

张英娟,高辉,丁婷,等,2023. 基于小时资料的北京高温精细化特征分析[J]. 气象,49(9):1131-1141. Zhang Y J, Gao H, Ding T, et al, 2023. Refined spatio-temporal features of high temperature frequency in Beijing based on hourly temperature data[J]. Meteor Mon, 49(9):1131-1141 (in Chinese).

基于小时资料的北京高温精细化特征分析^{*}

张英娟¹ 高 辉² 丁 婷² 王 冀¹

¹ 北京市气候中心, 北京 100089

² 国家气候中心, 北京 100081

提 要: 基于 2008—2021 年夏季 19 个国家级气象观测站逐小时最高气温观测资料, 分析了北京高温时长的空间分布和年代际、季节内及日内等多时间尺度变化特征。研究结果表明, 受地形和城市热岛效应等因素综合影响, 北京夏季高温日数和高温时长呈现出中心城区及以南多、西部和北部少的特征; 其中海淀、丰台和昌平是北京高温最集中的地区。在季节内尺度上, 北京高温时长多的时段主要集中在 6 月中旬后期至 7 月中旬前期, 也即华北雨季开始之前的时段; 其中 7 月上旬是北京高温最集中的旬。日内尺度上, 北京高温过程出现在 09—21 时, 14—17 时尤为集中。文章还基于线性回归拟合了最高气温和高温时长的对应关系, 拟合结果和实际观测相关系数高达 0.82。对北京地区而言, 在 35℃ 高温阈值基础上, 最高气温每升高 1℃, 相应的高温时长约增加 1.7 h。北京高温时长同样表现出明显的年代际变化特征。后一时段(2015—2021 年)与前一时段(2008—2014 年)的差值分析表明, 夏季累计高温时长的差值分布和高温时长的气候态空间分布显著不同, 年代际差值大值区并非位于高温日和高温时长中心。在后一时段北京高温时长在 11—19 时范围内均呈一致性增多, 意味着后一时段日内高温时长增多, 也即高温开始时间提早结束滞后。

关键词: 最高气温, 高温日数, 高温时长, 日内变化

中图分类号: P466, P423

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.070301

Refined Spatio-Temporal Features of High Temperature Frequency in Beijing Based on Hourly Temperature Data

ZHANG Yingjuan¹ GAO Hui² DING Ting² WANG Ji¹

¹ Beijing Municipal Climate Centre, Beijing 100089

² National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the hourly maximum temperature observations from 19 national meteorological stations during the summers of 2008—2021, this paper analyzes the spatial distribution of high temperature (HT) hours and the features of interdecadal, intraseasonal and diurnal variabilities in Beijing. The results show that the numbers of both HT days and HT hours are much greater in the downtown area and the south of the city, but less in the north and west parts as the result of the combined influences of topography and urban heat island effect. Among them, the Haidian, Fengtai and Changping districts are the most concentrated areas of HT days and hours. On the intraseasonal scale, the HT hours in Beijing are mainly concentrated in the period from late mid-June to early mid-July, which is the period before the beginning of the rainy season in North China. The first dekad of July is the most concentrated period of HT activities. On

^{*} 国家自然科学基金项目(42175078)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J030)共同资助

2022 年 7 月 1 日收稿; 2023 年 7 月 3 日收修定稿

第一作者: 张英娟, 主要从事气候异常诊断和气候预测研究. E-mail: zhangyj@bj.cma.gov.cn

通讯作者: 高辉, 主要从事气候异常诊断和气候预测研究. E-mail: gaohui@cma.gov.cn

the diurnal variation, the HT activities can be seen mainly from 09:00 BT to 21:00 BT, particularly concentrated from 14:00 BT to 17:00 BT. In addition, linear regression is also employed in this paper to fit the relationship between maximum temperature and HT hours. The correlation coefficient between the fitting result and the observation reaches as high as 0.82. In Beijing, for each 1℃ increase in maximum temperature over the 35℃ threshold, the HT hours increase by about 1.7 hours. The HT hours in Beijing also exhibits an obvious interdecadal variability. The distribution of the differences of accumulated summer HT hours between 2015—2021 and 2008—2014 is quite different from the spatial distribution of HT hours in climatic state. The area with large interdecadal differences is not located at the central part of HT days or HT hours. Relative to the period of 2008—2014, the HT hours in 2015—2021 are commonly added from 11:00 BT to 19:00 BT, which means the HT periods in Beijing tend to start earlier and end later in the latter period.

Key words: maximum temperature, high temperature day, high temperature hour, diurnal variation

引 言

高温热浪是夏季最常见的高影响天气。气候变暖背景下,高温热浪及其衍生的干旱、火险等次生灾害频频发生。IPCC 第五次评估报告指出,全球大部分陆地极端最高气温显著上升,欧洲、澳大利亚和亚洲大部分地区的热浪频次有增加趋势(IPCC, 2013)。之后 SR1.5 特别报告和 IPCC 第六次评估报告先后验证了这一趋势并指出极端高温事件将进一步增多(Hoegh-Guldberg et al, 2018; Seneviratne et al, 2021)。我国亦是高温灾害频发国家(翟盘茂和潘晓华, 2003),近年来高温灾害同样造成了巨大的经济损失,并引起了中国学者的广泛关注。如 2013 年南方破纪录持续高温(孙建奇, 2014; Sun, 2014; 邹海波等, 2015; 彭京备等, 2016; 杨涵洧和封国林, 2016), 2016 年长江中下游出梅后急转高温(Ding et al, 2018), 2017 年盛夏江南极端高温(Zhang et al, 2021), 2019 年云南持续性高温(马双梅等, 2021), 2022 年盛夏长江流域破纪录高温(Jiang et al, 2023; Ma and Yuan, 2023; 章大全等, 2023a; 2023b)。研究还表明,我国 8 种主要气象灾害中,高温热浪的未来风险在所有区域均偏高(秦大河, 2015)。

在空间上,我国高温日数有两个高值中心,其中气候态年高温日数在 30 d 以上的西部高温区位于新疆吐鲁番盆地和内蒙古西部,属于典型的沙漠性高温;东部高温区位于江南地区,主要集中在浙江南部、福建、江西南部、湖南东部等地,属于季风性高温(聂羽等, 2018; 郑国光, 2019; Ding et al, 2019)。

EOF 等统计分析结果显示,即使在南方地区也存在两种分布模态,分别是江淮型和江南华南型(袁媛等, 2018)。相比于南方,对黄淮及其以北地区的高温研究相对较少,尤其是华北地区。和南方高温集中雨季尤其是梅雨结束后的盛夏时段不同,北方高温更多发生于雨季开始前的 6 月至 7 月初(Ding et al, 2019)。

