

高文兰,李双双,段克勤,等.基于均一化资料的西安极端气温变化特征研究[J].地理科学,2018,38(3):464-473.[Gao Wenlan, Li Shuangshuang, Duan Keqin et al. Changes of Extreme Temperature Events in Xi'an City Based on Homogenized Data. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(3): 464-473.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.03.017

基于均一化资料的西安极端气温变化特征研究

高文兰^{1,2},李双双^{1,2},段克勤^{1,2},孔锋³,王娟⁴

(1.陕西师范大学地理科学与旅游学院,陕西 西安 710119; 2.陕西师范大学/地理学国家级实验教学示范中心, 陕西 西安 710119; 3.中国气象局发展研究中心,北京 100081; 4.陕西省气象局,陕西 西安 710119)

摘要: 基于1960~2015年西安气象站点逐日最高温、最低温数据,采用RHtest软件对非均一化气温序列进行订正,进而选取16项极端气温指数,对西安极端气温变化特征进行分析。结果表明:①由于气象站点迁移,西安气温资料存在非均一性,导致极端气温变化趋势被低估;②全球变暖背景下,西安极端气温变化表现出:“快速增温与平稳波动并存,冷暖变化趋势相反,夜晚增暖趋势比白天明显,白天波动变化明显于夜晚,持续性高温事件变化不大,持续性低温事件大幅下降”的变化特征;③通过不同区域趋势变化对比、冷暖、昼夜变化关系对比发现,受城市热岛影响,西安极端低温事件减少更为突出,远高于中国其他对比区域(秦岭南北、黄土高原、东北地区等);④在昼夜变化上,西安极端气温变化与中国、全球变化具有一致性,但是通过冷暖指标对比发现,西安极端气温变化具有区域性,表现为冷昼日数下降高于暖昼日数上升,冷夜日数下降高于暖夜日数上升,冷持续日数和暖持续日数共同表现为下降趋势。

关键词: 气候变化;均一化;极端气温;西安

中图分类号: P468.0+21

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2018)03-0464-10

在全球尺度上,70%地区极端气温事件呈现昼夜增温的不对称性^[1];欧洲、美国东部、大洋洲等地区极端气温事件也呈现不断增加的趋势^[2-4]。在中国,许多学者针对不同地理区域极端气温时空变化进行研究,指出黄土高原^[5]、长江流域^[6]、珠江流域^[7]、中国沿海^[8]极端气温呈现冷指数下降,暖指数上升的变化趋势,高纬度地区变幅更为明显^[9];从冷暖指标角度分析,发现中国不同区域极端气温变化具有“冷暖不对称、季节不同步、昼夜不对称”的特征^[10]。此外,不同省市极端气温的研究也逐渐增多^[11-13]。由于气候背景、区域特征、驱动力等存在差异,不同区域极端气温的变化特征往往不同;加之,快速城市化的影响,许多气象站点均出现迁址、观测仪器、统计规则和方法等变更的情况,导致观测序列存在系统性偏差^[14]。利用非均一化数据,分析城市地区极端气温变化,会低估或得出错误

的结论^[15]。

西安城市规模不断扩大,使得城市气候发生明显变化。在已有研究中,许多学者综合气象和遥感数据,对西安热岛效应的时空演变、形成机制进行研究^[16],揭示了经济发展、人口增长、能源消耗等因素对热岛强度的贡献程度^[17],且以景观生态格局、冬季供暖能耗、城市雾霾日数变化为切入,分析气候变暖对生态环境、居民生活的影响^[18-20]。值得一提的是,西安快速城市化,加强了热岛效应,使原设立在北郊气象站的周边环境发生变化,不再满足本地气候观测要求。在2006年,西安气象观测站迁至泾河工业园区,承担国家基准气候站观测任务。迁站导致气象数据存在非均一性,使得相关研究呈现2种态势:①在区域尺度分析时,放弃西安站,仅选择气候资料连续的站点进行研究^[21];②在城市尺度分析时,衔接新旧资料,不关

收稿日期: 2017-03-23; **修订日期:** 2017-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701592, 41571062)、中央高校基本科研业务费专项项目(GK201703048)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41701592, 41571062), Fundamental Research Funds for the Central Universities (GK201703048).]

作者简介: 高文兰(1985-),女,山西忻州人,博士研究生,主要从事全球变化与极端天气事件研究。E-mail: gaowenlan1@126.com

通讯作者: 李双双,讲师。E-mail: lss40609010@126.com

注气候资料非均一化影响^[22]。基于非均一化的观测资料,会导致西安极端气温变化研究结论存在不确定性,甚至隐瞒真实的气候变化趋势^[14]。

基于此,本文首先对气象站点迁移导致的气温数据的不连续点进行检测,并对气温数据进行均一性订正;然后选取气候变化检测、监测和指标专家组(ETCCDMI)推荐的16项极端气温指标,对1960~2015年西安极端气温变化趋势进行分析;通过均一化前后趋势对比,中国不同区域趋势变化对比,分析前期研究结论的不确定性,说明西安极端气温变化的特殊性,以期为区域适应、减缓和应对气候变化提供理论支持。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文气象数据来源于国家气候中心和陕西省气象局,数据经过严格的质量控制;除礼泉、泾阳缺测数据低于0.5%外,其他33个站点数据缺测率较低。在此,对个别台站缺测资料进行插补处理,经补插后的台站数据具有较好的连续性和完整性(图1)。

