

运城市极端气温变化特征及不同重现期气温估计

赵俊杰^{1,2} 高艳平³ 李智才⁴

(1 山西省气象灾害防御技术中心, 太原 030032; 2 中国气象局五台山云物理野外科学试验基地, 忻州 035515;
3 山西省运城市气象局, 运城 044000; 4 山西省气候中心, 太原 030006)

摘要: 利用运城市1961—2020年逐月最高气温、最低气温资料, 采用皮尔逊-Ⅲ分布、耿贝尔分布和对数正态分布3种方法分别计算, 得到运城市极端高温和极端低温各重现期下的极值, 并采用拟合标准差、拟合相对偏差和柯尔莫洛夫检验对3种拟合进行优度检验, 结果表明: 近60年, 运城市年平均最高、最低气温和极端最高、最低气温均呈增加趋势, 且低温的增加趋势明显大于高温; 年极端最高气温、最低气温主要集中在6—7月和12月下旬—次年2月上旬; 运城市极端最高气温和极端最低气温的对数正态分布拟合效果最优, 而用耿贝尔分布拟合的极端最高气温偏大, 用耿贝尔分布拟合的极端最低气温整体偏低。

关键词: 极端气温, 重现期, 拟合优度检验

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.06.006

Characteristics of Extreme Temperature Variation and Temperature Estimates during Different Return Periods in Yuncheng City

Zhao Junjie^{1,2}, Gao Yanping³, Li Zhicai⁴

(1 Shanxi Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Taiyuan 030032; 2 Field Experiment Base of Cloud Physics in Mount Wutai, China Meteorological Administration, Xinzhou, 035515; 3 Yuncheng Meteorological Bureau of Shanxi Province, Yuncheng 044000; 4 Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006)

Abstract: Based on the monthly maximum temperature and minimum temperature data in Yuncheng City from 1961 to 2020, the annual extreme values of maximum temperature and minimum temperature in different return periods were fitted and calculated by Pearson type-III, Gumbel and Log-normal distribution methods. Three measures of fitting standard deviation, fitting relative deviation and Kolmogorov test were also used to give a comparative superiority evaluation. The results show that for nearly 60 years, both the mean maximum (minimum) temperature and extreme maximum (minimum) temperature in Yuncheng City show an increasing trend, and the increasing trend of the low temperature is significantly greater than that of the high temperature; the annual average extreme maximum temperature and minimum temperature are mainly concentrated from June to July and late December to early February, respectively. The best lognormal distribution fitting effects are identified in annual extreme maximum temperature and extreme minimum temperature in Yuncheng City, while the extreme maximum (minimum) temperature fitted by Gumbel distribution tends to be higher (lower) than the observed data.

Keywords: extreme temperature, return period, goodness-of-fit test

0 引言

极端气候事件对人类社会经济、生活生产、自然生态等有着显著的影响, 受到社会广泛关注。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告^[1]指出“极端高温事件的频率和强度在增加, 全球

进一步变暖的趋势在加剧, 随着全球气候变暖趋势加剧, 更加严重的干旱、强降水、高温热浪等极端天气气候事件发生频率越来越高, 破坏程度越来越强, 影响范围也越来越广泛”。20世纪70年代后期以来, 全球变暖加剧, 极端气温对人类生活产生的影响越来越大, 极端高温增加造成农作物减产、影响人类健康、城市用电严峻, 给生产生活、社会经济带来巨大的损失^[1-2]。极端低温也会给农业、交通、人身健康、社会经济等带来一定的影响^[3]。

近年来, 五十年一遇、百年一遇、超百年一遇的极端天气气候事件也时有发生^[4], 但气象要素极值

收稿日期: 2022年10月7日; 修回日期: 2023年3月20日
第一作者: 赵俊杰(1988—), Email: zhaojunjiayou@163.com
通信作者: 高艳平(1981—), Email: 776986465@qq.com
资助信息: 山西省青年基金项目(SXKQNDW20236350); 中国气象局云降水物理环境重点开放实验室开放课题(2020Z00725)

