

# 1955—2017 年陕西省极端气温事件时空变化特征

安彬<sup>1,2,3</sup>, 张淑兰<sup>1,2</sup>, 肖薇薇<sup>1,2,3</sup>, 孙虎<sup>4</sup>

(1.秦巴国土资源利用与环境保护协同创新中心, 陕西 安康 725000;

2.安康市汉江水资源保护与利用工程技术研究中心, 陕西 安康 725000;

3.陕西省科协院士专家工作站, 陕西 安康 725000; 4.陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119)

**摘 要:**为了深入认识气候变暖背景下陕西省极端气温事件变化规律,根据陕西省 1955—2017 年 20 个气象站逐日最高和最低气温资料,利用软件 RCLimDex(1.0)计算 10 种极端气温指数,辅以线性拟合、M-K 突变和累积距平、相关分析等方法,分析了陕西省极端气温时空变化特征。结果表明:(1)近 63 a 陕西省极端最高气温、极端最低气温及表征暖指数的夏日、热夜、暖昼和暖夜日均呈增加趋势,表征冷指数的霜冻、冰冻、冷昼和冷夜日数呈显著减少趋势,多数极端气温指数突变年份集中在 20 世纪 90 年代中后期—21 世纪初。(2)空间上,极值指数和表征极端气温暖指数在多数站点呈增加趋势,表征极端气温冷指数在多数站点呈减少趋势;镇安、定边和铜川站的各指数倾向率变幅最为明显。(3)近 63 a 来陕西省白昼增温幅度低于夜间增温幅度,暖夜日数上升趋势快于暖昼,冷昼日数下降趋势快于冷夜,存在气温昼夜指数变化的不对称性。陕西省极端气温事件主要受日最高、最低温升高的影响,而日最高温的上升对各指数影响更为明显。

**关键词:**极端气温指数;倾向率;突变;相关分析;陕西省

**中图分类号:**P467

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)06-0317-07

## Spatial and Temporal Characteristics of Extreme Temperature Events in Shaanxi Province During 1955—2017

AN Bin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shulan<sup>1,2</sup>, XIAO Weiwei<sup>1,2,3</sup>, SUN Hu<sup>4</sup>

(1.Collaborative Innovation Center of Qinba Land and Resources Utilization and

Environment Protection, Ankang, Shaanxi 725000, China; 2.Engineering Technology Research

Center for Water Resource Protection and Utilization of Hanjiang River, Ankang, Shaanxi 725000,

China; 3.Academician Expert Workstation of Shaanxi Association for Science and Technology, Ankang,

Shaanxi 725000, China; 4.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:**In order to have a deep recognition of the variation features of extreme temperature events in Shaanxi Province under the influence of global warming, based on the daily maximum and minimum temperature data of 20 meteorological stations in the period of 1955—2017 in Shaanxi Province, 10 types of extreme temperature indices were calculated by RCLimDex (1.0). Thus, spatial and temporal characteristics of extreme temperature events were analyzed by linear fitting, Mann-Kendall(M-K) mutation test, cumulative departure and correlation analysis, etc. The results showed that the occurrence of summer days (SU<sub>25</sub>), tropical nights (TR<sub>20</sub>), warm days (TX<sub>90</sub>), warm nights (TN<sub>90</sub>) had the obvious increasing trends; the monthly maximum value of daily maximum temperature (TX<sub>x</sub>) and monthly minimum value of daily minimum temperature (TN<sub>n</sub>) showed the increasing trends of 0.17℃/decade, 0.19℃/decade; on the contrary, the occurrence of frost days (FD<sub>0</sub>), ice days (ID<sub>0</sub>), cool days (TX<sub>10</sub>) and cool nights (TN<sub>10</sub>) were found to decrease significantly; most of the sudden changes of extreme temperature indices concentrated from the middle and late 1990s to the beginning of the 21st century; in terms of spatial distribution, most stations of

收稿日期:2019-12-23

修回日期:2020-01-16

资助项目:国家自然科学基金重点项目(41230852);陕西省科技厅项目(2017NY-202);安康学院高层次人才科研专项(182401245);陕西省教育厅项目(17JK0014)

第一作者:安彬(1988—),男,江西九江人,硕士,讲师,主要从事区域环境与 GIS 应用研究及教学工作。E-mail:anbinwt@126.com

extreme indices as high temperature events and extremal indices showed the increasing trend, while extreme indices as low temperature events showed the inverse trend; the most obvious variations of index tendency rates were found in Zhenan, Dingbian and Tongchuan stations; in recent 63 years, the daily temperature increase was lower than that at night; the increasing trend of  $TX_{90}$  was faster than that of  $TN_{90}$ , and the decreasing trend of  $TX_{10}$  was faster than that of  $TN_{10}$ . The above results indicate that there is an asymmetry of temperature and diurnal index changes in Shaanxi Province. The extreme temperature events in Shaanxi Province are mainly affected by the rise of the highest and lowest temperature in the day, and the rise of the highest temperature in the day has more obvious influence on each index.

**Keywords:** extreme temperature indices; tendency rate; mutation characteristics; Pearson correlation; Shaanxi Province

IPCC 第 5 次评估报告指出,自 1880 年以来全球呈显著变暖态势,地表平均气温上升了  $0.85^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>;预计到 21 世纪末全球海陆表面平均气温将持续升高  $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>。1951—2017 年,中国地表平均气温升温率高于同期全球平均水平,达到  $0.24^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ <sup>[3]</sup>。全球变暖背景下,极端气候事件可能会导致旱涝等气象灾害频发,致使人类的生产生活经济损失风险加剧,还会给生态系统带来深刻影响<sup>[4]</sup>。这些问题及影响已经引起了公众的广泛关注,国内外众多学者已从不同角度对此展开了研究<sup>[5-7]</sup>;其中,利用气候变化监测与指数专家组 (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI) 推荐的极端气温指数受到广泛应用。Alexander<sup>[6]</sup> 和 Donat<sup>[8]</sup> 等研究均发现,1950 年以来全球均霜冻和冷夜日数呈减少、暖夜显著增加趋势。对中国整个区域极端气温事件的分析表明,冰冻、霜冻、冷昼和冷夜日数均呈显著减少趋势,暖昼和暖夜日数显著增多趋势,且存在区域差异<sup>[9]</sup>;黄小燕等<sup>[10]</sup> 对中国沿海的极端气温事件进行分析,亦发现类似规律,但各指数变化程度不一。大量不同时空尺度的极端气温事件研究<sup>[11-13]</sup>,进一步揭示了中国各地区的极端气温事件规律。