1.2 研究方法

1.2.1 极端气温指数定义

本文极端气温指数采用气候变化检测、监测和指标专家组(ETCCDMI)推荐的16项极端气温指数

(表1),已被广泛应用于极端气候事件的研究。

1.2.2 RHtest 均一性检验

2006年,西安气象站由未央路(现为市区)迁至泾河工业园(现为郊区),由于城市热岛效应,泾河站气温低于原观测站(图2)。采用RHtests v4软件,对西安气温数据进行均一性检验及订正。在参考站点选择方面,依据关中地区35个台站资料,以距离泾河站<100 km、高差<200 m为标准,选取周边地区10个候选参考站(图1)。以此为基础,选择相关系数 $r>0.80$ 的渭南和蒲城2站,利用相关系数加权法构建参考序列。

2 结果分析

2.1 均一化订正前后极端气温变化特征

西安年均最高、最低温订正前后曲线交点均出现在2006年,说明2006年气象站点迁移是西安气温非均一化的主要原因。1960~2015年西安年均最高、最低温分别为19.6℃、9.6℃,订正后分别为19.3℃、9.3℃,订正后2006年之前气温均有所下降(图3)。

1) 在趋势变化上,1960~2015年西安原始序列和订正序列年均最高温、最低温呈现显著的上升趋势($P<0.05$)。其中,原始序列年均最高温、最低温增温速率分别为0.19℃/10a、0.48℃/10a,订正后分别为0.25℃/10a、0.54℃/10a,订正后增温幅度

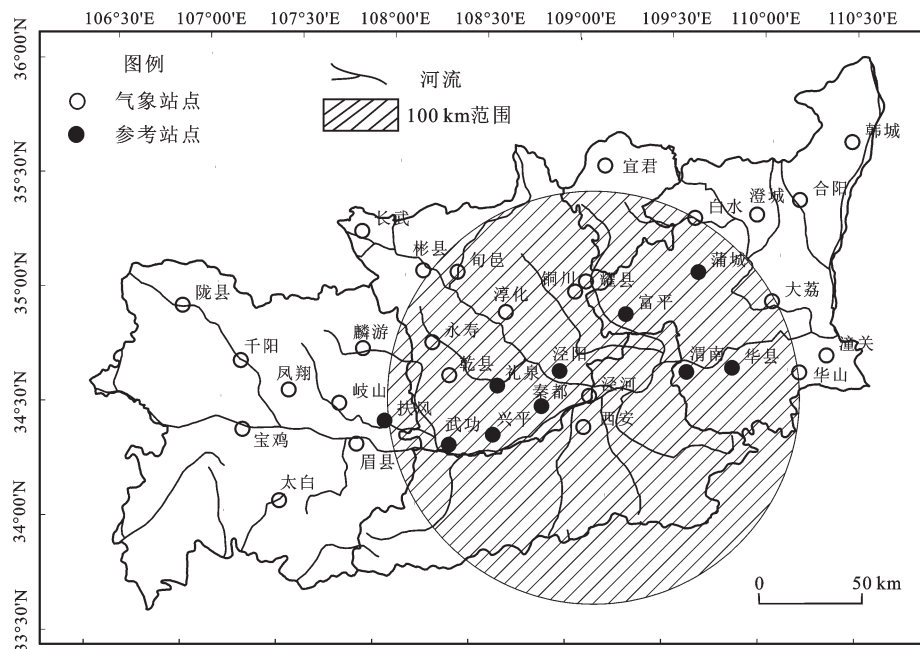


图1 研究区位置及气象站点分布

Fig.1 Study area and distribution of meteorological stations

表1 极端气温指数定义

Table 1 The definition of extreme temperature indices

分类	缩写	极端气温指数	定义	单位
绝对指数	<i>SU</i>	夏季日数	年内日最高温>25℃的日数	d
	<i>TR</i>	热夜日数	年内日最低温>20℃的日数	d
	<i>ID</i>	冰冻日数	年内日最高温<0℃的日数	d
	<i>FD</i>	霜冻日数	年内日最低温<0℃的日数	d
相对指数	<i>TX</i> ₉₀	暖昼日数	年日最高温>1971~2000年第90个百分位值的日数	d
	<i>TX</i> ₁₀	冷昼日数	年日最高温<1971~2000年第10个百分位值的日数	d
	<i>TN</i> ₉₀	暖夜日数	年日最低温>1971~2000年第90个百分位值的日数	d
	<i>TN</i> ₁₀	冷夜日数	年日最低温<1971~2000年第10个百分位值的日数	d
极值指数	<i>TX</i> _x	最高温极高值	年日最高温的最大值	℃
	<i>TX</i> _n	最高温极低值	年日最高温的最小值	℃
	<i>TN</i> _x	最低温极高值	年日最低温的最大值	℃
	<i>TN</i> _n	最低温极低值	年日最低温的最小值	℃
持续指数	<i>WSDI</i>	暖持续日数	年日最高温>1971~2000年第90个百分位值的连续6 d日数	d
	<i>CSDI</i>	冷持续日数	年日最低温<1971~2000年第10个百分位值的连续6 d日数	d
	<i>DTR</i>	气温日较差	年内日最高温与最低温差值	℃
	<i>GSL</i>	生物生长季	首次气温连续6 d>5℃与首次连续6 d<5℃间隔的日数	d