京津冀地区作为我国政治、经济和文化中心,其高温事件特征和影响近年来更是受到较多关注。一方面,在全球变暖和城市热岛效应等因素共同作用下,京津冀持续性高温事件快速增多和提前(刘伟东等, 2016)。如 2017 年京津冀 5 月中旬发生了近七十年来最早的高温天气(张夕迪和孙军, 2017), 2018 年京津冀等地破纪录高温导致该年为有完整气象记录以来最炎热的夏季(Ding et al, 2019)。统计还表明,近二十年京津冀高温日数相比之前增多了 20%。另一方面,高温在京津冀地区有着相对更广泛的跨行业影响。除对农业、电力、人体健康等行业有显著影响外,夏季持续高温也是导致近地面臭氧浓度增大进而造成严重大气污染的最主要天气因素之一(Ma et al, 2019)。正因为如此,夏季京津冀及其周边高温诱发臭氧污染已成为“十四五”大气污染防治专项规划的重点治理内容。

施洪波(2011)统计发现,1960—2008 年期间京津冀夏季高温日数在时间变化上以年代际波动为主,无显著的线性变化趋势。但基于最新资料,林爱兰等(2021)指出华北的高温线性趋势仅次于华南,这意味着华北高温在近十年快速增多。除年代际波动和线性趋势外,华北高温异常还表现出明显的年际尺度的变率,如 2018 年我国经历了最炎热的夏

季,无论是最高气温、平均气温还是最低气温均为1961年以来之最,其中北方地区尤其是华北地区气温在季节内和年际尺度上呈现与全国平均的一致性变化,表明其在全国破纪录热夏的贡献最大(Ding et al, 2019)。

对京津冀地区小时级甚至分钟级的短历时降水、风速和局地环流气候特征的研究已开展多年。降水方面,李建等(2008)揭示出北京夏季降水量和降水频次均以午后至次日清晨为高值区,中午前后达到最低值(吴正华, 1993; 李琛等, 2015; 熊明明等, 2016; 王彬雁等, 2015; 梁苏洁等, 2018; 赵玮等, 2022)。空间分布上,夏季总降水小时数明显高值中心在北部山区和城区以西山区,小时雨强以东北部、城区为高值中心并自东向西趋势递减(刘伟东等, 2014; 熊明明等, 2016)。北京总降水量呈显著减少趋势(梁苏洁等, 2018),一方面这种减少趋势主要由弱降水和中等强度降水显著减少引起,强降水没有表现出明显的增多或减少趋势(袁宇锋等, 2017)。另一方面,短持续性降水总量逐步增多,而长持续性降水总量却大幅减少(李建等, 2008)。环流方面,受山谷风和城市热岛环流的共同影响,风速主要沿地形梯度分布。季节分布上以夏季为最大,冬季为最小(郑祚芳等, 2018)。年代际尺度上,受城市化影响,北京各季节风速都呈下降趋势,冬季尤其明显(Miao et al, 2009; Li et al, 2011; 窦晶晶等, 2014)。环流分型结果表明,北京反气旋型、气旋型和西南平直型环流可占总环流型的近一半,是主导型环流,其中前两者的频次均呈逐年上升趋势。不同环流型控制下,北京冬、夏季天气有明显差异(周荣卫等, 2010)。此外,城市效应对北京近地面湿度亦有显著影响(窦晶晶等, 2014)。北京上述气候的变化趋势有显著的大尺度背景。窦以文等(2018)基于均一化观测序列对京津冀地区气候变化格局分析结果表明,1960—2015年京津冀呈现出年平均气温显著上升、降水和风速减少的年代际变化特征。上述研究从不同方面揭示了京津冀降水、风速和局地环流的精密特征,为气象保障提供了精细化服务。

和降水、风场相比,早期对高温的业务监测和科学研究仍以日最高气温和高温日数为主,近年来利用高温小时资料对北京地区进行长时间序列的研究已取得一些进展,如气温日变化特征的城郊差异及其季节变化(杨萍等, 2013),热岛强度的空间分布及城市化对北京或京津冀的影响(Yan et al, 2010;

Yang et al, 2013; Wang et al, 2022),以及考虑不同测站的北京增温幅度(Li and Yan, 2010)等。但大量的个例表明,在同样的最高气温下,高温小时数会有明显差异。例如,2009年7月20日和2014年7月10日海淀站的最高气温均为37.1℃,但高温小时数分别为3 h和8 h,显然这两种情况下高温的影响尤其是对户外生活和工作影响差异极大。随着重大活动的增加,社会对高温发生时长及时段等精细化的服务需求也越来越高,因此有必要基于更高时间分辨率的资料开展北京高温的精细化特征分析。本文从空间分布及不同时间尺度分析了北京高温时长的精细化变化特征,对比了近七年前七年的变化差异,并讨论了高温时长和最高气温之间的线性关系,可为今后北京夏季重大活动的高温时长延伸期预测提供一定的基础信息。

1 数据和资料

选取北京市气象局气象数据中心提供的20个国家气象观测站6月1日01时至8月31日24时逐小时最高气温观测资料。其中,通州站由于在2016年发生动迁,因此下文分析中去掉了该站,也即针对北京19个测站开展分析,测站空间分布见图1。根据张志富等(2013)对历史数据质量控制分析的统计,国家级气象观测站小时气温准确率为99.82%,表明现有的气温质量控制系统设计合理,具有可用性。本文最高气温自动观测资料通过了北京气象数据中心开展的气候极值检验、单站极值检验以及数据一致性检验等质量控制,具有较好的代表性。和传统的平均气温观测相比,我国小时最高气温精密化自动监测开展较晚。北京各测站人工观测资料每日仅有4次,不能满足本文研究需要,而各测站自动观测时间差异较大。北京市自1997年开始组建自动站观测网,部分测站陆续有小时自动观测资料,但早期资料监测并不连续,经过多年的扩建和完善,从2008年开始才有资料齐全连续自动监测资料。杨萍等(2011; 2013)对北京地区自动气象站气温观测资料开展了资料评估,指出1998—2009年整个时段内均存在连续小时观测的极少(仅有4个站);2000年之前,北京地区正常运行的自动站主要集中在海淀、朝阳等主城区。综合上述事实和研究结论,本文选用2008—2021年时段开展分析。文中所用时间均为北京时。