陕西省深居西北内陆,处于我国夏季风边缘区。境内下垫面复杂多变,气候类型多样,是全球气候变化响应敏感地区之一,也是极端气候事件频发地区之一。从 730 B.C.—2010 A.D. 近 2700 多年间,陕西省发生冰冻灾害 251 次,平均每 9.74 a 发生一次<sup>[14]</sup>;而其夏季高温发生频率、高温日数呈增多趋势<sup>[15]</sup>。因此,分析陕西省极端气温事件变化规律,为积极应对气象灾害提供依据。张宁<sup>[16]</sup> 研究了 1961—2010 年陕西省极端气候变化事件,主要侧重于研究极端高温、低温指数和极端降水。此外,涉及陕西榆林<sup>[17]</sup>、安康<sup>[18]</sup>、西安<sup>[19]</sup> 及陕北<sup>[20]</sup> 等区域的极端气温事件也有所研究,但研究区域主要集中于陕西部分区域,且

研究指标较少。通过以上可以发现,对陕西整体的长时间序列极端气温事件的研究相对缺乏。因此,在前人工作基础上,本文选择陕西省 20 个气象站的逐日气温资料,借助线性拟合、Mann-Kendall 突变检验、累积距平、相关分析等方法,对 1955—2017 年陕西省极端气温事件时空变化特征进行研究,为全面认识该区极端气温事件提供科学依据。

## 1 研究资料与方法

### 1.1 数据来源

遵循连续性和完整性、最长时间序列原则,从中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 获取了陕西省 20 个气象站逐日最高和最低气温数据,时段为 1955 年 1 月 1 日—2017 年 12 月 31 日,具体站点位置见图 1。对获取的气温资料均经台站气温极值、气候界限值等质量控制,并利用 RCLimDex 软件<sup>[21]</sup> 对数据进行进一步质量检查,包括日最低气温是否低于最高气温、错误值与异常值筛选等,以保证结果的可信度。对于缺失数据的站点,选取其周边时间段完整的站点,采用线性回归模型修正的方法进行插补。

### 1.2 研究方法

本文采用 ETCCDI 推荐的 10 种极端气温指数 (表 1),分为极值指数、绝对指数和相对指数,所有极端气温指数均在 R 语言环境下 RCLimDex(1.0) 软件计算<sup>[21]</sup>。采用线性拟合法分析极端气温指数的变化趋势,结合 M-K 突变和累积距平曲线进行突变性检验,利用 SPSS 22.0 软件进行极端气温指数的主成分及相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 极端气温指数时间变化特征

2.1.1 极值指数时间变化 由图 2 可知,1955—2017 年期间,陕西省极端最高气温 ( $TX_x$ ) 和极端最

低气温(TN<sub>n</sub>)均呈上升趋势,其气候倾向率分别为 0.17,0.19℃/10 a;其中极端最高气温的上升趋势通过 0.05 显著性检验,表明极端最高气温升温显著,而极端最低气温的上升趋势不显著。极端最高气温最小值出现在 1983 年(33.48℃),最大值出现在 2017 年(38.50℃);极端最低气温最小值出现在 1955 年(−19.27℃),最大值出现在 2017 年(−11.48℃),可以看出,近 63 a 陕西省气温总体呈增暖趋势,与尹红等<sup>[22]</sup>认为 2017 年中国 TX<sub>x</sub> 和 TN<sub>n</sub> 处于 1961 年以来的第 2 位观点几乎一致。从累积距平看, TX<sub>x</sub> 在 1993 年之前为下降趋势,之后转为上升趋势,呈 V 型曲线变化;TN<sub>n</sub> 在 1977 年之前为下降趋势,之后转为上升趋势,且 1977—2000 年上升幅度大。

2.1.2 绝对指数时间变化 从时间看,1955—2017 年陕西省极端气温绝对指数均表现显著变化趋势( $p<0.01$ ),夏日日数(SU<sub>25</sub>)呈显著上升趋势,其速率为 2.21 d/10 a(图 3),与中国大陆 1956—2008 年(2.10 d/10 a)增加速率相当<sup>[9]</sup>;热夜日数(TR<sub>20</sub>)以 1.12 d/10 a 速率呈显著上升趋势,低于中国(2.00 d/10 a)增加速率<sup>[9]</sup>。霜冻(FD<sub>0</sub>)、冰冻日数(ID<sub>0</sub>)均表现出极明显的下降趋势,其速率分别为−2.55,−1.43 d/10 a,均低于中国霜冻日数(−3.00 d/10 a)和冰冻日数(−1.80 d/10 a)下降速率<sup>[9]</sup>。可见近 63 a 陕西省 SU<sub>25</sub>上升趋势快于 TR<sub>20</sub>,

FD<sub>0</sub>下降趋势快于 ID<sub>0</sub>。从累积距平看, ID<sub>0</sub>呈双峰型曲线, SU<sub>25</sub>和 TR<sub>20</sub>呈 V 型曲线, FD<sub>0</sub>则呈倒 V 曲线变化。SU<sub>25</sub>, TR<sub>20</sub>均在 1993 年之前为下降趋势,之后转为上升趋势,与 TX<sub>x</sub> 变化年份一致; FD<sub>0</sub>在 1996 年之前为上升趋势,之后变为下降趋势; ID<sub>0</sub>在 80 年代中后期以前为上升趋势,之后变为下降趋势。