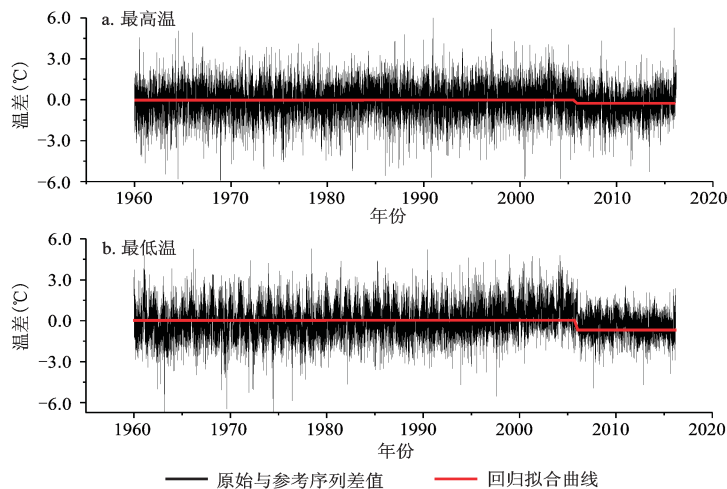


图2 1960~2015年泾河站日最高、最低温均一化检验结果

Fig.2 Homogeneity assessment results for daily maximum and minimum temperature in Jinghe station during 1960-2015

有所上升,最低温(夜间)增温速率高于最高温(白天)。

2) 在年代变化上,1960~2015年西安最高温变化可分为3个阶段:1960~1985年为波动下降期,1986~2002年为快速上升期,2003~2015年为先降后升期;与最高温相比,最低温变化略有差异,主要体现在第1阶段(1960~1985年),最低温呈现先下降后缓慢上升,并未呈现明显的波动下降。

2.2 极端气温指数变化特征

2.2.1 绝对指数变化特征

1960~2015年西安夏季日数和热夜日数呈现显著的上升趋势,变化速率分别为3.40 d/10a和5.45 d/10a,两者线性拟合趋势均通过0.01显著水平检验(图4)。对于冷指标而言,衡量白天寒冷程度的冰冻日数,呈现不显著的下降趋势(−0.75 d/10a);衡量夜间寒冷程度的霜冻日数,呈现明显的下降趋势(−6.96 d/10a)。说明西安夏季日数不断增加,

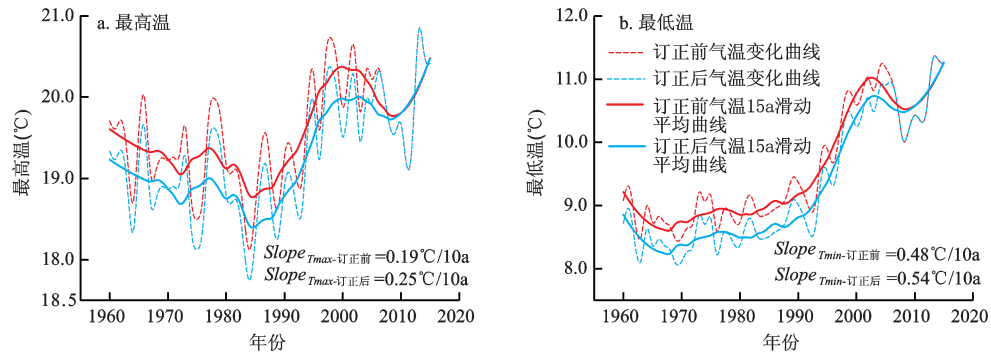


图3 1960~2015年西安均一化订正前后气温序列

Fig.3 Temperature series before and after homogenization in Xi'an during 1960-2015

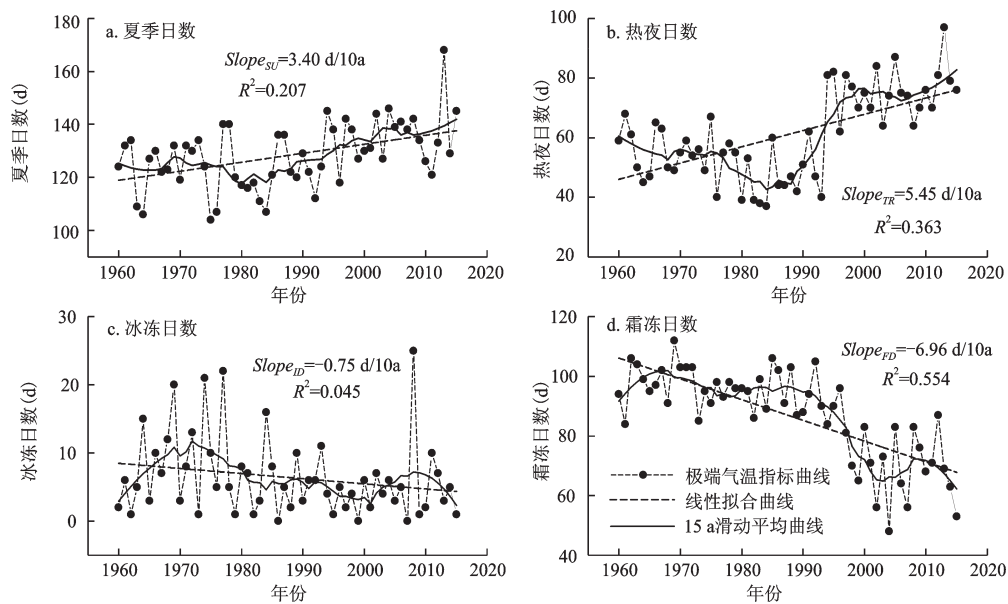


图4 1960~2015年西安极端气温绝对指数年际变化趋势

Fig.4 Linear trend in absolute indices of annual extreme temperature events in Xi'an during 1960-2015

夜晚炎热程度不断增强,白天寒冷程度减弱较小,夜间寒冷程度明显下降,无霜期不断增加。

在变化过程上,西安绝对指数变化主要特征表现为:快速增温与平稳波动并存,冷暖变化趋势相反。其中,① 20世纪60年代到80年代中期,夏季日数平稳波动后略有下降,冰冻日数先上升后下降;热夜日数持续下降、霜冻日数则平稳波动;② 20世纪80年代末到21世纪初,夏季日数快速增长,冰冻日数则维持平稳波动;热夜日数先快速增长后维持高位波动,而霜冻日数则先快速下降后维持低位波动。

