家庄赞皇地区的高温热浪日数和频次虽少于邢台隆尧等地,但该地区的高温危害程度却高于邢台隆尧,说明该地区高温危害尤为严重;39°N 以北地区同样存在一个大值中心,位于承德西南部,中心值达到 7.6 ℃,即北部地区虽然高温热浪频次和日数较南部少,但每次高温热浪过程的有效积温也较高,进一步说明北部地区的热浪过程的炎热程度较重。

前人对出现以上空间分布特征的成因分析较多,比较常见的结论有西太平洋副热带高压、青藏高原高空反气旋环流对京津冀热浪影响最为显著(李

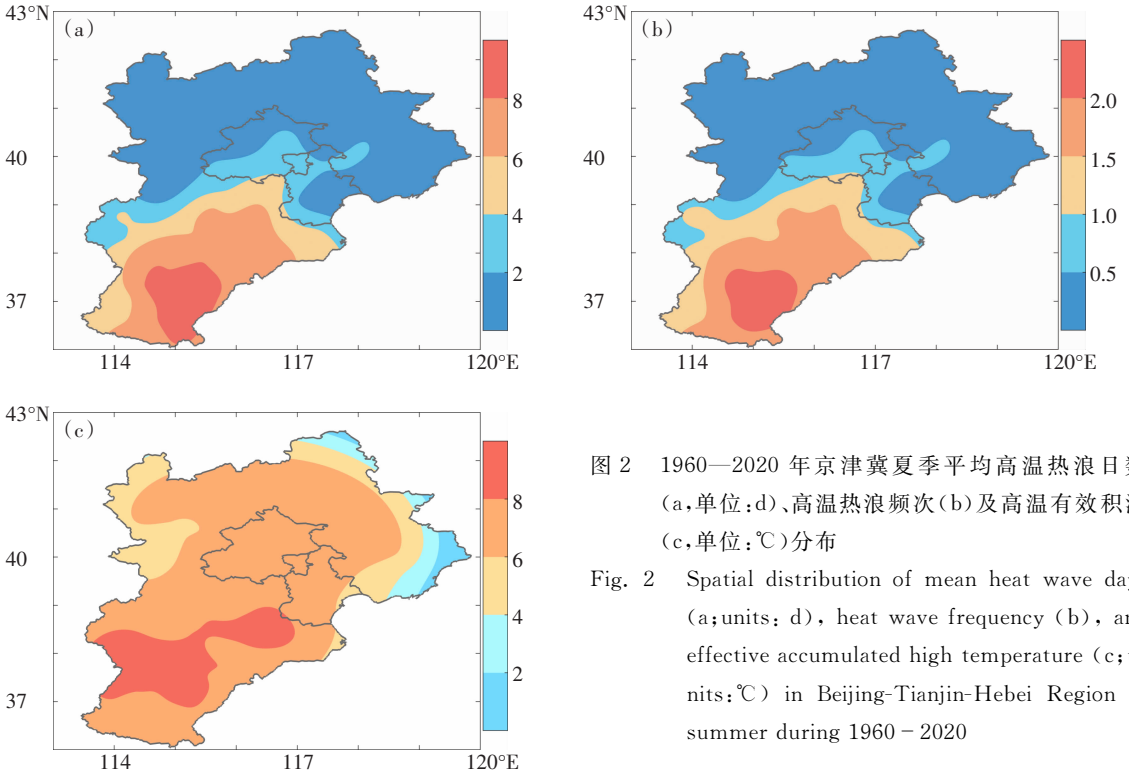


图 2 1960—2020 年京津冀夏季平均高温热浪日数(a,单位:d)、高温热浪频次(b)及高温有效积温(c,单位:℃)分布

Fig. 2 Spatial distribution of mean heat wave days (a;units: d), heat wave frequency (b), and effective accumulated high temperature (c;units:℃) in Beijing-Tianjin-Hebei Region in summer during 1960 - 2020

双双等,2015),太行山地形的影响使得强焚风出现在太行山东侧 50 km 内,其分布范围主要在保定、石家庄、邢台和邯郸西部,而弱焚风则可到达太行山以东 100 km 范围(王宗敏等,2012),因此在大尺度环流和地形等多重因素的共同作用下,高温热浪日数、频次呈现以中南部平原高值中心向四周减少的分布特征,强焚风的影响使得高温热浪有效积温大值中心向西北方向偏移。