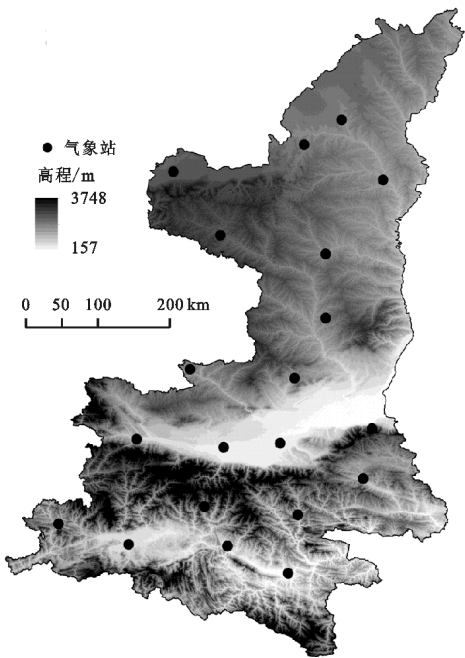


图 1 陕西省气象站空间位置分布

表 1 极端气温指数类型及其概念界定

指标类型	名称	代码	概念界定	单位	冷/暖指数
极值指数	极端最高气温	TX <sub>x</sub>	年内日最高温的最大值	℃	暖
	极端最低气温	TN <sub>n</sub>	年内日最低温的最小值	℃	冷
绝对指数	夏日日数	SU <sub>25</sub>	年内日最高温>25℃日数	d	暖
	热夜日数	TR <sub>20</sub>	年内日最低温>20℃日数	d	暖
	霜冻日数	FD <sub>0</sub>	年内日最低温<0℃日数	d	冷
	冰冻日数	ID <sub>0</sub>	年内日最高温<0℃日数	d	冷
相对指数	暖昼日数	TX <sub>90</sub>	年内日最高温>基期阈值(90%)日数	d	暖
	暖夜日数	TN <sub>90</sub>	年内日最低温>基期阈值(90%)日数	d	暖
	冷昼日数	TX <sub>10</sub>	年内日最高温<基期阈值(10%)日数	d	冷
	冷夜日数	TN <sub>10</sub>	年内日最低温<基期阈值(10%)日数	d	冷

2.1.3 相对指数时间变化 由图 4 可以看出,1955—2017 年陕西省极端气温相对指数与绝对指数的变化特征相似,具体看,暖昼日数(TX<sub>90</sub>)和暖夜日数(TN<sub>90</sub>)的上升速率分别为 1.58,2.05 d/10 a,均高于全球暖昼(0.80 d/10 a)和暖夜日数(1.17 d/10 a)上升速率<sup>[8]</sup>;冷昼日数(TX<sub>10</sub>)和冷夜日数(TN<sub>10</sub>)的下降速率分别为 1.34,1.85 d/10 a,高于全球冷昼(0.67 d/10 a)和冷夜日数(1.09 d/10 a)的下降幅度<sup>[8]</sup>。进一步分析发现,近 63 a 陕西省夜指数(TN<sub>90</sub>, TN<sub>10</sub>)增加速率高于昼指数(TX<sub>90</sub>, TX<sub>10</sub>)。从累积距平看,极端气温相对指数的累积距平曲线均呈抛物线型变化,且均在 1993 年发

生转折, TX<sub>10</sub>和 TN<sub>10</sub>在 1993 年前为上升,而后转为下降; TX<sub>90</sub>和 TN<sub>90</sub>情况与之相反(图 4)。

综上所述,1955—2017 年陕西省极端气温暖指数(TX<sub>x</sub>, SU<sub>25</sub>, TR<sub>20</sub>, TX<sub>90</sub>和 TN<sub>90</sub>)均呈显著上升趋势( $p<0.05$ ),除了 TN<sub>n</sub> 呈不显著的上升趋势,其余极端气温冷指数(FD<sub>0</sub>, ID<sub>0</sub>, TX<sub>10</sub>和 TN<sub>10</sub>)均呈极显著下降趋势( $p<0.001$ ),这些指数的变化趋势都指示出近63 a 来陕西省气温呈上升趋势,验证了董思等<sup>[23]</sup>对陕西省气温呈增加趋势(1955—2013 年)的结论,也表明了陕西省变暖趋势响应了全球气候变暖大背景。