2.2.2 相对指数变化特征

1960~2015年西安极端气温变化呈现出新的特

征:“夜晚增暖趋势明显于白天,白天年代波动明显于夜晚”。其中,暖夜日数变化趋势为5.16 d/10a,高于暖昼日数上升速率0.21 d/10a;冷夜日数变化趋势为-5.66 d/10a,高于冷昼日数下降速率-2.18 d/10a。说明在白天,西安炎热程度增加不明显,寒冷程度略有下降;而夜晚炎热程度大幅上升,寒冷程度呈现快速下降(图5)。

在变化过程上,暖昼日数变化峰值年分别为:1969年、1997年,冷昼日数峰值年分别为:1974年、1984年、1989年和2012年,整体曲线呈现明显的年代“高低波动”特征。在夜间,暖夜日数呈现“Z”型突变增长,20世纪60年代到80年代中期维持低位波动且略有下降,20世纪80年代末到90年代呈

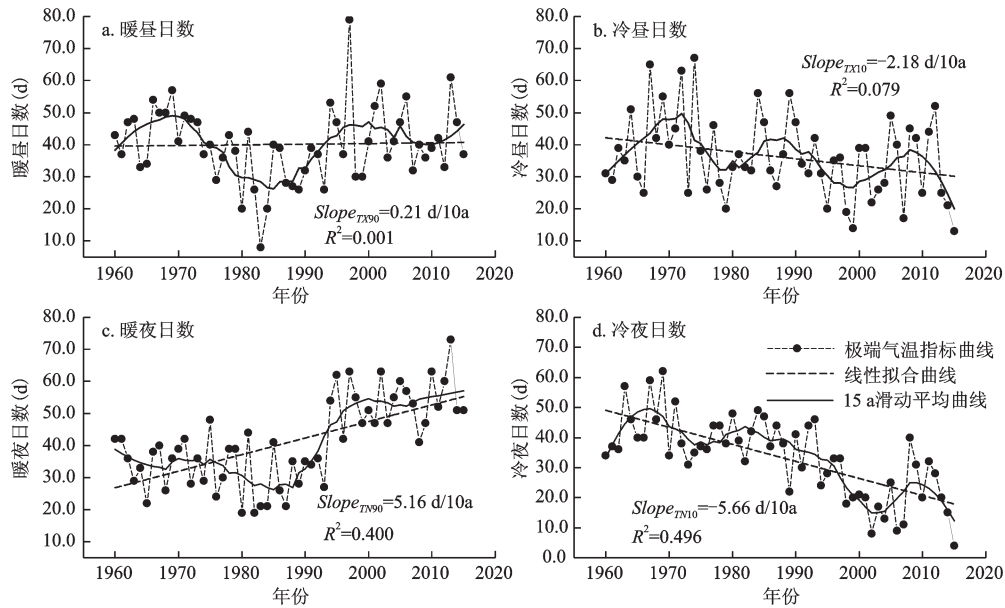


图5 1960~2015年西安极端气温相对指数变化特征

Fig.5 Linear trend in relative indices of annual extreme temperature events in Xi'an during 1960-2015

快速上升趋势,1998年后则维持高位稳定波动,这与全球变暖停滞时间一致;对于冷夜日数变化而言,线性变化趋势更加明显,也可以清晰看到,1998~2015年冷夜日数下降趋势减弱,且维持低位波动。也就是说,全球变暖停滞背景下,西安昼夜炎热程度增加趋势有所减弱,昼夜寒冷程度在大幅下降后,处于低位平稳波动状态。

2.2.3 持续指数变化特征

1960~2015年西安暖持续日数以平稳波动为主,冷持续日数呈现波动下降,气温日较差持续减小,作物生长季则呈现波动上升。除暖持续日数趋势不显著外,其他指数变化均通过0.05水平显著检验(图6)。说明西安持续性高温事件变化不大,但是持续性低温事件大幅下降。在变化过程上,西安冷持续日数呈稳步下降趋势(-2.76 d/10a),1960~1989年冷持续日数年均均为16.0 d,1990~2015年下降为7.1 d;由于夜间温度的快速上升,西安昼夜温差持续下降,生长季长度也在增加。但是20世纪80年代,生长季存在一个“谷值”,其中,1981~1991年生长季年均均为267.2 d,低于1960~2015年生长季年均长度279.5 d。

2.2.4 极值指数变化特征

近56 a西安极值指数呈现快速上升趋势(图7)。其中,最高温极高值、最高温极低值、最低温极高值和最低温极低值上升速率为: 0.03°C/10a 、

0.22°C/10a 、 0.28°C/10a 和 0.59°C/10a 。在变化阶段上,最高温极高值和最低温极高值变化具有一致性,以1984年为界,均呈现出先下降后上升的变化过程;最高温极低值和最低温极低值变化趋势基本一致,均无明显的趋势转折,呈现波动上升趋势;最低温极低值的增温趋势最为明显,其次是最低温极高值和最高温极低值,最高温极高值增温幅度最小。

2.2.5 不同区域极端气温指数对比

在已有研究基础上,对比气温均一化前后、以及东北地区^[23]、黄土高原^[15]、秦岭地区^[24]、长江流域^[6]、珠江流域^[7]、中国^[25]和全球^[26]等7个区域极端气温变化趋势,说明西安极端气温变化的特殊性(表2)。