作为一个气候随机变量,从数学意义上并不稳定,它们随时间的变化过程具有相对稳定性,会遵从一定的概率分布^[5-7]。许多学者采用不同的概率模式(如极值分布函数)进行降水^[8-10]、风速^[11-13]、风压^[14]、温度^[13, 15-20]等各种气象要素极值的研究,衍生出多种重现期估算方法。不同的极值分布函数对不同区域不同气象极值的拟合能力也不尽相同,有些研究表明广义极值分布、对数正态分布和皮尔逊-III分布(简称P-III分布)能很好地拟合我国不同流域降水量^[8-10];对数正态分布、P-III分布对风速、风压的模拟效果较好,韦伯分布较差^[10-14];耿贝尔分布、正态分布、P-III分布和韦伯分布可以较好拟合极端最高和最低气温^[15-20]。实际应用中,单独采用某一概率分布拟合温度极值样本进而估算重现期,主观性较强,而且采用不同的概率分布进行拟合得到的结果差异较大。因此,对多个概率分布模型的表现进行评价,从中选取最优拟合分布估算重现期,更能反映出一个地区气象极值的特征。

本研究以运城市为例,首先对运城市近60年的极端最高、极端最低气温资料进行统计分析,归纳出年极端气温的月、年和年代际变化特征;其次,采用最常用的极值分布函数对气温极值进行模拟推算,并对其开展优度检验,根据最优分布函数估算出未来若干年内可能出现的极端气温。

1 数据和方法

1.1 数据

选取运城市盐湖区国家气象观测站1961—2020年的逐月最高气温、最低气温资料,建立逐年的最高、最低气温的时间序列,并记录逐年最高、最低气温出现日期。资料经过山西省气象信息中心质量检验。

1.2 方法

1.1.1 极端气温定义及其变化特征

采用极值指数定义极端气温,极端最高气温为每年最大的日最高气温,极端最高气温为每年最小的日最低气温。

用线性趋势法,对运城市盐湖区1961—2020年年平均最高、最低气温和极端最高、最低气温序列进行统计分析,找出运城市近60年极端气温的月际、年际和年代际变化特征,并用M-K法^[5]进行显著性检验。

1.1.2 气温极值概率分布理论

采用最常用的P-III、耿贝尔和对数正态分布3种极值渐近分布理论模式,对运城市1961—2020年逐年极端最高、极端最低气温序列进行概率分布拟合,求其参数,得到不同重现期下运城市不同概率分布气温

极值。3种分布计算方法可参见有关文献^[5, 20]。

1.1.3 概率分布优良性分析

采用拟合标准差 σ 、拟合相对偏差 V 和柯尔莫哥洛夫检验 K_f ^[15]3种表征参数来估计P-III、耿贝尔和对数正态分布对1961—2020年运城市极端气温拟合的优良性。这3种参数的值越小,表示拟合优度越好,其具体计算方法如下。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}, \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{\hat{x}_i} \right|, \quad (2)$$

$$K_f = D_n / \sqrt{n}, \quad (3)$$

$$D_n = \max \left\{ \left| F^*(x_i) - F(x_i) \right| \right\}, \quad (4)$$

式中, n 为样本容量,本文中为60; x_i 为有序样本; \hat{x}_i 为拟合值; D_n 为在所有各点上经验分布与假设的理论分布之差的最大值,对于给定的信度 a ,由 n 和 a 查柯尔莫哥洛夫检验的临界值 D_{na} 表,得到 D_n 的值。若 $D_n < D_{na}$,则可以认为极端气温服从所选用的分布函数,并且 D_n 值越小,拟合效果越好,一般 a 取值0.01或0.05。本文中当 $a=0.01$ 时, D_{na} 为0.210, $a=0.05$ 时, D_{na} 为0.176。

2 结果与分析

2.1 年平均最高、最低气温气候特征

从1961—2020年运城市年平均最高气温和年平均最低气温变化情况(图1)可知,两者都呈现较强的增加趋势,分别为 $0.23 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 和 $0.47 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ (都通过0.01的显著性水平检验),最低气温的增加趋势明显大于最高气温的增加趋势;年平均最高气温最高达 $29.7 \text{ } ^\circ\text{C}$,年平均最低气温最高为 $5.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。年平均最高、

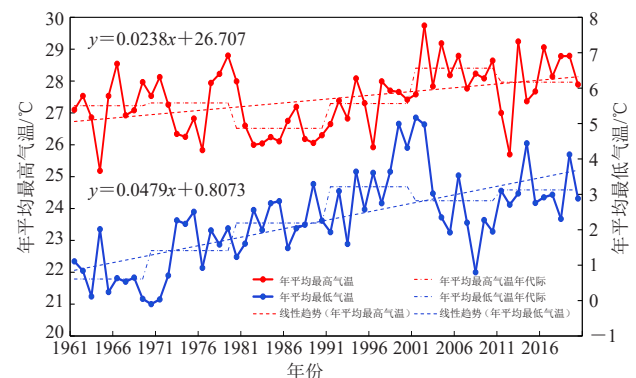


图1 运城市1961—2020年年平均最高气温和最低气温变化
Fig. 1 The annual mean maximum temperature and minimum temperature changes in Yuncheng City from 1961 to 2020