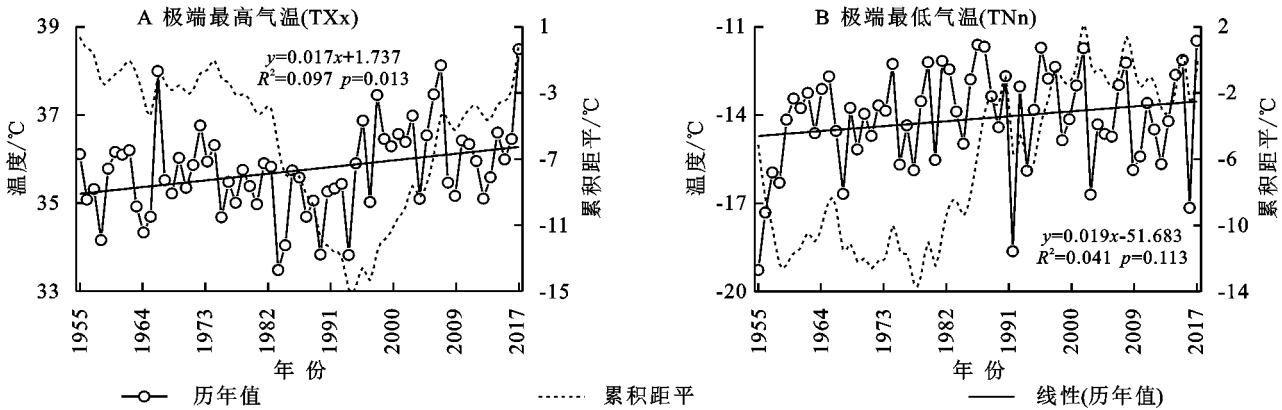


图 2 1955—2017 年陕西省极端气温极值指数时间变化

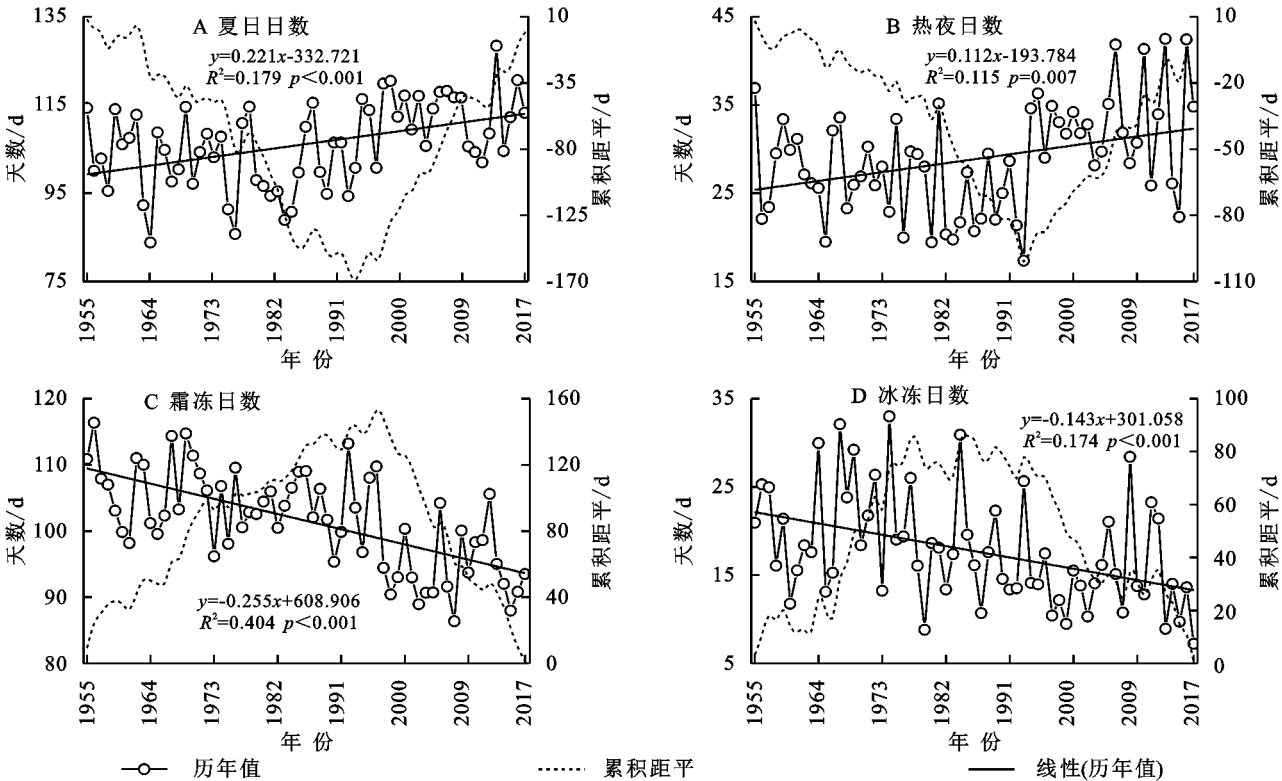


图 3 1955—2017 年陕西省极端气温绝对指数时间变化

2.2 极端气温指数的突变特征

为进一步研究 1955—2017 年陕西省极端气温的时间变化特征,综合运用 M-K 和累积距平曲线对 10 项极端气温指数进行突变分析,结果见表 2。近 63 a 年陕西省多数极端气温指数发生了突变,突变年份集中在 20 世纪 90 年代中后期—21 世纪初。其中,  $SU_{25}$ ,  $TR_{20}$ ,  $TX_{90}$  和  $TN_{90}$  等暖指数经历了由少到多的上升突变,  $FD_0$ ,  $ID_0$  和  $TX_{10}$  等冷指数经历了由多到少的下降突变,而  $TXx$ ,  $TNn$  和  $TN_{10}$  未发生突变。具体来看,  $SU_{25}$  在 1997 年发生突变,突变后较突变前增加 10.83 d;  $TR_{20}$  在 2000 年发生突变,突变后较突变前增加 5.72 d;  $FD_0$  和  $ID_0$  均在 1994 年发生突变,分别由突变前的 105.21, 19.71 d 降为突变后的 95.51, 14.48 d; 暖昼日数突变点为 1996 年,突变

后较突变前分别增加了 7.89 d; 暖夜日数在 1987 年突变,由突变前的 12.31 d 上升至突变后的 19.66 d; 冷昼日数在 2011 年发生突变,突变后较突变前分别减少 10.52 d。

2.3 极端气温指数的空间变化特征

2.3.1 极值指数的空间变化 由图 5 可知,1955—2017 年陕西省极端最高气温 ( $TXx$ )、极端最低气温 ( $TNn$ ) 整体表现为上升趋势,其倾向率变化分别介于  $-0.07\sim 0.89^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,  $-0.22\sim 0.63^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 分别有 25%, 40% 站点通过显著性水平 ( $p<0.05$ ) 检验。  $TXx$  上升趋势最显著的为定边站,  $TNn$  增加趋势最显著的为铜川站。作为区域高温重要指标  $TXx$ , 陕西省共有 18 个站点的  $TXx$  呈上升趋势,这使得该区域高温热浪风险增大。