3 趋势变化特征

3.1 空间趋势特征

分析京津冀地区夏季高温热浪日数、频次、有效积温气候变化趋势(图 3)发现,高温热浪日数、频次、有效积温气候变化趋势较为相似,中南部平原偏东地区及西部沿山地区、西北地区呈减小(减弱)趋势,其他地区呈增多(增强)趋势。其中,高温热浪日数和频次增加趋势较明显的地区主要位于石家庄、天津和北京等地,天津地区的增加趋势均通过信度 0.01 的显著性检验,石家庄和北京地区高温热浪日数以及北京的热浪频次均通过信度 0.05 的显著性检验。高温热浪日数和频次减少趋势较明显的地区主要位于邢台南宫地区(与图 2a、b 大值区相对应),但高温热浪频次的减小趋势通过了信度 0.05 的显著性检验。高温热浪有效积温增强趋势较明显的地区位于石家庄地区,通过信度 0.01 的显著性检验(与图 2c 高温热浪有效积温空间分布的大值区相对应),说明该地区的炎热程度进一步增强;减弱趋势较明显的地区位于邢台南宫地区,且通过信度 0.05 的显著性检验。

整体来看,京津冀地区的高温及高温热浪变化趋势仅有少数站点通过显著性检验,分析通过显著性的站点发现,京津冀地区的高温热浪在空间上呈现南北不同的变化特征,在高温热浪日数和频次的多年平均大值区,高温热浪日数和频次有减小的趋势,而在有效积温的多年平均大值区,有效积温有增强的趋势。