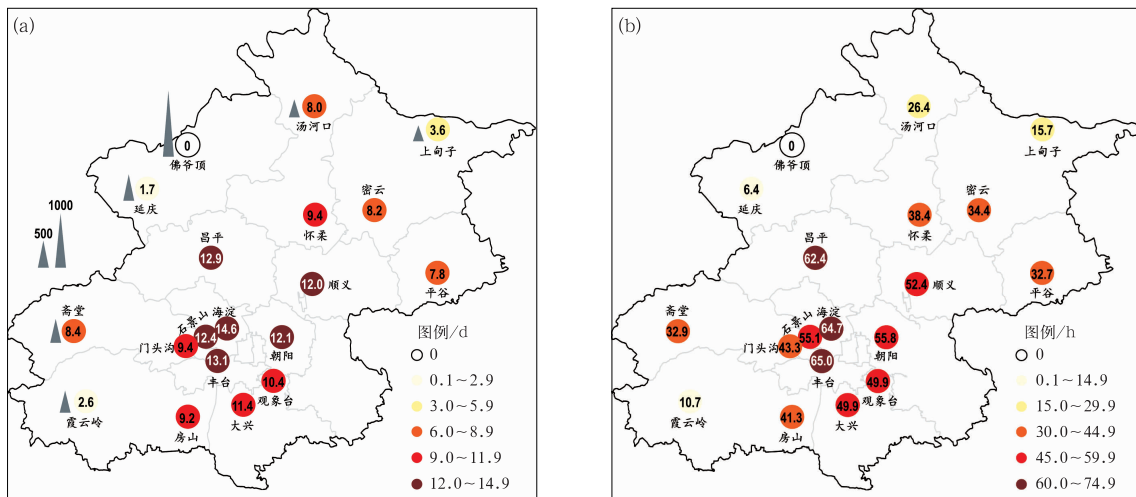
根据中国气象局高温监测和预警标准及各类行业规范(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会,2013;中国气象局,2014;2015;2021),本文取日最高气温超过 35°C 作为一个高温日,一日之中小时最高气温超过 35°C 的累计时数为该日高温时长。由于小时气温资料时段较短,因此在分析高温年代际变化特征时,用 2015—2021 年和 2008—2014 年各七年差值近似表征。

2 北京高温时长分布特征

受地形和城市热岛效应等因素综合影响,北京各站高温日数空间分布差异较大。图 1a 给出了 19 个测站 2008—2021 年夏季平均高温日数。整体上看,高温日数高值中心区域位于城区,昌平、石景山、丰台、海淀、朝阳和顺义均可达 12 d 以上,最多为海淀站,达 14.6 d;北京南部高温日数约为 9~12 d,北京西部及北部山区则不足 9 d。图中可以明显看出,城市地区高温日数明显高于周边市郊。造成这种差异的主要原因,一方面是高温日数与地形尤其是海拔高度有密切联系。西北部为海拔较高的山区,由于气温随高度增高而递减(约为 $0.6^{\circ}\text{C} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$),因此在海拔超过 500 m 的测站高温日数相对偏少,其中北京海拔高度最高的佛爷顶站

(1224.7 m)研究时段内从未出现高温天气。但同时需要指出的是,地形对高温的影响也会受到其他因素的调制。例如,从图 1a 可知,斋堂与霞云岭均地处山区,海拔高度相近,研究时段内两个站夏季平均最高气温分别为 30.2°C 和 29.4°C ,但两个站夏季平均高温日数分别为 8.4 d 和 2.6 d,相差近 3 倍。另一方面,随着城市化进程的加快,城市面积加速扩张,城市热岛效应更为显著,对高温强度起到了加剧作用(张雷等,2020)。从空间分布上,北京中央商务区气温平均高于周边约 0.64°C (程志刚等,2018)。从时间上,1990 年以来北京城市热岛面积一直呈现明显的上升趋势,强度不断增强,平均每 10 年增加 0.32°C (王冀和袁冯,2019)。

图 1b 给出了 19 个测站 2008—2021 年平均夏季高温时长空间分布。与高温日数分布相似,高温时长也呈现出中心城区及以南多、西部和北部少的特征。城区的昌平、海淀和丰台平均高温时长超过 60 h,东南部平原地区时长在 50 h 左右,北部和西部山区大多在 5~30 h。对比图 1a 和 1b 还可以看出,每一个高温日的平均高温持续时长在各站的空间差异性较小。除佛爷顶外,其他 18 个站高温持续时长约为 3.3 h(汤河口)~5.0 h(大兴)。本文同时分析了北京各站持续高温的平均小时时长和最大时长(图略)。除山区测站外,大部分台站研究时段内连续最大高温时长都可超过 10 h。平均而



注:灰色三角给出海拔 100 m 以上站点高度示意。

图 1 2008—2021 年北京平均的(a)高温日数和(b)高温时长
Fig. 1 (a) The high temperature days and (b) high temperature hours
in Beijing during the summers of 2008—2021

言,每个高温日高温时长在1~6 h,持续7~8 h的仅约占整个高温日数的10%左右,超过8 h的更少。对比图1a和1b可以看出城市化和热岛效应对北京高温日数和时长具有明显影响(Yan et al, 2010; 杨萍等, 2013; Yang et al, 2013; Wang et al, 2022)。

为进一步分析北京夏季高温的季节内变化特征,图2给出了2008—2021年19个站平均的6—8月逐日累计高温日数、高温时长及雨量的演变。可以看出,在气候态上高温日数和高温时长变化趋势基本一致,均呈现明显的阶段性波动。高温日数偏多的时段主要集中在6月中旬后期至7月中旬前期。结合逐日雨量的季节内变化可知,这一时段正是华北雨季开始之前的高温时段(Ding et al, 2019)。需要指出的是,6月上旬至中旬前期,这一时段虽然也在华北雨季之前,但由于前期基础气温较低,因此这一时段高温日数并不多。7月上旬是北京高温最集中的旬,无论是高温日数还是高温小时数均为一年之中最强。7月中旬后期开始,北京高温日数和时长均呈现“多-少-多-少”的波动性变化特征,但峰值较之前明显下降,这和雨季期间的雨日密切相关。可以看到,在强降水多的时段,高温日数、时长均由多转少,反之,降水少的时段高温活跃;即,二者呈反位相变化关系。但也需要指出,个别日

期也存在雨量多、高温日数及时长反而偏多的情况,即所谓的“雨热同期”现象。8月下旬开始,受最高气温年循环影响,北京的高温衰退明显,高温期趋于结束。

前面给出的是北京地区夏季高温的日变化。为进一步揭示其日内变化的精细特征,分别对各站2008—2021年夏季各时次累计高温时长进行统计(图3)。白天地面将接收到的太阳辐射热量通过辐射、对流等方式传递给大气,通常14—15时左右气温升高达到一日之内最高值,之后太阳辐射减弱,气温随之减弱。由图3可以看出,高温过程主要出现在09—21时。09时开始,随着气温的升高,高温时长逐渐增加,12时前各站累计高温时长不足60 h,之后随着太阳辐射增强,高温时长迅速增长,13时城区累计高温时长在60~80 h,累计高温时长达120 h以上的时段主要出现在14—17时,其中15—16时高温时长达到峰值。北京各站最高气温发生的时段概率分布(图略)和图3的分布基本一致,高温主要发生在14—17时,这4个时次占据94%。同时可以看到,西部和北部山区各时次高温时长均低于90 h。时长达120 h以上区域主要位于主城区,即城市热岛明显的地区,这与图1结论一致。