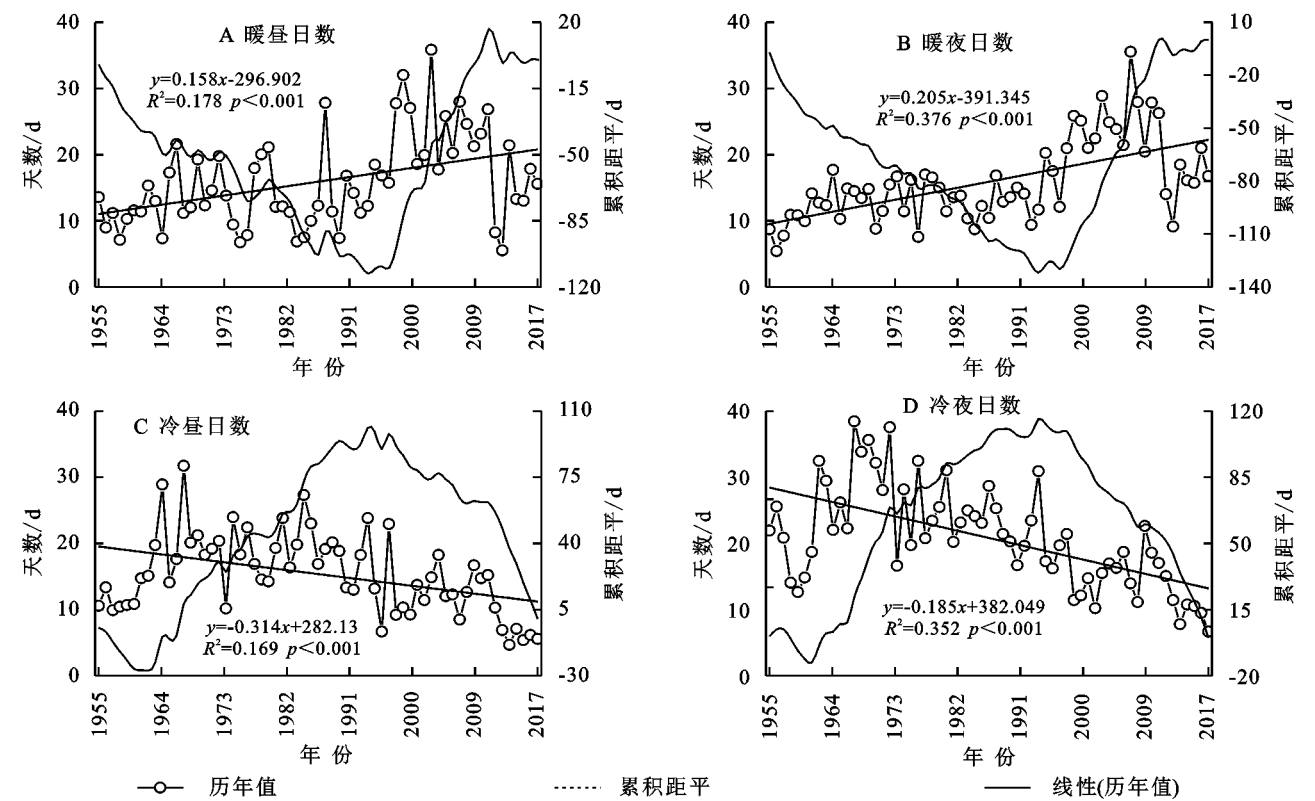


图 4 1955—2017 年陕西省极端气温相对指数时间变化

表 2 1955—2017 年陕西省极端气温指数突变特征

项目	TXx/℃	TNn/℃	SU <sub>25</sub> /d	TR <sub>20</sub> /d	FD <sub>0</sub> /d	ID <sub>0</sub> /d	TX <sub>90</sub> /d	TN <sub>90</sub> /d	TX <sub>10</sub> /d	TN <sub>10</sub> /d
突变点(年)	—	—	1997	2000	1994	1994	1996	1987	2011	—
突变前	—	—	102.43	27.20	105.21	19.71	13.23	12.31	16.45	—
突变后	—	—	113.25	32.92	95.51	14.48	21.12	19.66	5.93	—
变化值	—	—	10.83	5.72	−9.70	−5.23	7.89	7.35	−10.52	—