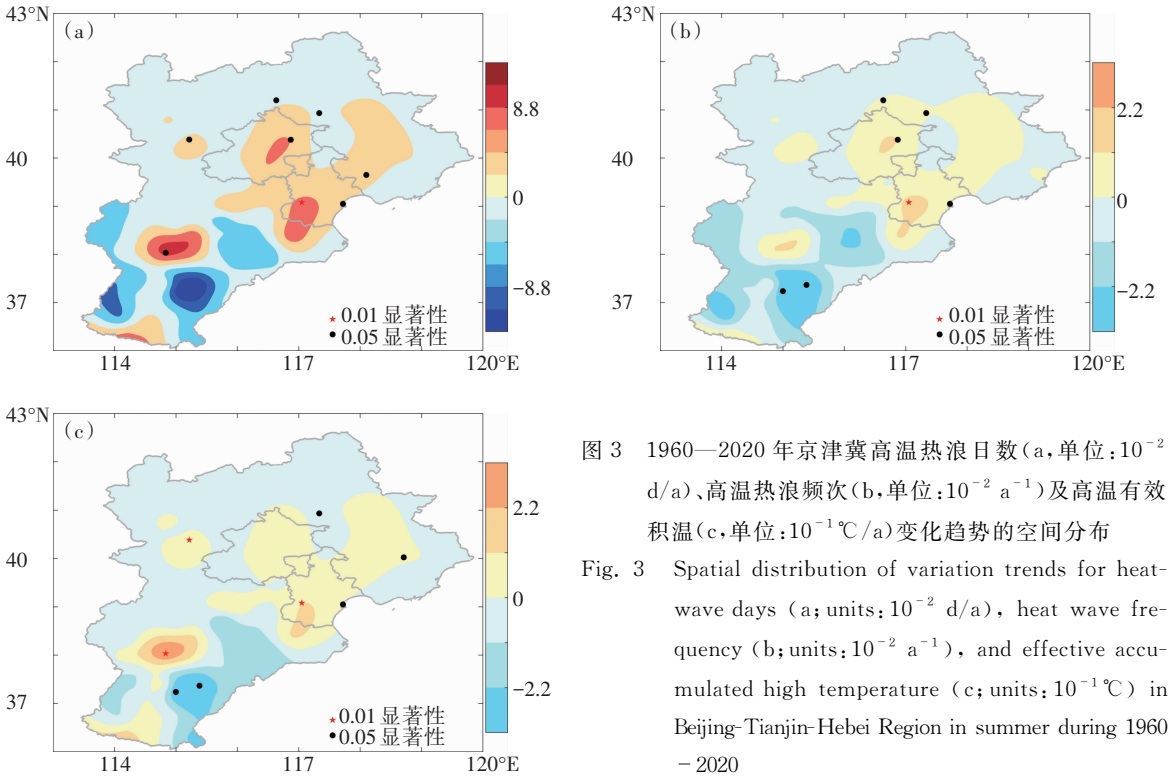


图 3 1960—2020 年京津冀高温热浪日数(a,单位:10^{-2} d/a)、高温热浪频次(b,单位:10^{-2} a^{-1})及高温有效积温(c,单位:10^{-1}℃/a)变化趋势的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of variation trends for heat-wave days (a; units: 10^{-2} d/a), heat wave frequency (b; units: 10^{-2} a^{-1}), and effective accumulated high temperature (c; units: 10^{-1}℃) in Beijing-Tianjin-Hebei Region in summer during 1960-2020

3.2 长期变化趋势

图 4 为 1960—2020 年京津冀夏季平均高温热浪日数逐年变化,高温热浪频次、有效积温的逐年变化(图略)与高温热浪日数的变化极为相似,分析可见,三者主要表现为“多—少—多—少”的年代际变化特征。利用滑动 t 检验方法,两个子序列长度取 10,分别对这 3 个时间序列进行突变检验,研究时段内 3 个时间序列均出现 3 个突变点,高温热浪日数的滑动 t 检验如图 4b,突变年份分别为 1972 年(通过信度0.05的显著性检验,为负值)、1995年(通过

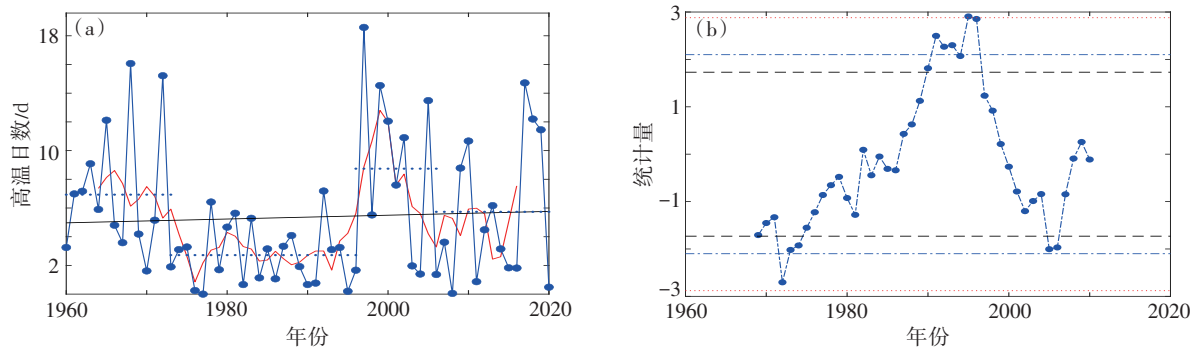


图 4 1960—2020 年京津冀地区夏季高温热浪日数的逐年变化(a)和滑动 t 检验统计量曲线(b)(a. 实心圆点实线代表实测值,蓝色虚线段为分段平均值,红实线为 9 a 滑动平均曲线;b. 点虚线、短虚线、长虚线分别为 0.01、0.05、0.1 显著性水平临界值)

Fig. 4 The yearly variations (a) and the moving t-test statistical quantity (b) of summer heat wave days (unit: d) in Beijing-Tianjin-Hebei region during 1960 - 2020 (a. solid dot represents the observed value, blue dashed is the segmented average, and solid red line is the 9-year moving average curve; b. dot-dashed, shorted dashed and long dashed lines indicate the threshold at confidence levels of 0.01, 0.05 and 0.1, respectively)

信度 0.01 的显著性检验,为正值)、2005 年(通过信度 0.1 的显著性检验,为负值)。以上说明京津冀夏季平均高温热浪日数、频次、有效积温在 1960—2020 年出现了 3 次明显突变,即在 20 世纪 70 年代初经历了由多到少的转变,90 年代中期经历由少到多的转变,之后到 21 世纪 00 年代中期又经历了由多到少的转变。