1) 均一化后极端气温趋势均有上升。除昼夜温差(DTR)之外,均一化后西安极端气温变化幅度均高于非均一化数据。其中,均一化之前暖昼日数为下降趋势(-0.21 d/10a),经均一化之后,暖昼日数上升趋势为 0.21 d/10a ,更符合区域变暖的客观事实。同时,均一化之后,夏季日数、暖夜日数和生长季增加趋势更加明显,霜冻日数和冷夜日数下降趋势也更加显著,说明采用非均一化数据,会低估西安极端气温的变化趋势。

2) 西安极端低温事件下降幅度突出。与中国其他区域相比,西安绝对指标(SU、TR、FD)、相对指标(TN_{90} 、 TN_{10})、极值指标(TN_x)、持续性指标

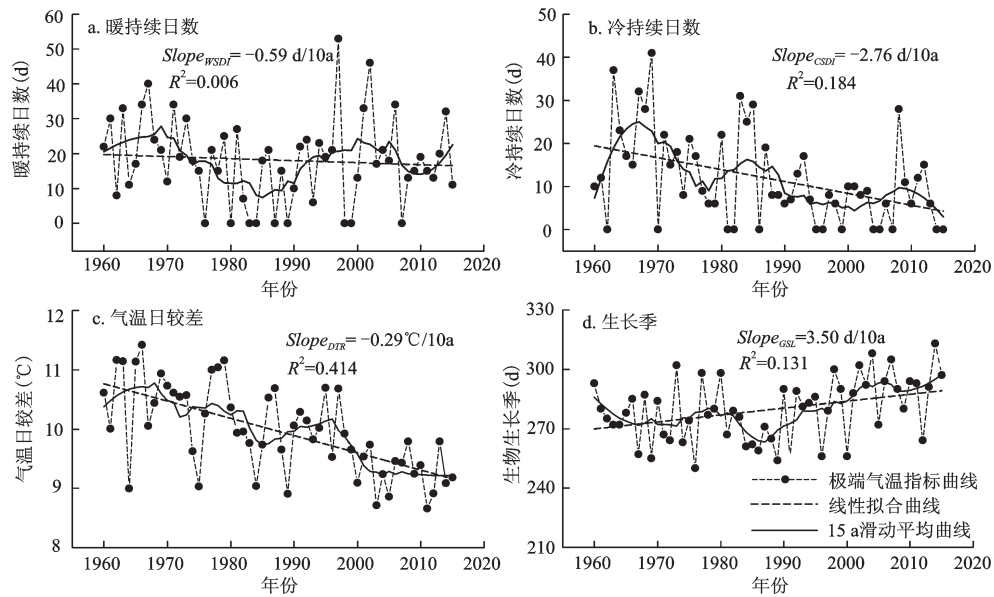


图6 1960~2015年西安极端气温持续指数变化特征

Fig.6 Linear trend in durative indices of annual extreme temperature events in Xi'an during 1960-2015

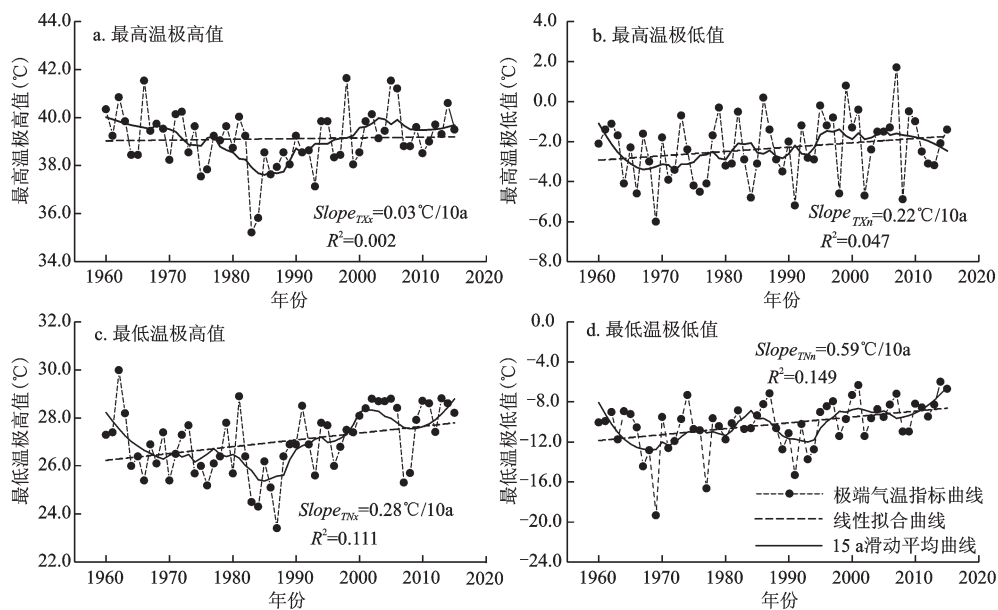


图7 1960~2015年西安极端气温极值指数变化特征

Fig.7 Linear trend in extremal indices of annual extreme temperature events in Xi'an during 1960-2015

(CSDI、DTR、GSL)等9个指数的变幅,均高于其他区域;除SU、DTR、GSL外,其他指标均与最低温度有关,说明在夜间,西安极端气温变化幅度比其他区域更为明显。其原因可能是:对比区域多为气候背景,西安极端气温变化则叠加城市热岛效应,使得夜间增温幅度高于其他地区。

3) 西安极端高温事件上升幅度较弱。与中国

其他区域相比,西安暖昼日数、最高温极高值、最高温极低值上升幅度小于其他对比区域;与此同时,对比区域暖持续日数变化呈现显著上升趋势,但是西安地区却呈现不显著的下降趋势。上述4个极端气温指数均与最高温相关,说明在白天,西安极端气温上升幅度比其他区域偏弱。