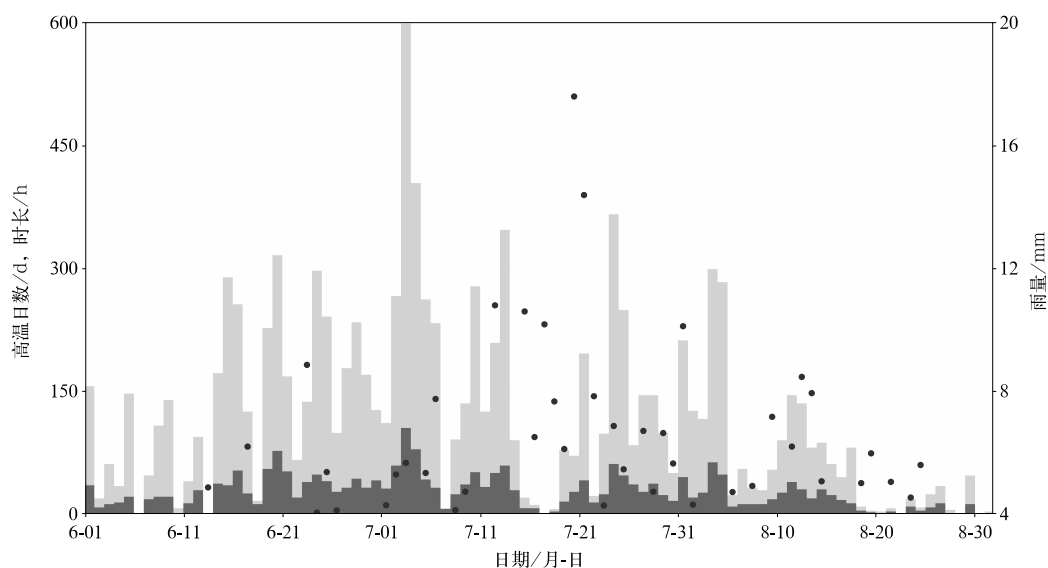
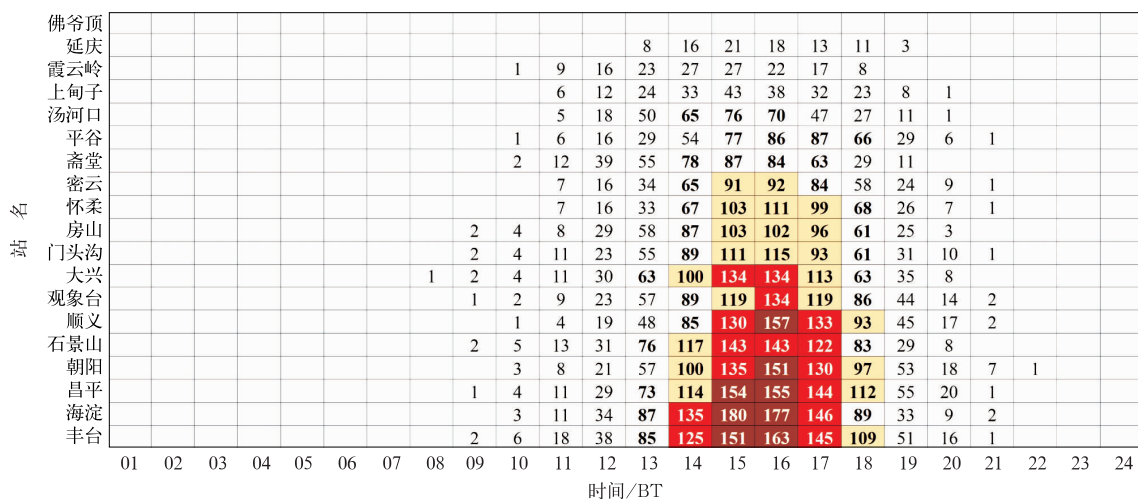


图2 2008—2021年夏季北京累计高温日数(深色直方图)、高温时长(浅色直方图)及雨量(圆点,仅给出4 mm以上)的逐日变化

Fig. 2 Daily variation of accumulated high temperature days (dark grey histogram), high temperature hours (light grey histogram) and rainfall > 4 mm (dot) in Beijing during the summers of 2008—2021



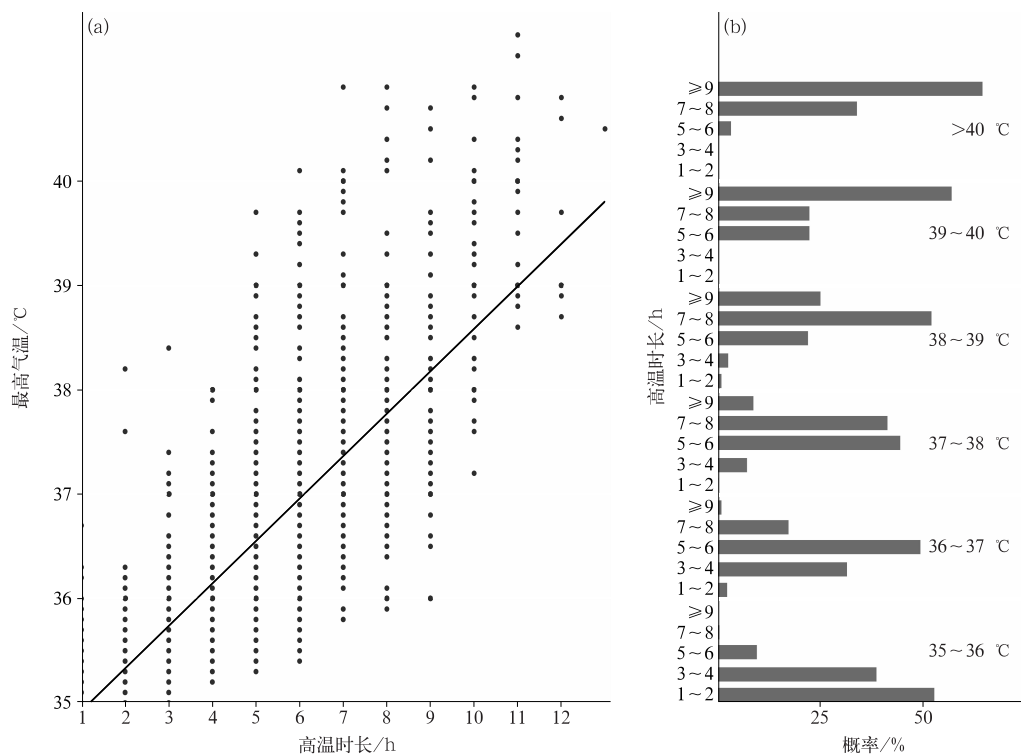
注:黄、红和棕色分别表示时长 90~119、120~149 和 150 h 以上。

图 3 2008—2021 年夏季北京各测站各时次累计高温时长(单位:h)

Fig. 3 Hourly variation of accumulated high temperature hours (unit: h) at each station in Beijing during the summers of 2008—2021