将 3 个突变年份视为时间节点,对 4 个振荡期分别进行线性拟合,得到 4 个振荡期的夏季平均高温热浪日数、频次和有效积温变化趋势。平均高温热浪日数、频次和有效积温均在 1960—1972 年、2005—2020 年呈现线性增加趋势,在 1973—1995 年、1996—2005 年线性减少趋势,但均未通过显著性检验。从整个时段来看,1960—2020 年呈现弱的线性增加趋势,但并不显著。

进一步对平均高温热浪日数、频次、有效积温的相邻振荡期利用 t 检验进行差异显著性检验,经计算,1960—1972 年与 1973—1995 年、1973—1995 年与 1996—2005 年 t 检验的 P 值均小于 0.05,通过信度 0.05 的显著性检验;1996—2005 年与 2005—2020 年 t 检验的 P 值均大于 0.1,差异不显著。这也进一步说明第一次和第二次的突变较第三次明显,表现特征与图 4b 一致。

整体来看,高温热浪日数、频次、有效积温均表现为"多—少—多—少"的年代际变化特征,出现了 3 次明显突变,4 个振荡期内无显著线性趋势,在 1972、1996 年突变前后振荡期差异有高度统计意义,2005 年突变前后振荡期差异无统计意义。

以上分析可见,高温热浪日数、频次、有效积温分别存在 2 个偏多、偏少集中期(表 1)。1960—1972 年和 1966—2005 年为偏多集中期,1973—1995 年和 2006—2020 年为偏少集中期。这两个偏多(少)集中期间的差异值得进一步研究,它可能一定程度上体现了人为活动导致的全球变化和自然变率导致的年代际振荡作用的叠加效应。两个偏多集中期的对比表明,偏多集中期高温热浪日数、频次、有效积温从 1960—1972 年的 6.9 d、1.7 次、13.9 ℃增至 1996—2005 年的 8.1 d、1.9 次、17.0 ℃,增加了 10%—20%;两个偏少集中期的对比表明,偏少集中期高温热浪日数、频次、有效积温从 1973—1995 年的 2.7 d、0.77 次、4.6 ℃增至 2006—2020 年的5.4d、1.3次、9.9 ℃,增加了70%—110%。

表 1 1960—2020 年京津冀夏季高温热浪日数、热浪频次、热浪有效积温的偏多、偏少集中期对比

Table 1 Comparison of summer heat wave days, heat wave frequency, and effective accumulated high temperature in Beijing-Tianjin-Hebei region during 1960 - 2020

集中期	时间段	高温热浪日数/d	高温热浪频次	高温热浪有效积温/℃
偏多期	1960—1972	6.9	1.7	13.9
	1996—2005	8.1	1.9	17.0
偏少期	1973—1995	2.7	0.8	4.6
	2006—2020	5.4	1.3	9.9

因此,偏多(少)集中期的京津冀高温热浪呈年代际增加趋势,偏少集中期的高温热浪年代际增加幅度更明显。

4 周期分析

进一步对高温热浪日数、频次、有效积温进行周期分析,发现三者表现极为相似,因此文中以高温热浪日数为代表进行详细分析。图 5 为 1960—2020 年京津冀地区平均高温热浪日数小波功率谱和小波频谱,功率谱中红色越深小波功率越大,影响锥外周期特征存在较大不确定性,不作分析。在影响锥内分布较为相似,包围区域对应 2—5 a 的短周期振荡,在 1960—1980 年前后存在准 2—4 a 周期,20 世纪 90 年代后期变成 2 a 周期,2000 年后转为 2—5 a 的周期。分析小波频谱图可见看,2—5 a 短周期通过了信度 0.05 的显著性检验。

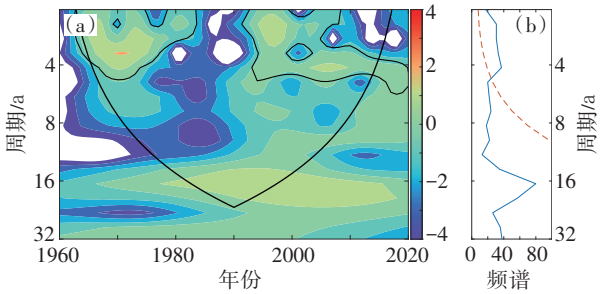


图 5 1960—2020 年京津冀地区夏季高温热浪日数的连续 Morlet 小波功率谱(a)和小波频谱(b)