注:“—”代表未发现,下表同。

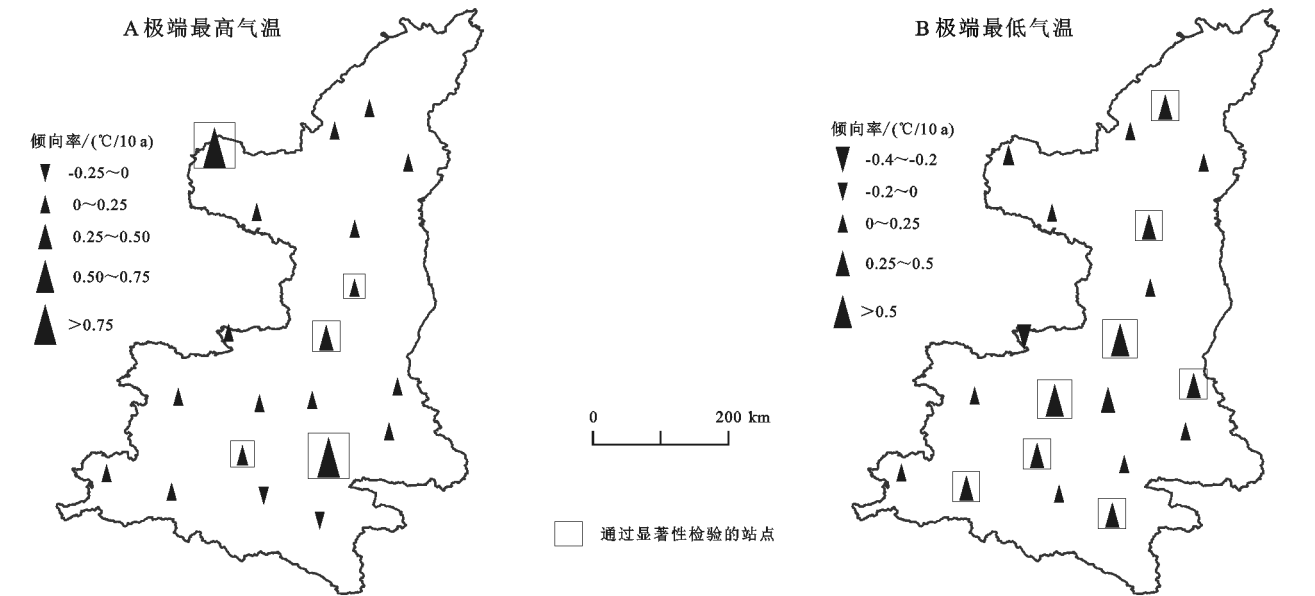


图 5 1955—2017 年陕西省极端气温极值指数倾向率空间分布

2.3.2 绝对指数空间变化 近 63 a 陕西省绝对指数 (SU<sub>25</sub>)和 95% 站点的热夜日数 (TR<sub>20</sub>)呈上升趋势,其倾向率变化分别为 0.25~9.14, −0.80~3.88 d/10 a,其中

通过显著性水平 ( $p < 0.05$ ) 检验的站点比例分别为 75%, 60%。SU<sub>25</sub> 以镇安站上升趋势最为显著, TR<sub>20</sub> 以佛坪站上升趋势最为显著。所有站点的霜冻日数(FD<sub>0</sub>)和冰冻日数(ID<sub>0</sub>)均呈一致下降趋势,其倾向率变化分别为  $-6.55 \sim -1.22$  d/10 a,  $-3.27 \sim 0.08$  d/10 a, 85% 站点的

FD<sub>0</sub>, 80% 站点的 ID<sub>0</sub> 通过显著性水平 ( $p < 0.05$ ) 检验。FD<sub>0</sub> 和 ID<sub>0</sub> 分别以定边站和长武站下降趋势最为显著。此外, SU<sub>25</sub> 上升幅度高于 TR<sub>20</sub> 的气象站占全部站点的 75%, FD<sub>0</sub> 下降幅度高于 ID<sub>0</sub> 的占全部站点的 85%, 验证了陕西省气温变化的昼夜不对称性。

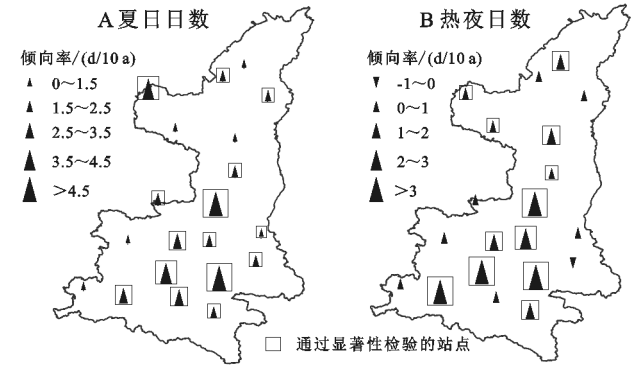


图 6 1955—2017 年陕西省极端气温绝对指数倾向率空间分布

2.3.3 相对指数空间变化 由图 7 可知, 近 63 a 陕西省暖昼日数(TX<sub>90</sub>)和暖夜日数(TN<sub>90</sub>)均表现为一致的增加趋势, 其倾向率变化分别为 0.32~5.53, 0.25~5.19 d/10 a, 其中 75% 气象站点的 TX<sub>90</sub>, 90% 站点的 TN<sub>90</sub> 增加趋势显著 ( $p < 0.05$ )。TX<sub>90</sub> 上升幅度最大的出现在镇安站, TN<sub>90</sub> 上升幅度最大的出现在铜川站。95% 气象站点的冷昼日数(TX<sub>10</sub>)和冷夜日数(TN<sub>10</sub>)表现为减少趋势, 其倾向率变化分别

为  $-4.43 \sim 0.07$ ,  $-3.31 \sim 0.08$  d/10 a, 其中 80% 气象站点的 TX<sub>10</sub>, 85% 站点的 TN<sub>10</sub> 减少趋势显著 ( $p < 0.05$ )。TX<sub>10</sub> 和 TN<sub>10</sub> 下降幅度最大的分别出现在镇安站和延安站。进一步统计发现, TX<sub>90</sub> 倾向率变化低于 TN<sub>90</sub> 的站点占全部站点的 65%, TX<sub>10</sub> 倾向率变化低于 TN<sub>10</sub> 的站点占全部站点的 20%, 表明近 63 a 陕西省暖夜日数上升趋势快于暖昼, 冷昼日数下降趋势快于冷夜, 存在昼夜指数变化的不对称性。

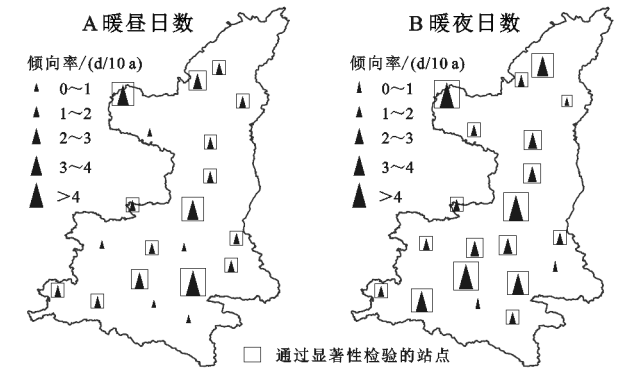


图 7 1955—2017 年陕西省极端气温相对指数倾向率空间分布

2.4 极端气温指数的主成分分析

运用主成分分析得到 1957—2017 年陕西省极端气温指数的主成分, KMO 指数为 0.63, Bartlett 球形检验显著, 3 个主成分特征值均大于 1, 分别占方差贡献率的 50.15%, 13.01%, 11.59%, 累积方差贡献率达到 74.75%, 符合分析要求(表 3)。第 1 主成分在 TX<sub>x</sub>, SU<sub>25</sub>, TR<sub>20</sub>, TX<sub>90</sub> 和 TN<sub>90</sub> 的载荷均高于 0.64, 主要反映了极端气温暖指数变化特征, 与全球气候变暖背景吻合。相关性分析(表 4)表明, 各项极端气温暖指数之间均呈正相关, 且相关性显著 ( $p < 0.01$ ), 与 FD<sub>0</sub>, ID<sub>0</sub>, TN<sub>90</sub> 和 TX<sub>10</sub> 均呈显著负相关 ( $p < 0.05$ )。