一般认为,日最高气温越高,该日高温时长越长。但在之前的相关研究中,均未揭示二者之间的

对应关系。为进一步分析北京夏季最高气温与高温时长的变化规律,图 4 给出了基于 19 个测站的二者



注:直线为线性拟合线。

图 4 2008—2021 年夏季北京 19 个测站(a)最高气温-高温时长散点图和 (b)每一个最高气温区间的高温时长概率分布

Fig. 4 (a) Scatter plot of maximum temperature and high temperature hours, (b) the probability distribution of high temperature hours for each maximum temperature interval at each station in Beijing during the summers of 2008—2021

的散点图。从图上看,散点的分布呈现出一定的线性关系。线性拟合分析表明,在 35℃ 基础上,最高气温每升高 1℃,相应的高温时长约增加 1.7 h。近似的线性拟合公式为:

$$H_{HT} = 1.655 \times T_{\max} - 55.7$$

式中: H_{HT} 为高温时长, $T_{\max}$ 为最高气温。从该公式拟合的结果看,误差在 1 h 之内的样本为 52.24%, 1~2 h 的有 34.56%, 表明该线性公式可以较好表征北京高温时长和最高气温之间的关系,相关系数为 0.82,通过 0.001 显著性水平检验。同样试验了其他非线性拟合结果,所得结果近似,这里不再介绍。图 4b 同时也给出夏季各高温时段出现的高温时长概率分布以便对比。不同高温时段出现的主要高温时长不同,随着最高气温的增加,高温时长呈明显增加趋势。例如在 35~36℃,近 90% 的高温时长在 1~4 h,其中 1~2 h 的概率超过 50%。

3 北京高温时长的年代际变化特征

气候变暖背景下,全球高温事件呈显著的增强增多趋势。即使和 21 世纪前 10 年相比,近十年我

国高温也明显增多(Ding et al, 2020; Zhang et al, 2021)。由于小时高温资料可用时段较短,为分析北京高温时长的年代际变化特征,这里对两个时段开展对比。图 5 给出了这两个时段夏季累计高温时长的差值分布。从图中可以看出,累计高温时长的年代际变化趋势与图 1b 平均高温时长的空间分布有显著不同,年代际差值大值区并非位于高温日和高温时长中心。虽然北京大部分地区累计高温时长增加,尤其是丰台和平谷增加量均在 200 h 以上,但仍有西部山区的延庆和斋堂站高温时长在后一时段出现弱减少趋势。东北部的平谷、密云和怀柔平均高温时长相对较少(图 1b),但后一时段增多却异常明显。平均高温时长较多的石景山和昌平地区,累计高温时长增加不明显,其中,石景山仅增加了 20 h。这一结果也表明,高温时长的变化具有很大的局地性特征。

图 6 给出了后一时段和前一时段北京整个夏季和逐旬(共 9 旬)高温时长在日内逐时段差值变化。结合图 3,选择 08—22 时开展分析。从图 6 可以看出,就整个夏季而言,高温时长在 11—19 时均呈一致性增多。对比图 3,图 6 的结果表明不仅午后至傍

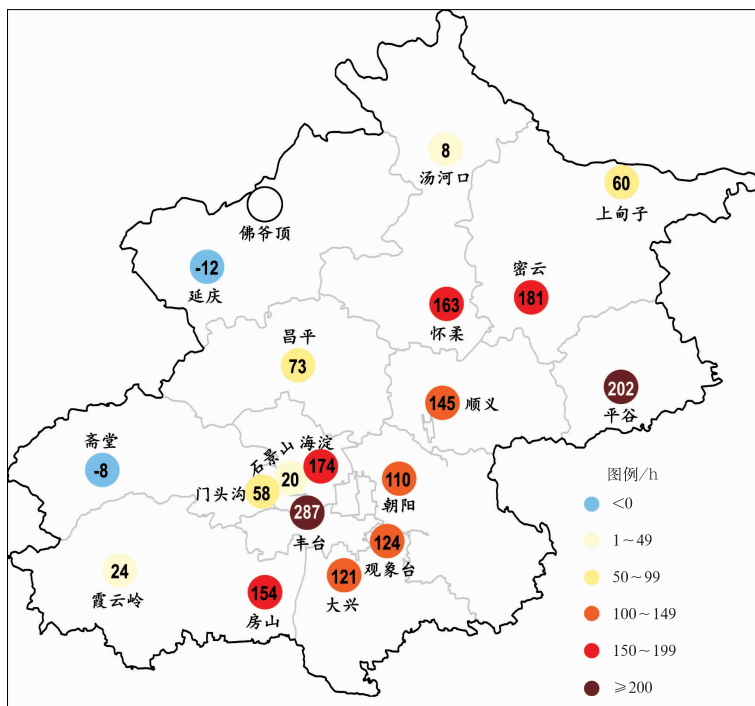
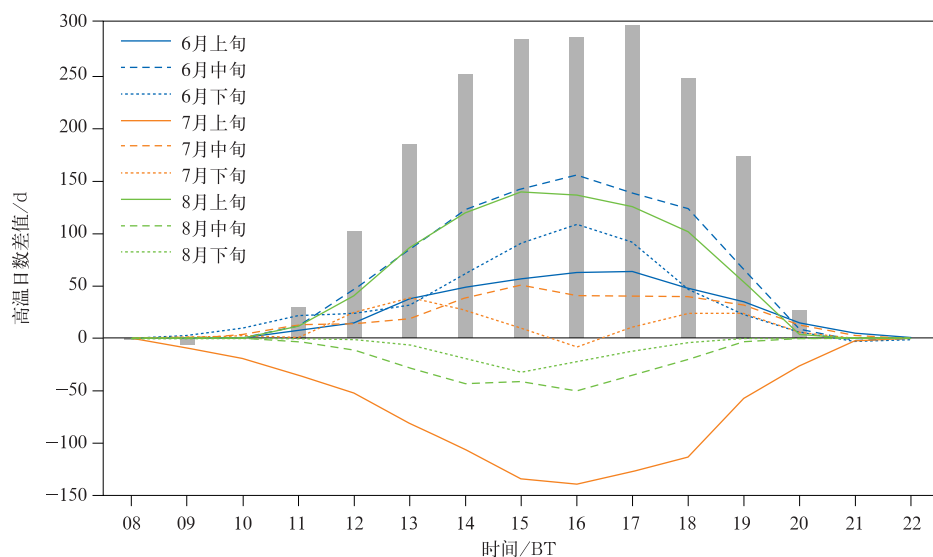


图 5 2015—2021 年和 2008—2014 年两个时段北京各站夏季累计高温时长差值

Fig. 5 Difference of accumulated high temperature hours between 2015—2021 and 2008—2014 at each station in Beijing



注:横坐标 08 表示 08—09 时,以此类推;灰色直方图为整个夏季,曲线为各旬。

图 6 2015—2021 年和 2008—2014 年两个时段北京高温时长差值

Fig. 6 Hourly difference variation of accumulated high temperature hours between 2015—2021 and 2008—2014 in Beijing