Fig. 5 Continuous Morlet wavelet power spectrum (a) and wavelet spectrum (b) of summer heat wave days in Beijing-Tianjin-Hebei region during 1960 - 2020

5 年代际振荡特征及不同集中期特征差异

以下以夏季平均高温热浪日数 3 个突变年份(1972、1995、2005 年)为节点,对京津冀夏季平均高温热浪日数空间分布的年代际特征分时段分析。

从区域平均来看,1960—1972 年夏季平均高温热浪日数空间变化较大,范围为 0(西北康宝等地)—15.6 d/a(邢台南宫)(图 6a);1973—1995 年夏季平均高温热浪日数空间变化较小,范围为 0(西北康宝等地)—6.2 d/a(邢台南宫)(图 6b);1996—2005 年夏季平均高温热浪日数空间变化范围为 0(西北康宝等地)—13.3d/a(邢台隆尧)(图 6c);2006—2020 年夏季平均高温热浪日数空间变化范围为 0(西北康宝等地)—11.5 d/a(石家庄藁城)(图 6d)。1960—2020 年京津冀夏季平均高温热浪日数整体呈现“多—少—多—少”的年代际振荡特征。

从 1960—1972 年的偏多集中期到 1973—1995 年的偏少集中期(图 6e),高温热浪日数在空间分布上基本表现为区域性减少的特征,中南部地区减少幅度大于 4 d 以上,尤其在东部平原地区减少更为明显,减少幅度达到 8 d 以上。从 1996—2005 年的偏多集中期到 2006—2020 年的偏少集中期(图 6f),高温热浪日数差异在空间分布上同样表现为区域性减少特征,减少 4 d 以上的区域在北京—沧州及邢台一带,减少 8 d 以上的区域主要分布在沧州一带;同时相较于 1960—1972 年和 1973—1995 年有所差异,表现为高温热浪日数减少 4 d 以上的区域减小,且向北偏移。

两个偏多集中期之间存在一定差异(图 6g),1996—2005 年相较于 1960—1972 年呈中北部地区增加、南部地区减少的特征,减少 4 d 以上的地区主要在邢台和邯郸东部,增加 4 d 以上的地区主要在北京、天津南部—沧州北部,整体增加 4 d 的站点增加了 9.6%。两个偏少集中期之间也存在差异(图 6h),2006—2020 年相较于 1973—1995 年,中南部大部分地区呈不同程度的增加趋势,增加 4 d 以上的区域主要分布在邯郸南部及石家庄和邢台交界地区,整体增加 4.0 d/a 的站点增加了 34.1%;相较于偏多集中期,增加 4 d 以上的区域位置偏南。

一方面,1960—2020 年京津冀夏季平均高温热浪日数在空间区域上整体呈现“多—少—多—少”的年代际振荡特征;偏少集中期相较于前一个临近偏多期,大部分地区表现为不同程度减少的特征,前一个减少的范围和强度大于后一个。另一方面,两个偏多(少)集中期之间存在差异:最近一个偏多集中期(1996—2005 年)相对于上一个偏多期(1960—1972 年)表现为北增南减的特征;最近一个偏少集中期(2006—2020 年)相对于上一个偏少期(1973—1995 年)表现为中南部整体增加的特点,且大于 4 d 的影响区域均呈扩大的趋势。高温热浪频次和高温有效积温也表现出类似特征(图略)。

6 结 论

采用线性倾向率、突变检验、Morlet 小波分析等方法,对 1960—2020 年京津冀高温热浪的空间特征、变化趋势、突变和周期进行分析,得到:

1) 京津冀高温热浪日数、频次和有效积温在空间上均呈现南多(强)北少(弱)的分布特征,大值区

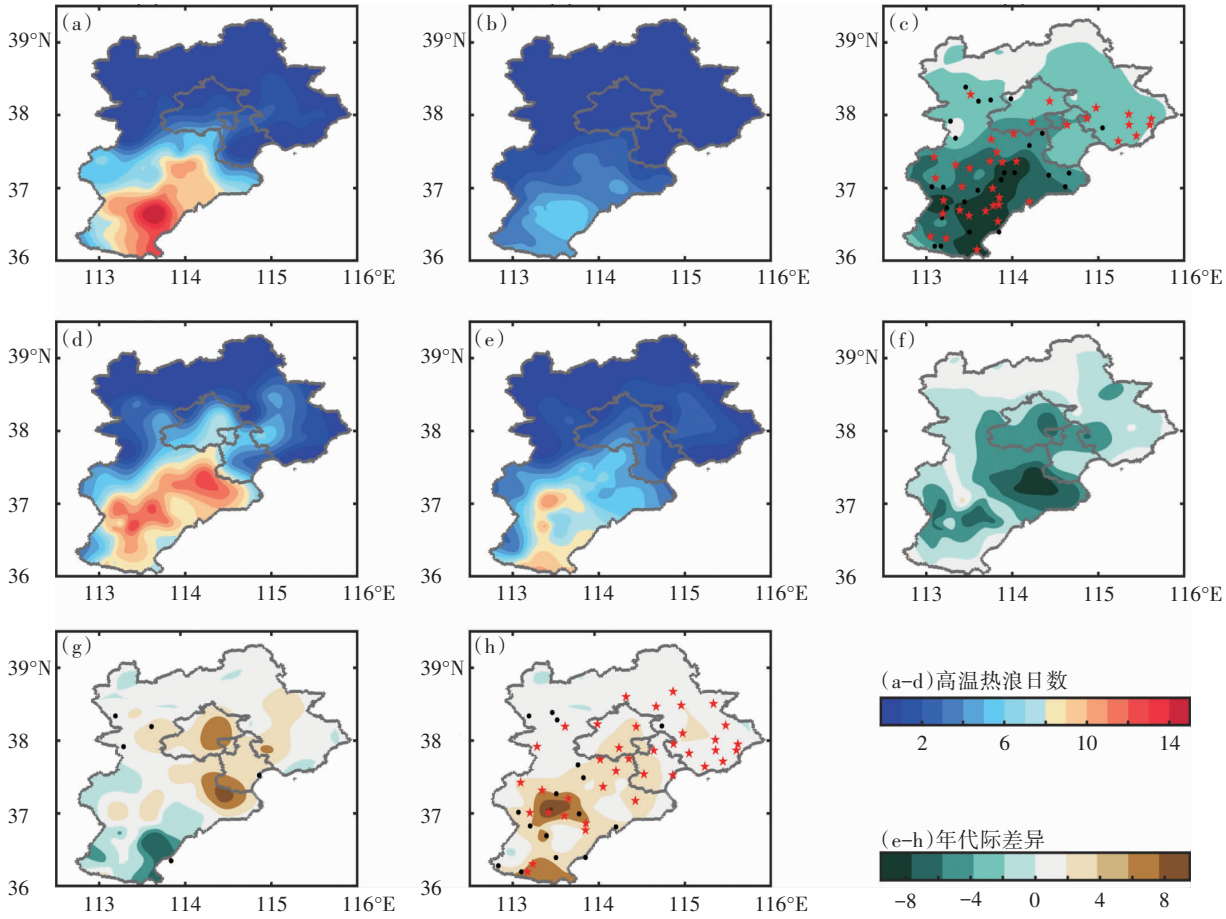


图 6 京津冀夏季平均高温热浪日数(单位:d)空间分布(a. 1960—1972 年,b. 1973—1995 年,c. 1996—2005 年,d. 2006—2020 年;e、f、g、h 为夏季平均高温热浪日数差值,分别为 b - a、d - c、c - a、d - b;五角星和圆点分别代表通过了信度 0.01 和 0.05 显著性检验)

Fig. 6 Spatial distribution of mean heat wave days (units:d) in Beijing-Tianjin-Hebei Region in summer (a. 1960 - 1972; b. 1973 - 1995; c. 1996 - 2005; d. 2006 - 2020; e, f, g and h represent the mean heat wave days of b - a, d - c, c - a and d - b, respectively)