4) 冷/暖、昼/夜差异对比。1960~2015年西安

表2 西安与其他区域极端气温指数变化趋势对比

Table 2 Trends of temperature extremes from this study and other works

指数	本文		东北地区		黄土高原		秦岭南北		长江流域		珠江流域		中国		全球	
	1960~2015年		1960~2011年		1960~2013年		1960~2012年		1960~2012年		1960~2012年		1961~2010年		1951~2011年	
均一化	否	是	否	是	否	是	否	是	否	是	否	是	否	是	否	是
<i>SU</i>	2.87°	3.40°	2.30°	2.76°	2.49°	2.16°	1.60°	2.30°	0.47°							
<i>TR</i>	5.41°	5.45°	1.42°	1.24°	1.95°	1.05°	2.58°	1.90°	0.91°							
<i>ID</i>	-0.39	-0.75	-1.74°	-2.21°	-0.50°	-0.42°	-0.02	-1.70°	-1.23°							
<i>FD</i>	-5.96°	-6.96°	-3.36°	-3.22°	-3.39°	-3.04°	-0.68°	-3.40°	-1.80°							
<i>TX₉₀</i>	-0.21	0.21	0.97°	2.60°	1.37°	1.71°	1.01°	1.60°	0.80°							
<i>TX₁₀</i>	-1.89°	-2.18°	-0.86°	-2.71°	-0.95°	-1.03°	-0.02	-0.80°	-0.67°							
<i>TN₉₀</i>	4.46°	5.16°	2.17°	3.41°	2.70°	2.95°	1.98°	2.80°	1.17°							
<i>TN₁₀</i>	-5.06°	-5.66°	-1.80°	-4.31°	-2.39°	-3.45°	-1.23°	-1.70°	-1.09°							
<i>TX_x</i>	0.01	0.03	0.11	/	0.05°	0.14°	0.10°	0.19°	0.11°							
<i>TX_n</i>	0.17	0.22	0.39	/	0.26°	0.28°	0.22	0.34°	0.28°							
<i>TN_x</i>	0.25°	0.28°	0.23°	/	0.11°	0.18°	0.16°	0.25°	0.12°							
<i>TN_n</i>	0.49°	0.59°	0.82°	/	0.31°	0.42°	0.44°	0.56°	0.45°							
<i>WSDI</i>	-0.71	-0.59	/	0.68°	0.56°	0.73°	1.23°	2.30°	1.18°							
<i>CSDI</i>	-2.58°	-2.76°	/	-0.69	-0.29°	-1.60°	-0.56°	-0.40°	-0.62°							
<i>DTR</i>	-0.29°	-0.29°	-0.24	-0.06	-0.07°	-0.09°	-0.11°	/	-0.09°							
<i>GSL</i>	2.69°	3.50°	2.62°	3.16°	2.38°	/	0.28	2.80°	1.01°							

注: *表示通过0.05水平的显著性检验; /表示无数据。

冷指数(*FD*、*TX₁₀*、*TN₁₀*)变暖幅度高于暖指数(*TR*、*TX₉₀*、*TN₉₀*)、夜指数(*TN₉₀*、*TN₁₀*)变暖幅度高于昼指数(*TX₉₀*、*TX₁₀*)、低温指数(*TN_x*、*TN_n*)增温幅度快于高温指数(*TX_x*、*TX_n*)、气温极低值(*TX_n*、*TN_n*)增温幅度高于气温极高值(*TX_x*、*TN_x*)。西安极端气温变化趋势呈现出“冷暖不对称、昼夜不对称”的特点。

与黄土高原相似,1960~2015年西安 *TX₁₀*/*TN₁₀* 下降幅度高于 *TX₉₀*/*TN₉₀* 上升幅度,长江流域仅表现为 *TN₁₀* 下降幅度高于 *TN₉₀* 上升幅度,东北地区、秦岭地区、珠江流域、中国及全球则与之相反,*TX₁₀* 和 *TN₁₀* 下降幅度低于 *TX₉₀* 和 *TN₉₀* 上升幅度。与此同时,与中国其他区域相似,西安 *ID* 下降趋势低于 *SU* 上升趋势,但是与全球尺度规律相反。除珠江流域之外,西安与其他区域共同表现为 *FD* 下降趋势高于 *TR* 上升趋势。在黄土高原和长江流域,*CSDI* 下降趋势快于 *WSDI* 上升趋势,其他区域呈现 *CSDI* 下降趋势慢于 *WSDI* 上升趋势,两指数在西安却共同呈现下降趋势,仅是 *WSDI* 下降趋势小于 *CSDI*。上述4个方面,西安极端气温变化与其他区域不一致。

西安极端气温变化与中国其他区域一致的指标,主要为极值指标、低温指标。这些指标对比关系本质是:夜间增温快于白天。说明在冷暖指标上,西安极端气温变化具有区域性,而在昼夜指标上,西安极端气温变化与中国、全球变化具有一致性。

3 结论与讨论

3.1 结论

基于1960~2015年均一化的逐日最高、最低气温数据,利用16项极端气温指数,对西安极端气温变化特征进行分析,通过均一化前后趋势对比,中国不同区域趋势变化对比,冷暖、昼夜变化对比,分析前期研究结论的不确定性,说明西安极端气温变化的特殊性。得到结论如下:

1) 受城市化影响,西安气象站由城区迁往郊区,导致数据存在非均一化。经均一化订正后,1960~2015年西安年均最高温和最低温有所下降,但是增温趋势明显上升。除昼夜温差(*DTR*)之外,均一化后西安极端气温变化幅度均高于非均一化数据,说明采用非均一化数据,会低估西安极端气温的变化趋势。