晚时段高温时长增多,在 11—12 时及 19 时也在增多,这也表明,在后一时段不仅高温时长有增多趋势,也呈现开始早、结束晚的变化特征。但这种特征在不同旬内的结果并不一致。对比各旬变化结果看,7 月上旬、8 月中旬和下旬高温时长在后一时段有不同程度的减少,尤其是 7 月上旬减少最为明显,其在 13—18 时减少量均超过 100 h 左右。这和近年来 7 月上旬北京降水偏多有一定关联,例如 2020 年和 2021 年 7 月上旬,北京均处于北方雨带中心区,日照大幅减少造成高温日数和时长偏低(图略)。此外,虽然夏季降温过程目前未有业务监测,但实况数据结果可以看出,2015 年 6 月底和 7 月 4 日均有一次较强的降温过程,导致 7 月上旬整个北京地区均无高温事件发生。

4 结论和讨论

极端高温可对首都社会发展和人民生活产生极为严重的影响。但目前对高温的业务监测和科学研究仍以日尺度最高气温和高温日数为主。本文基于 2008—2021 年夏季 19 个国家级气象观测站逐小时最高气温实测资料,首次开展了北京高温的精细化特征分析。

研究结果表明:(1)受地形和城市热岛效应等因素综合影响,北京各站多年平均夏季高温日数和高

温时长空间分布差异较大,呈现出中心城区及以南多、西部和北部少的特征。其中海淀、丰台和昌平 3 个站夏季多年平均高温日数均可达 12 d 以上,多年平均高温时长超过 60 h,是北京高温最集中的地区。(2)在季节内尺度上,北京高温日数偏多的时段主要集中在 6 月中旬后期至 7 月中旬前期,也即华北雨季开始之前的时段。其中 7 月上旬是北京高温最集中的旬,无论是高温日数还是高温小时数均为一年之中最强。7 月中旬后期至 8 月中旬,受雨季内降水和日照、辐射等要素影响,北京多年平均高温日数和时长呈现波动性减少变化特征。8 月下旬开始高温期趋于结束。(3)逐小时统计分析表明,北京高温过程出现在 09—21 时,集中于 14—17 时,这一时段累计高温时长均达 120 h 以上,尤其是 15—16 时,高温时长达一日之峰值。(4)之前的相关研究尚未揭示最高气温和高温时长的对应关系,本文基于线性回归拟合了二者之间的关系。结果表明,对北京地区而言,在 35℃ 高温阈值基础上,最高气温每升高 1℃,相应的高温时长约增加 1.7 h。拟合结果表明,误差在 1 h 之内的样本为 52.24%,1~2 h 的有 34.56%,表明该线性公式可以较好表征北京高温时长和最高气温之间的关系。

北京高温时长同样表现出明显的年代际变化特征。但由于资料时段有限,本文用研究时段后七年与前七年开展差值对比。结果表明,两个时段夏季

累计高温时长的差值分布和高温时长的气候态空间特征有显著不同,年代际差值大值区并非位于高温日和高温时长中心,有两个测站高温时长在近七年出现弱减少趋势,表明高温时长的变化具有很大的局地性。在季节内和日内时间尺度上,整个夏季北京多年平均高温时长在11—19时均呈一致性增多,意味着后一时段日内高温时长增多,也即高温开始时间提早、结束时间滞后,户外高温暴露时长增长。但这种变化特征在不同旬内的结果并不一致,对比各旬变化结果看,7月上旬、8月中旬和下旬高温时长在后一时段有不同程度的减少,尤其是7月上旬减少最为明显。但因高温资料时长所限,本文得到的年代际变化特征结果尚有一定的局限性,还需要依赖更长的资料加以验证。

同时,日尺度高温时长受到哪些因素影响还需要进一步分析。如王君等(2013)、Wang et al(2013)研究指出,1978—2008年期间,北京城市化所致城市热岛增强效应对城市站点平均气温增温趋势的贡献为10.9%,但主要体现为对最低气温增温趋势的贡献,对最高温度影响较小。因此,大气本身的日内变率也可能影响到高温的时长。这些都需要基于精细化环流资料进一步分析。

参考文献

- 程志刚,李炬,周明煜,等,2018.北京中央商务区(CBD)城市热岛效应的研究[J].气候与环境研究,23(6):633-644. Cheng Z G, Li J, Zhou M Y, et al, 2018. A study on urban heat island effect in Beijing Central Business District (CBD) [J]. Climatic Environ Res, 23(6): 633-644 (in Chinese).
- 窦晶晶,王迎春,苗世光,2014.北京城区近地面比湿和风场时空分布特征[J].应用气象学报,25(5):559-569. Dou J J, Wang Y C, Miao S G, 2014. Fine spatial and temporal characteristics of humidity and wind in Beijing urban area [J]. J Appl Meteor Sci, 25(5): 559-569 (in Chinese).
- 窦以文,丹利,严中伟,等,2018.基于均一化观测序列的京津冀地区气候变化格局分析[J].气候与环境研究,23(5):524-532. Dou Y W, Dan L, Yan Z W, et al, 2018. Analysis of climate change in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on homogenized observations [J]. Climatic Environ Res, 23(5): 524-532 (in Chinese).
- 李琛,李津,张明英,等,2015.北京短历时强降雨的时空分布[J].气象科技,43(4):704-708. Li C, Li J, Zhang M Y, et al, 2015. Spatial and temporal distribution of short-lasting heavy rainfall in Beijing [J]. Meteor Sci Technol, 43(4): 704-708 (in Chinese).
- 李建,宇如聪,王建捷,2008.北京市夏季降水的日变化特征[J].科学通报,53(7):829-832. Li J, Yu R C, Wang J J, 2008. Diurnal variations of summer precipitation in Beijing [J]. Chin Sci Bull, 53(7): 829-832 (in Chinese).
- 梁苏洁,程善俊,郝立生,等,2018.1970—2015年京津冀地区暖季小时降水变化特征[J].暴雨灾害,37(2):105-114. Liang S J, Cheng S J, Hao L S, et al, 2018. Analysis on the characteristics of hourly precipitation variations in Beijing-Tianjin-Hebei Region during 1970—2015 [J]. Torr Rain Dis, 37(2): 105-114 (in Chinese).
- 林爱兰,谷德军,彭冬冬,等,2021.近60年我国东部区域性持续高温过程变化特征[J].应用气象学报,32(3):302-314. Lin A L, Gu D J, Peng D D, et al, 2021. Climatic characteristics of regional persistent heat event in the eastern China during recent 60 years [J]. J Appl Meteor Sci, 32(3): 302-314 (in Chinese).
- 刘伟东,尤焕琴,任国玉,等,2014.北京地区精细化的降水变化特征[J].气候与环境研究,19(1):61-68. Liu W D, You H L, Ren G Y, et al, 2014. Subtle precipitation characteristics in Beijing Area [J]. Climatic Environ Res, 19(1): 61-68 (in Chinese).
- 刘伟东,尤焕琴,孙丹,2016.1971—2010年京津冀大城市热岛效应多时间尺度分析[J].气象,42(5):598-606. Liu W D, You H L, Sun D, 2016. Multi-time scale analysis of megacities heat island effect in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1971 to 2010 [J]. Meteor Mon, 42(5): 598-606 (in Chinese).
- 马双梅,祝从文,刘伯奇,2021.2019年4~6月云南持续性高温天气的大气环流异常成因[J].大气科学,45(1):165-180. Ma S M, Zhu C W, Liu B Q, 2021. Possible causes of persistently extreme-hot-days-related circulation anomalies in Yunnan from April to June 2019 [J]. Sci Atmos Sin, 45(1): 165-180 (in Chinese).
- 聂羽,韩振宇,韩荣青,等,2018.中国夏季热浪持续天数的年际变化及环流异常分析[J].气象,44(2):294-303. Nie Y, Han Z Y, Han R Q, et al, 2018. Interannual variation of heat wave frequency persistence over China and the associated atmospheric circulation anomaly [J]. Meteor Mon, 44(2): 294-303 (in Chinese).
- 彭京备,刘舸,孙淑清,2016.2013年我国南方持续性高温天气及副热带高压异常维持的成因分析[J].大气科学,40(5):897-906. Peng J B, Liu G, Sun S Q, 2016. An analysis on the formation of the heat wave in southern China and its relation to the anomalous Western Pacific subtropical high in the summer of 2013 [J]. Sci Atmos Sin, 40(5): 897-906 (in Chinese).
- 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[M].北京:科学出版社. Qin D H, 2015. China National Assessment Report on Risk Management and Adaptation of Climate Extremes and Disasters [M]. Beijing: Science Press (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, Tianjin and Hebei [J]. Meteor Mon, 37(10): 1277-1282 (in Chinese).
- 孙建奇,2014.2013年北大西洋破纪录高海温与我国江淮-江南地区极端高温的关系[J].科学通报,59(27):2714-2719. Sun J Q,