均位于 39°N 以南,大值中心位于邢台中东部地区;高温热浪有效积温的空间分布同样呈南多北少特征,但大值中心向西北沿山一带偏移,中心位于石家庄赞皇地区。

2) 京津冀高温热浪日数、频次和有效积温表现为"多—少—多—少"的年代际变化;1960—2020 年出现 3 次明显突变点。通过对 3 次突变前后的时段分别进行差异显著性检验,发现第一次和第二次突变年份前后振荡期差异具有高度显著性,而第三次突变年份前后振荡期差异则为通过显著性检验。

3) 京津冀高温热浪日数、频次和有效积温存在两次集中偏多期和 2 次集中偏少期。第二次偏多集中期(1996—2005 年)相对于第一次(1960—1972 年)表现为高温热浪日数北增南减的特征,第二次偏少集中期(2006—2020 年)相对于第一次(1973—1995 年)表现为中南部整体增加的特点,且高温热浪日数大于 4 d 的影响区域均呈扩大的态势。

4) 京津冀高温热浪日数、频次和有效积温存在 2—5 a 的显著振荡周期。

参考文献(References)

陈敏,耿福海,马雷鸣,等,2013. 近 138 年上海地区高温热浪事件分析[J]. 高原气象,32(2):597-607. Chen M, Geng F H, Ma L M, et al, 2013. Analyses on the heat wave events in Shanghai in recent 138 years[J]. Plateau Meteor,32(2):597-607. (in Chinese)

陈升孛,刘安国,张亚杰,等,2013. 气候变化背景下湖北省水稻高温热害变化规律研究[J]. 气象与减灾研究,36(2):51-56. Chen S B, Liu A G, Zhang Y J, et al, 2013. Dynamic variations of heat injury on rice in Hubei province under climate change[J]. Meteor Disaster Reduction Res,36(2):51-56. (in Chinese)

陈正洪,杨桂芳,2012. 城市气象灾害及其影响相关问题研究进展[J]. 气象与减灾研究,35(3):1-7. Cheng Z H, Yang G F,

2012. Research on urban meteorological hazards and their impacts[J]. Meteor Disaster Reduction Res,35(3):1-7. (in Chinese)

高荣,王凌,高歌,2008. 1956—2006 年中国高温日数的变化趋势[J]. 气候变化研究进展,4(3):177-181. Gao R, Wang L, Gao G, 2008. The trend of variation in high temperaturedays during 1956 - 2006 in China[J]. Adv Climate Change Res,4(3):177-181. (in Chinese)

Green H K, Andrews N, Armstrong B, et al, 2016. Mortality during the 2013 heatwave in England, how did it compare to previous heatwaves? A retrospective observational study[J]. Environ Res,147(May):343-349.

贾佳,胡泽勇,2017. 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,32(5):546-559. Jia J, Hu Z Y, 2017. Spatial and temporal features and trend of different level heat waves over China[J]. Adv Earth Sci,32(5):546-559. (in Chinese)

李柏贞,孔萍,占明锦,等,2017. 1961—2015 年江西省气温变化特征分析[J]. 气象与减灾研究,40(3):184-192. Li B Z, Kong P, Zhan M J, et al, 2017. Analysis on the temperature variation in Jiangxi province during 1961 - 2015 [J]. Meteor Disaster Reduction Res,40(3):184-192. (in Chinese)

李双双,杨赛霓,张东海,等,2015. 近 54 年京津冀地区热浪时空变化特征及影响因素[J]. 应用气象学报,26(5):545-554. Li S S, Yang S N, Zhang D H, et al, 2015. Spatiotemporal variability of heat waves in Beijing-Tianjin-Hebei region and influencing factors in recent 54 years[J]. J Appl Meteor Sci,26(5):545-554. (in Chinese)

祁新华,程煜,李达谋,等,2016. 西方高温热浪研究述评[J]. 生态学报,36(9):2773-2778. Qi X H, Chen Y, Li D M, et al, 2016. A review of the study on heatwaves in western countries[J]. Acta Ecol Sinica,36(9):2773-2778. (in Chinese)