第 2 主成分在 FD<sub>0</sub>, ID<sub>0</sub>, TN<sub>90</sub> 和 TX<sub>10</sub> 的载荷较高, 均在 0.62 以上, 主要反映了极端气温冷指数变化特征, 且这 4 项指数间均呈显著正相关 ( $p < 0.01$ )。TN<sub>n</sub> 在第 3 主成分中的载荷高达 0.89, 反映了极端最低气温变化特征, 与 ID<sub>0</sub> 的相关系数为  $-0.35$ , 且通过 0.01 显著检验。进一步由表 4 可知, 除与 TN<sub>n</sub> 相关性不显著外, TX<sub>x</sub> 与 SU<sub>25</sub> 等指数均呈显著相关, 而 TN<sub>n</sub> 仅与 ID<sub>0</sub> 呈显著负相关, 表明近 63 a 陕西省气温的增加主要受到最高气温变化的影响, 日最高温的升高对各指数变化的影响程度更为明显。

表 3 陕西省极端气温指数主成分分析

主成分	TXx	TNn	SU <sub>25</sub>	TR <sub>20</sub>	FD <sub>0</sub>	ID <sub>0</sub>	TX <sub>90</sub>	TN <sub>90</sub>	TX <sub>10</sub>	TN <sub>10</sub>	方差/%
1	0.72	0.04	0.73	0.64	−0.46	−0.26	0.90	0.83	−0.25	−0.21	50.15
2	−0.22	−0.06	−0.37	−0.40	0.62	0.68	−0.10	−0.24	0.87	0.90	13.01
3	0.04	0.89	−0.14	−0.35	−0.29	−0.45	0.18	0.18	0.10	−0.02	11.59

表 4 陕西省极端气温指数相关系数矩阵

指数	TXx	TNn	SU <sub>25</sub>	TR <sub>20</sub>	FD <sub>0</sub>	ID <sub>0</sub>	TX <sub>90</sub>	TN <sub>90</sub>	TX <sub>10</sub>
TNn	0.21	1							
SU <sub>25</sub>	0.57**	0.03	1						
TR <sub>20</sub>	0.57**	−0.11	0.55**	1					
FD <sub>0</sub>	−0.32**	−0.17	−0.45**	−0.34**	1				
ID <sub>0</sub>	−0.35**	−0.35**	−0.35**	−0.31**	0.58**	1			
TX <sub>90</sub>	0.53**	0.10	0.68**	0.45**	−0.54**	−0.48**	1		
TN <sub>90</sub>	0.49**	0.12	0.53**	0.56**	−0.75**	−0.40**	0.79**	1	
TX <sub>10</sub>	−0.46**	−0.02	−0.62**	−0.45**	0.52**	0.62**	−0.31**	−0.30**	1
TN <sub>10</sub>	−0.31**	−0.11	−0.43**	−0.54**	0.71**	0.57**	−0.25*	−0.47**	0.74**

注:\*,\*\* 分别表示在 Pearson 双尾检验 0.05,0.01 水平显著。

3 讨论与结论

3.1 讨论

1955—2017 年期间,陕西省极端气温的极值指数及表征暖指数均呈上升趋势,冷指数均呈下降趋势,说明陕西省气温变化响应了全球气候变暖背景。其研究结果与陕西省各地区研究基本一致<sup>[17-20]</sup>,但各指数变化倾向率略有差异。以冷昼和冷夜指数为例,本研究分别以−1.34 d/10 a 和−1.85 d/10 a 的速率下降(1955—2017 年),均低于张宁<sup>[16]</sup>的研究结果−2.82 d/10 a 和−4.05 d/10 a(1961—2010 年),其原因与研究时段不同有关。研究时段内,陕西省白昼增温幅度低于夜间增温幅度,存在气温变化的昼夜不对称性现象,表明该地区各极端气温指数的变化受日最高温影响更为明显。在极端气温指数突变方面,陕西省多数极端气温指数突变集中在 20 世纪 90 年代中后期—21 世纪初,与贵州省突变的时期一致<sup>[11]</sup>,早于内蒙古自治区突变时期<sup>[12]</sup>。以上陕西省极端气温变化特征与其境内跨中温带、暖温带及北亚热带季风气候,南北气候差异大有关。此外,本文所采用陕西省 20 个气象站点的逐日最高和最低温数据均已经过严格质量检验,但存在站点少,且未考虑气象站迁址、土地覆被变化等因素所带来的气温影响,进而影响到极端气温指数的变化特征。因此,未来的研究应该还需收集更多气温数据,同时注重气温均一化等处理方法,才能更全面了解陕西省极端气温事件的时空变化特征。

3.2 结论

(1) 1955—2017 年陕西省极端气温指数中,TXx, TNn,SU<sub>25</sub>,TR<sub>20</sub>,TX<sub>90</sub> 和 TN<sub>90</sub> 分别以 0.17℃/10 a, 0.19℃/10 a,2.21 d/10 a,1.12 d/10 a,1.58 d/10 a,

2.05 d/10 a 倾向率上升,FD<sub>0</sub>,ID<sub>0</sub>,TX<sub>10</sub> 和 TN<sub>10</sub> 分别以−2.55 d/10 a,−1.43 d/10 a,−1.34 d/10 a, −1.85 d/10 a 倾向率下降。