2014. Record-breaking SST over mid-North Atlantic and extreme high temperature over the Jianghuai-Jiangnan Region of China in 2013[J]. *Chin Sci Bull*, 59(27): 2714-2719 (in Chinese).
- 王彬雁, 赵琳娜, 巩远发, 等, 2015. 北京降雨过程分型特征及短历时降雨重现期研究[J]. *暴雨灾害*, 34(4): 302-308. Wang B Y, Zhao L N, Gong Y F, et al, 2015. Characteristics of temporal pattern and return period of short-duration rainfall at Beijing Observatory[J]. *Torr Rain Dis*, 34(4): 302-308 (in Chinese).
- 王冀, 袁冯, 2019. 如何减缓北京热岛效应[J]. *世界环境*, (1): 50-53. Wang J, Yuan F, 2019. How to mitigate heat island effect in Beijing[J]. *World Environ*, (1): 50-53 (in Chinese).
- 王君, 严中伟, 李珍, 等, 2013. 近30年城市化对北京极端温度的影响[J]. *科学通报*, 58(33): 3464-3470. Wang J, Yan Z W, Li Z, et al, 2013. Impact of urbanization on changes in temperature extremes in Beijing during 1978—2008[J]. *Chin Sci Bull*, 58(33): 3464-3470 (in Chinese).
- 吴正华, 1993. 京津冀夏季短历时降水气候分析[J]. *大气科学*, 17(3): 268-273. Wu Z H, 1993. Climate analysis of summer short-period precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei Area[J]. *Sci Atmos Sin*, 17(3): 268-273 (in Chinese).
- 熊明明, 徐姝, 李明财, 等, 2016. 天津地区小时降水特征分析[J]. *暴雨灾害*, 35(1): 84-90. Xiong M M, Xu S, Li M C, et al, 2016. Characteristics of hourly precipitation in Tianjin[J]. *Torr Rain Dis*, 35(1): 84-90 (in Chinese).
- 杨涵洧, 封国林, 2016. 2013年盛夏中国持续性高温事件诊断分析[J]. *高原气象*, 35(2): 484-494. Yang H W, Feng G L, 2016. Diagnostic analyses of characteristics and causes of regional and persistent high temperature event in China[J]. *Plateau Meteor*, 35(2): 484-494 (in Chinese).
- 杨萍, 刘伟东, 仲跻芹, 等, 2011. 北京地区自动气象站气温观测资料的质量评估[J]. *应用气象学报*, 22(6): 706-715. Yang P, Liu W D, Zhong J Q, et al, 2011. Evaluating the quality of temperature measured at automatic weather stations in Beijing[J]. *J Appl Meteor Sci*, 22(6): 706-715 (in Chinese).
- 杨萍, 肖子牛, 刘伟东, 2013. 北京气温日变化特征的城郊差异及其季节变化分析[J]. *大气科学*, 37(1): 101-112. Yang P, Xiao Z N, Liu W D, 2013. Comparison of diurnal temperature variation in urban and rural areas in Beijing and its seasonal change[J]. *Sci Atmos Sin*, 37(1): 101-112 (in Chinese).
- 袁宇锋, 翟盘茂, 李建, 等, 2017. 北京城、郊和山区不同强度等级降水变化特征比较[J]. *气候变化研究进展*, 13(6): 589-597. Yuan Y F, Zhai P M, Li J, et al, 2017. Changes in classified precipitation in the urban, suburban and mountain areas of Beijing[J]. *Climate Change Res*, 13(6): 589-597 (in Chinese).
- 袁媛, 丁婷, 高辉, 等, 2018. 我国南方盛夏气温主模态特征及其与海温异常的联系[J]. *大气科学*, 42(6): 1245-1262. Yuan Y, Ding T, Gao H, et al, 2018. Major modes of midsummer air temperature in southern China and their relationship with sea surface temperature anomalies[J]. *Sci Atmos Sin*, 42(6): 1245-1262 (in Chinese).
- 翟盘茂, 潘晓华, 2003. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J]. *地理学报*, 58(S1): 1-10. Zhai P M, Pan X H, 2003. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th Century[J]. *Acta Geogr Sin*, 58(S1): 1-10 (in Chinese).
- 章大全, 袁媛, 韩荣青, 2023a. 2022年夏季我国气候异常特征及成因分析[J]. *气象*, 49(1): 110-121. Zhang D Q, Yuan Y, Han R Q, 2023a. Characteristics and possible causes of the climate anomalies over China in summer 2022[J]. *Meteor Mon*, 49(1): 110-121 (in Chinese).
- 章大全, 袁媛, 韩荣青, 2023b. 2022年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析[J]. *气象*, 49(3): 365-378. Zhang D Q, Yuan Y, Han R Q, 2023b. Overview of climate prediction for the summer 2022 in China and its precursors[J]. *Meteor Mon*, 49(3): 365-378 (in Chinese).
- 张雷, 任国玉, 苗世光, 等, 2020. 城市化对北京单次极端高温过程影响的数值模拟研究[J]. *大气科学*, 44(5): 1093-1108. Zhang L, Ren G Y, Miao S G, et al, 2020. Numerical simulation of the effect of urbanization on a single extreme-high-temperature event in Beijing[J]. *Sci Atmos Sin*, 44(5): 1093-1108 (in Chinese).
- 张夕迪, 孙军, 2017. 2017年5月大气环流和天气分析[J]. *气象*, 43(8): 1022-1028. Zhang X D, Sun J, 2017. Analysis of the May 2017 atmospheric circulation and weather[J]. *Meteor Mon*, 43(8): 1022-1028 (in Chinese).
- 张志富, 任芝花, 张强, 等, 2013. 自动站小时气温数据质量控制系统研究[J]. *气象与环境学报*, 29(4): 64-70. Zhang Z F, Ren Z H, Zhang Q, et al, 2013. Analysis of quality control procedures for hourly air temperature data from automatic weather stations in China[J]. *J Meteor Environ*, 29(4): 64-70 (in Chinese).
- 赵玮, 郝翠, 曹洁, 等, 2022. 近40年北京地区夏季降水日变化及不同持续时间降水事件的特征[J]. *大气科学*, 46(5): 1167-1176. Zhao W, Hao C, Cao J, et al, 2022. Diurnal variation characteristics of summer precipitation and precipitation events with different durations in Beijing in the past 40 years[J]. *Sci Atmos Sin*, 46(5): 1167-1176 (in Chinese).
- 郑国光, 2019. 中国气候[M]. 北京: 气象出版社. Zheng G G, 2019. Chinese Climate[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 郑祚芳, 任国玉, 高华, 2018. 北京地区局地环流观测分析[J]. *气象*, 44(3): 425-433. Zheng Z F, Ren G Y, Gao H, 2018. Analysis of the local circulation in Beijing Area[J]. *Meteor Mon*, 44(3): 425-433 (in Chinese).
- 中国气象局, 2014. 区域性高温天气过程等级划分: QX/T 228—2014[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2014. Classification of regional high temperature weather process: QX/T 228—2014[S]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 中国气象局, 2015. 极端高温监测指标: QX/T 280—2015[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2015. Monitoring indices of high temperature extremes: QX/T 280—2015