2) 1960~2015年西安极端气温变化呈现:“快速增温与平稳波动并存,冷暖变化趋势相反,夜晚增暖趋势明显于白天,白天波动变化明显于夜晚,持续性高温事件增加较弱,持续性低温事件大幅减少”的变化特征。全球变暖背景下,西安夜晚温度不断上升,夏季日数不断增加,夜晚炎热程度不断增强;白天寒冷程度波动变化,夜间寒冷程度明显下降;昼夜温差不断减小,生长季也不断变长。

3) 通过均一化前后趋势对比、不同区域趋势变化对比、冷暖、昼夜变化关系对比,发现采用非均一化数据,会低估西安极端气温变化趋势;受城市热岛效应影响,西安极端低温事件变化幅度更为突出,远高于中国其他对比区域(秦岭南北、黄土高原、东北地区等);在昼夜变化上,西安极端气温变化与中国、全球变化具有一致性,呈现出:“冷暖不对称、昼夜不对称”的特征,但是在冷暖变化上,西安极端气温变化更具有区域性,其中冷昼日数下降幅度高于暖昼日数上升幅度,冷夜日数下降幅度高于暖夜日数上升幅度,冷持续日数和暖持续日数共同表现为下降趋势。

3.2 讨论

关于西安极端气温变化特征的研究,未来还有许多工作值得探索。

1) 热岛效应分析。在夜间,西安极端低温变化幅度比中国其他区域偏高;在白天,极端高温变化幅度比中国其他区域偏弱。Skarbit等对匈牙利南部城市赛格德城市气候研究发现,夏末秋初,赛格德市白天呈现冷岛效应,而夜晚的热岛效应更突出^[27]。由于小时数据获取的限制,前期西安热岛效应研究,涉及逐小时昼夜响应差异分析相对较少。利用白天最高温数据(14时左右),会忽略早晨(8~9时)城市的冷岛效应。因此,未来研究中,明晰西安白天是否存在冷岛效应,探讨夜间热岛效应季节和年代变化特征,解释“西安夜间增温偏强,白天增温偏弱”的原因,是未来研究的重点方向。

2) 气候适应分析。提高极端天气风险管理和适应气候变化的能力,是区域经济社会可持续发展的内在需求。从极端气温变化转为适应性研究,需要关注基础设施建设、城市发展、公共健康管理中的风险问题。尤其是公共健康方面,利用更加精细化和客观的热量平衡模型,评估西安不同区域居民对极端气温的感知变化,为科学适应

气候变化提供决策依据。

参考文献(References):

- [1] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D5):1042-1063.
- [2] Klein A M G, Konnen G P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(22):3665-3680.
- [3] Peterson T C, Manton M J. Monitoring changes in climate extremes: A tale of international collaboration[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(9):1266-1271.
- [4] Chambers L E, Griffiths G M. The changing nature of temperature extremes in Australia and New Zealand[J]. *Australian Meteorological Magazine*, 2007, 57(57):13-35.
- [5] Sun W Y, Mu X M, Song X Y et al. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960-2013 under global warming[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 168(22):33-48.
- [6] Guan Y H, Zhang X C, Zheng F L et al. Trends and variability of daily temperature extremes during 1960-2012 in the Yangtze River Basin, China[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 124: 79-94.
- [7] 刘青娥,吴孝情,陈晓宏,等.珠江流域1960-2012年极端气温的时空变化特征[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8):1356-1366. [Liu Qing'e, Wu Xiaoqing, Chen Xiaohong et al. Temporal and spatial variation characteristics of extreme temperature in the Pearl River Basin during 1960-2012. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8):1356-1366.]
- [8] 黄小燕,王小平,王劲松,等.1960-2013年中国沿海极端气温事件变化特征[J]. *地理科学*, 2016, 36(4):612-620. [Huang Xiaoyan, Wang Xiaoping, Wang Jinsong et al. Variation of extreme temperature events in coastal region of China in 1960-2013. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(4):612-620.]
- [9] You Q L, Kang S C, Aguilar E et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36(11):2399-2417.
- [10] 任国玉,封国林,严中伟.中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. *气候与环境研究*, 2010, 15(4):337-353. [Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4):337-353.]
- [11] 袭祝香,纪玲玲,高晓获,等.吉林省极端严寒事件时空分布特征及评估方法研究[J]. *地理科学*, 2015, 35(10): 1341-1346. [Xi Zhuxiang, Ji Lingling, Gao Xiaodi et al. Spatial-temporal characteristics and assessment of the bitter cold event in Jilin Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(10):1341-1346.]