(2) 陕西省多数极端气温指数在 20 世纪 90 年代中后期—21 世纪初发生了突变,SU<sub>25</sub>,TR<sub>20</sub>,TX<sub>90</sub> 和 TN<sub>90</sub> 经历了由少到多的上升突变,FD<sub>0</sub>,ID<sub>0</sub> 和 TX<sub>10</sub> 经历了由多到少的下降突变。

(3) 空间尺度上,多数站点 TXx,TNn,TR<sub>20</sub> 和所有站点 SU<sub>25</sub>,TX<sub>90</sub>,TN<sub>90</sub>,的倾向率呈上升趋势,多数站点 TX<sub>10</sub>,TN<sub>10</sub> 和所有站点 FD<sub>0</sub>,ID<sub>0</sub> 的倾向率呈下降趋势;镇安、定边和铜川站的各指数倾向率变幅最为明显。

(4) 1955—2017 年陕西省存在气温变化的昼夜不对称性,极端气温事件主要受日最高、最低温升高的影响,而日最高温的上升对各指数影响更为明显。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2013; Managing the Risks of Extreme Events and Disaster to Advance Climate Change Adaptation[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.

[2] Meehl G A, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century[J]. Science, 2004,305(5686):994-997.

[3] 中国气象局.中国气候变化蓝皮书[M].北京:中国气象局气候变化中心,2018.

[4] 沈永平,王国亚.IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J].冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.

[5] Karl T R, Jones P D, Knight R W, et al. A new perspective on recent global warming: asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74(6):1007-1024.

- 2015,23(6):758-767.
- [10] 郑盛华,覃志豪,张文博.松嫩平原干旱变化特征及其对气候变化的响应[J].中国农业气象,2015,36(5):640-649.
- [11] 曾丽红,宋开山,张柏,等.1960 年以来松嫩平原生长季干旱特征分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(9):114-122.
- [12] 康蕾,张红旗.我国五大粮食主产区农业干旱态势综合研究[J].中国生态农业学报,2014,22(8):928-937.
- [13] 纪瑞鹏,车宇胜,朱永宁,等.干旱对东北春玉米生长发育和产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(11):3021-3026.
- [14] 张淑杰,张玉书,孙龙戩,等.东北地区玉米生育期干旱分布特征及其成因分析[J].中国农业气象,2013,34(3):350-357.
- [15] 张祖光,郝卫平,李昊儒,等.山西省春玉米生育期干旱特征分析[J].中国农业气象,2015,36(6):754-761.
- [16] 曾丽红,宋开山,张柏,等.2000—2008 年松嫩平原生长季蒸散量时空格局及影响因素分析[J].资源科学,2010,32(12):2305-2315.
- [17] 穆佳,赵俊芳,郭建平.近 30 年东北春玉米发育期对气候变化的响应[J].应用气象学报,2014,25(6):680-689.
- [18] 国家气候中心,GB/T20481-2006 气象干旱等级[J].北京:国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2006.
- [19] Allen R G, Perreira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: Fao Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [20] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- [21] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [22] Kendall M G. Rank Correlation Measures[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [23] 马柱国,符淙斌.1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实[J].科学通报,2006,51(20):2429-2439.
- [24] 杨璐,张兵兵,王琪,等.吉林省蒸发量的时空分布特征[J].水土保持研究,2019,26(1):197-202.
- [25] 申双和,张方敏,盛琼,等.1975—2004 年中国湿润指数时空变化特征[J].农业工程学报,2009,25(1):11-15.
- [26] 冯建设,王建源,王新堂,等.相对湿度指数在农业干旱监测业务中的应用[J].应用气象学报,2011,22(6):766-772.
- [27] 徐建文,居辉,刘勤,等.黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应[J].生态学报,2014,34(2):460-470.
- [28] 周丹,罗静,郑玲,等.基于格点数据的华北地区气象干旱特征及成因分析[J].水土保持研究,2019,26(4):195-202.

~~~~~

(上接第 323 页)

- [6] Alexander L V, Zhang X B, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111. DOI: 10.1029/2005JD006290.
- [7] 杨萍,侯威,封国林.中国极端气候事件的群发性规律研究[J].气候与环境研究,2010,15(4):365-370.
- [8] Donat M G, Alexander L V, Yang H. Global land-based datasets for monitoring climatic extremes[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(7):997-1006.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 朱大运,熊康宁,肖华.贵州省极端气温时空变化特征分析[J].资源科学,2018,40(8):1672-1683.
- [12] 赵国永,韩艳,刘明华,等.1951—2014 年内蒙古自治区极端气温事件时空变化特征[J].干旱区资源与环境,2017,31(12):110-116.
- [13] 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.
- [14] 徐兆红.晋陕蒙地区历史时期寒冻灾害研究[D].西安:陕西师范大学,2017.
- [15] 李良序,范建忠,鲁渊平,等.陕西灾害性天气气候图集[M].西安:陕西科学技术出版社,2009.
- [16] 张宁.近 50 年来陕西省气温和降水极端事件分析[D].兰州:西北师范大学,2012.
- [17] 陈建宇,邵天杰,赵景波.陕西榆林地区 1954—2013 年极端气温变化特征[J].中国沙漠,2016,36(5):1426-1434.
- [18] 赵景波,杨晓玉,许永红,等.陕西安康近 50 年来极端气温指数变化研究[J].灾害学,2016,31(2):89-94.
- [19] 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.
- [20] 王钰,冯起.陕北地区 1960—2013 年极端气温指数[J].中国沙漠,2016,36(4):1097-1105.
- [21] Zhang X B, Yang F. RCLimDex(1.0), User Manual[Z]. Ontario, Canada: Climate Research Branch, Environment Canada Downsview, 2004.
- [22] 尹红,孙颖.基于 ETCCDI 指数 2017 年中国极端温度和降水特征分析[J].气候变化研究进展,2019,15(4):363-373.
- [23] 董思,任志远,张翀,等.陕西省气候变化及其气候生产潜力的时空变化[J].中国农业大学学报,2016,21(8):142-149.