- [S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 中国气象局, 2021. 气候指数 高温: QX/T 595—2021[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2021. Climate index-high temperature: QX/T 595—2021[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2013. 高温热浪等级: GB/T 29457—2012[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2013. Grade of the heat wave: GB/T 29457—2012[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- 周荣卫, 何晓凤, 苗世光, 等, 2010. 北京地区大气环流型及气候特征[J]. 气候变化研究进展, 6(5): 338-343. Zhou R W, He X F, Miao S G, et al, 2010. Atmospheric circulation types and their climatic characteristics over Beijing[J]. Adv Clim Change Res, 6(5): 338-343(in Chinese).
- 邹海波, 吴珊珊, 单九生, 等, 2015. 2013 年盛夏中国中东部高温天气的成因分析[J]. 气象学报, 73(3): 481-495. Zou H B, Wu S S, Shan J S, et al, 2015. Diagnostic study of the severe high temperature event over Mid-East China in 2013 summer[J]. Acta Meteor Sin, 73(3): 481-495(in Chinese).
- Ding T, Gao H, Li W J, 2018. Extreme high-temperature event in southern China in 2016 and the possible role of cross-equatorial flows[J]. Int J Climatol, 38: 3579-3594.
- Ding T, Yuan Y, Gao H, et al, 2020. Impact of the North Atlantic sea surface temperature on the summer high temperature in northern China[J]. Int J Climatol, 40(4): 2296-2309.
- Ding T, Yuan Y, Zhang J M, et al, 2019. 2018: The hottest summer in China and possible causes[J]. J Meteor Res, 33(4): 577-592.
- Hoegh-Guldberg O, Jacob D, Taylor M, et al, 2018. Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems[M] // Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H O, et al. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 175-312.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Jiang J L, Liu Y M, Mao J Y, et al, 2023. Extreme heatwave over Eastern China in summer 2022: the role of three oceans and local soil moisture feedback[J]. Environ Res Lett, 18(4): 044025. DOI: 10.1088/1748-9326/acc5fb
- Li J, Yu R C, Wang J J, 2008. Diurnal variations of summer precipitation in Beijing[J]. Chin Sci Bull, 53(12): 1933-1936.
- Li Z, Yan Z W, 2010. Application of multiple analysis of series for homogenization to Beijing daily temperature series(1960—2006)[J]. Adv Atmos Sci, 27(4): 777-787.
- Li Z, Yan Z W, Tu K, et al, 2011. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960—2008 based on homogenized observations[J]. Adv Atmos Sci, 28(2): 408-420.
- Ma F, Yuan X, 2023. When will the unprecedented 2022 summer heat waves in Yangtze River Basin become normal in a warming climate? [J]. Geophys Res Lett, 50(4): e2022GL101946. DOI: 10.1029/2022GL101946.
- Ma M C, Gao Y, Wang Y H, et al, 2019. Substantial ozone enhancement over the North China Plain from increased biogenic emissions due to heat waves and land cover in summer 2017[J]. Atmos Chem Phys, 19(19): 12195-12207.
- Miao S G, Li P Y, Wang X Y, 2009. Building morphological characteristics and their effect on the wind in Beijing[J]. Adv Atmos Sci, 26(6): 1115-1124.
- Seneviratne S I, Zhang X B, Adnan M, et al, 2021. Weather and climate extreme events in a changing climate[M] // Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 1513-1766.
- Sun J Q, 2014. Record-breaking SST over mid-North Atlantic and extreme high temperature over the Jianghuai-Jiangnan Region of China in 2013[J]. Chin Sci Bull, 59(27): 3465-3470.
- Wang J, Yan Z W, Li Z, et al, 2013. Impact of urbanization on changes in temperature extremes in Beijing during 1978—2008[J]. Chin Sci Bull, 58(36): 4679-4686.
- Wang Y J, Xiang Y, Song L C, et al, 2022. Quantifying the contribution of urbanization to summer extreme high-temperature events in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. J Appl Meteor Climatol, 61(6): 669-683.
- Yan Z W, Li Z, Li Q X, et al, 2010. Effects of site change and urbanization in the Beijing temperature series 1977-2006[J]. Int J Climatol, 30(8): 1226-1234.
- Yang P, Ren G Y, Liu W D, 2013. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity[J]. J Appl Meteor Climatol, 52(8): 1803-1816.
- Zhang J M, Ding T, Gao H, 2021. Record-breaking high temperature in Southern China in 2017 and influence from the middle-latitude trough over the east of Japan[J]. Atmos Res, 258: 105615. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105615.

(本文责编:戴洋)