- [12] 杜海波, 吴正方, 张娜, 等. 近60a丹东极端温度和降水事件变化特征[J]. 地理科学, 2013, 33(4):473-480. [Du Haibo, Wu Zhengfang, Zhang Na et al. Characteristics of extreme temperature and precipitation events over Dandong during the last six decades. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(4):473-480.]
- [13] 李双双, 杨赛霓. 1960~2014年北京极端气温事件变化特征[J]. 地理科学, 2015, 35(12):1640-1647. [Li Shuangshuang, Yang Saini. Changes of extreme temperature events in Beijing during 1960-2014. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(12):1640-1647.]
- [14] 严中伟, 李珍, 夏江江. 气候序列的均一化——定量评估气候变化的基础[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10):2101-2111. [Yan Zhongwei, Li Zhen, Xia Jiangjiang. Homogenization of climate series: The basis for assessing climate change. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(10):2101-2111.]
- [15] 曹丽娟, 严中伟. 地面气候资料均一性研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(2):129-135. [Cao Lijuan, Yan Zhongwei. Progresses in research of homogenization of climate data. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(2):129-135.]
- [16] 高红燕, 蔡新玲, 贺皓, 等. 西安城市化对气温变化趋势的影响[J]. 地理学报, 2009, 64(9):1093-1102. [Gao Hongyan, Cai Xinling, He Hao et al. The impact of urbanization on the surface temperature in Xi'an. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(9):1093-1102.]
- [17] 刘宇峰, 原志华, 孔伟, 等. 1993-2012年西安城区城市热岛效益强度变化趋势及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6):974-985. [Liu Yufeng, Yuan Zhihua, Kong Wei et al. The changing trend of heat island intensity and main influencing factors during 1993-2012 in Xi'an city. *Journal of Natural Resource*, 2015, 30(6):974-985.]
- [18] 卞子浩, 马超群, 王迪, 等. 西安地区热岛效应与景观生态格局相关性研究[J]. 干旱气象, 2016(2):342-348. [Bian Zihao, Ma Chaoqun, Wang Di et al. Relation between the urban heat island effect and landscape ecological pattern in Xi'an region. *Journal of Arid Meteorology*, 2016(2):342-348.]
- [19] 庞文保, 刘宇, 张海东. 气候变暖与西安市冬季供暖的能源消耗分析[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4):73-76. [Pang Wenbao, Liu Yu, Zhang Haidong. Climate warming and energy consumed for winter heating in Xi'an. *Advances in climate change research*, 2007, 3(4):73-76.]
- [20] 王珊, 修天阳, 孙扬, 等. 1960-2012年西安地区雾霾日数与气象因素变化规律分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(1):19-26. [Wang Shan, Xiu Tianyang, Sun Yang et al. The changes of mist and haze days and meteorological element during 1960-2012 in Xi'an. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(1):19-26.]
- [21] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 1965-2013年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异[J]. 地理研究, 2016, 35(4):639-652. [Zhao Anzhou, Liu Xianfeng, Zhu Xiufang et al. Trend variations and spatial difference of extreme air temperature events in the Loess Plateau from 1965 to 2013. *Geographical Research*, 2016, 35(4):639-652.]
- [22] 孙娟, 魏娜, 郝丽, 等. 近60年西安市极端气温事件变化特征分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2014, 44(6):997-1000. [Sun Xian, Wei Na, Hao Li et al. Characteristics of extreme temperature events in Xi'an for the latest 60 years. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2014, 44(6):997-1000.]
- [23] Yu Z, Li X L. Recent trends in daily temperature extremes over northeastern China (1960-2011) [J]. *Quaternary International*, 2015, 380-381:35-48.
- [24] Jiang C, Mu X M, Wang F et al. Analysis of extreme temperature events in the Qinling Mountains and surrounding area during 1960-2012 [J]. *Quaternary International*, 2016, 392(4):155-167.
- [25] Zhou B T, Xu Y, Wu J et al. Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: analysis of a high-resolution grid dataset [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 36(3):1051-1066.
- [26] Donat M G, Alexander L V, Yang H et al. Global land-based datasets for monitoring climatic extremes [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(7):997-1006.
- [27] Skarbit N, Stewart I D, Unger J et al. Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the 'local climate zones' of Szeged, Hungary [J]. *International Journal of Climatology*, 2017. DOI: 10.1002/joc.5023.

Changes of Extreme Temperature Events in Xi'an City Based on Homogenized Data

Gao Wenlan^{1,2}, Li Shuangshuang^{1,2}, Duan Keqin^{1,2}, Kong Feng³, Wang Juan⁴

(1. *School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China*; 2. *National Demonstration Center for Experimental Geography Education(Shaanxi Normal University), Xi'an 710119, Shaanxi, China*;
3. *Research Centre for Strategic Development, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*;
4. *Shaanxi Meteorological Administration, Xi'an 710119, Shaanxi, China*)

Abstract: Based on daily maximum and minimum temperatures observed by the China Meteorological Administration at the Xi'an meteorological station during the period 1960-2015, the series exhibiting breakpoints are adjusted using RH test software. Temporal trends of 16 extreme temperature indices are evaluated by least-squares linear regression and moving average methods; the linear trends are significant for 11 of these 16 indices. The trends of extreme temperature indices for Xi'an, China, the globe, and other regions in China are compared. Further, trends of the relative magnitudes of cold versus warm indices and day versus night indices are compared. The results are as follows: 1) Due to the migration of the meteorological station, the value of the temperature series is lower than the original meteorological station data. The warming trends of extreme temperatures are underestimated based on the in-homogeneity dataset. 2) In the context of global warming, extreme temperature variation presents its own characteristics in Xi'an. First, the extreme temperature trends show rapid warming with stable fluctuation, but the opposite trends occur in warm and cold indices; warm indices increase while cold indices decrease. Second, the warming trends are faster during the nighttime than the daytime, whereas the amplitudes of fluctuations are greater during the daytime than the nighttime. Third, warm spell events increase slowly, but cold spell events decrease rapidly. 3) Extreme temperature indices are compared between Xi'an and other regions (the southern and northern regions of the Qinling Mountains, the Loess Plateau, northeast China, etc.). Due to the impact of the urban heat island phenomenon, the decrease of extreme low temperature events is more pronounced in Xi'an than in the other regions compared. 4) With regard to daytime versus nighttime indices, the nighttime indices in all regions show the characteristic of warming faster than the daytime indices. In the case of cold versus warm indices, Xi'an exhibits its regional features: the warming magnitude is faster on cold days than on warm days, and a similar trend is seen on cold nights and warm nights; indices of cold and warm spell durations show a downward trend. Overall, this study indicates that the trends of temperature extremes in Xi'an are in accordance with global warming during 1960-2015.

Key words: climate change; homogeneity; extreme temperature; Xi'an