邵勰,廖要明,柳艳菊,等,2016. 2015 年全球重大天气气候事件及其成因[J]. 气象,42(4):489-495. Shao X, Liao Y M, Liu Y J, et al, 2016. Global major weather and climate events in 2015 and the possible cause[J]. Meteor Mon,42(4):489-495. (in Chinese)

沈皓俊,游庆龙,王朋岭,等,2018. 1961—2014 年中国高温热浪变化特征分析[J]. 气象科学,38(1):28-36. Shen H J, You Q L, Wang P L, et al, 2018. Analysis on heat waves vartation features in China during 1961 - 2014[J]. J Meteor Sci,38(1):28-36. (in Chinese)

施洪波,2011. 1960—2008 年京津冀地区夏季高温日数的变化趋势分析[J]. 气象,37(10):1277-1282. Shi H B, 2011. Analysis of trends in the variability of summer high temperature days during 1960 - 2008 in Beijing, Tianiin and Hebei[J]. Meteor Mon,37(10):1277-1282. (in Chinese)

史印山,谷永利,林艳,2009. 京津冀高温天气的时空分布及环流特征分析[J]. 气象,35(6):63-69. Shi Y S, Gu Y L, Lin Y, 2009. Analysis of the temporal and spatial distribution and circulation features of high temperatures in Beijing, Tianjin and Hebei[J]. Meteor Mon,35(6):63-69. (in Chinese)

Ting H, Ying S, 2021. Interpretation of IPCC AR6 on human influence on the climate system[J]. Adv Climate Change Res,17(6):644-651.

吴绍洪,潘韬,刘燕华,等,2017. 中国综合气候变化风险区划[J]. 地理学报,72(1):3-17. Wu S H, Pan T, Liu Y H, 2017. Comprehensive climate change risk regionalization of China[J]. Acta Geo Sinica,72(1):3-17. (in Chinese)

杨续超,陈葆德,胡可嘉,2015. 城市化对极端高温事件影响研究进展[J]. 地理科学进展,34(10):1219-1228. Yang X C, Chen B D, Hu K J, 2015. A review of impacts of urbanization on extreme heat events[J]. Progress In Geo,34(10):1219-1228. (in Chinese)

叶殿秀,尹继福,陈正洪,等,2013. 1961—2010 年我国夏季高温热浪的时空变化特征[J]. 气候变化研究进展,9(1):15-20. Ye D X, Yin J F, Chen Z H, et al, 2013. Spatiotemporal change characteristics of summer heatwaves in china in 1961 - 2010 [J]. Adv Climate Change Res,9(1):15-20. (in Chinese)

王丽伟,张杰,2015. 华北—华东地区高温热浪与土壤湿度的关系研究[J]. 气象科学,35(5):558-564. Wang L W, Zhang J, 2015. Relationship between summer heat waves and soil moisture in North-East China[J]. J Meteor Sci,35(5):558-564. (in Chinese)

王倩云,罗德海,王佳妮,2016. 欧洲地区夏季热浪的特征及其与阻塞环流的联系[J]. 气候与环境研究,21(4):367-379. Wang Q Y, Luo D H, Wang J N, 2016. Characteristics of summer heatwaves over Europe and their link with European blocking circulations[J]. Climatic Environ Res,21(4):367-379. (in Chinese)

王宗敏,丁一汇,张迎新,等,2012. 太行山东麓焚风天气的统计特征和机理分析Ⅰ:统计特征[J]. 高原气象,31(2):547-554. Wang Z M, Ding Y H, Zhang Y X, et al, 2012. Feature and mechanism of the foehn weather on east slope Taihang mountains Ⅰ: Statistic feature[J]. Plateau Meteor,31(2):547-554. (in Chinese)

王宗敏,丁一汇,张迎新,等,2012. 太行山东麓焚风天气的统计特征和机理分析Ⅱ:背风波对焚风产生和传播影响的个例分析[J]. 高原气象,31(2):555-561. Wang Z M, Ding Y H, Zhang Y X, et al, 2012. Feature and mechanism of the foehn weather on east slope taihang mountains Ⅱ: Case analysis of the effects of lee wave on foehn occurring and moving[J]. Plateau Meteor,31(2):555-561. (in Chinese)