最低气温具有明显的年代际变化特征,最高气温在20世纪80年代最低,平均为26.3℃,21世纪初最高,平均为28.4℃;最低气温在20世纪60年代最低,平均为-0.6℃,20世纪90年代最高,平均为3.2℃,此后略有回落。这些变化趋势特征与马淑苗等^[4]关于山西南部1961—2010年极端气温,马柱国等^[21]对中国北方极端气温变化的研究结论是一致的。

2.2 极端气温气候特征

从1961—2020年运城市极端最高气温和最低气温逐年变化(图2a)可知,极端最高气温、最低气温

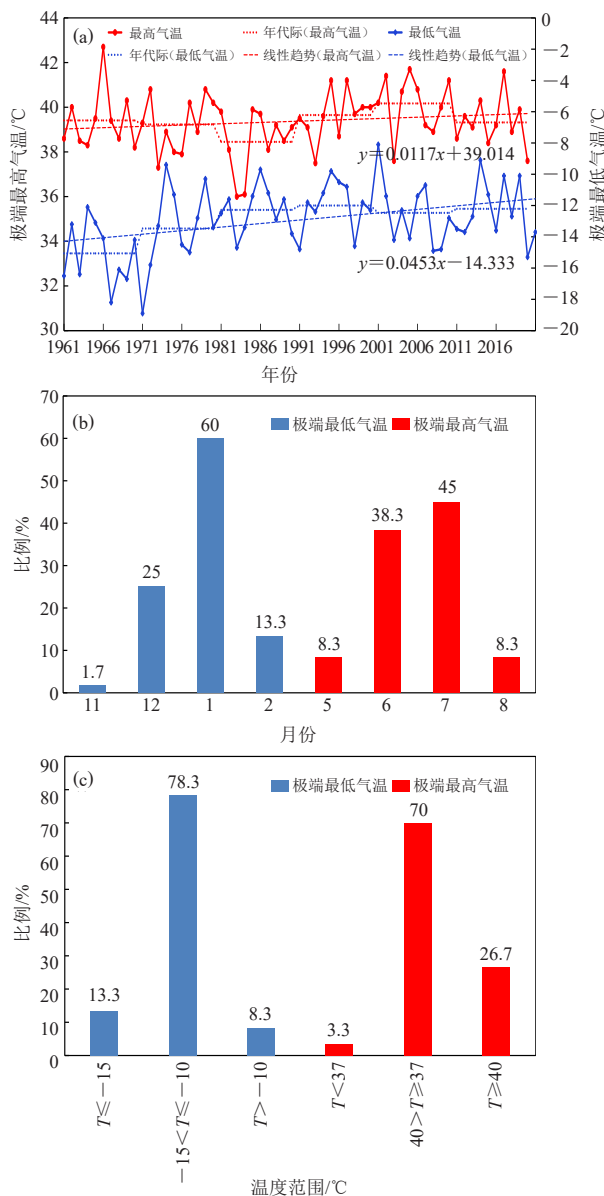


图2 运城市1961—2020年极端气温变化(a)、出现月份占比(b)和温度范围分布(c)

Fig. 2 The changes (a), occurrence month proportion (b) and range distribution (c) of extreme temperatures in Yuncheng City from 1961 to 2020

和年平均最高、最低气温有一致的变化趋势;但极端最高气温增加趋势较弱,为 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (未通过0.1的显著性水平检验);极端最低气温一直呈现较明显的增加趋势,为 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ($P < 0.01$);多年平均极端最高气温为 $39.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均极端最低气温为 $-12.9\text{ }^{\circ}\text{C}$;历年极端最高气温最高为 $42.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1966年),最低为 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1984年);历年极端最低气温最高为 $-8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2001年),最低为 $-18.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1971年)。

极端气温年代际变化特征(图2a)表现为最高气温在20世纪80年代最低,平均为 $38.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,21世纪初最高,平均为 $40.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;最低气温20世纪60年代最低,平均为 $-15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,20世纪90年代最高,平均为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$,此后略有回落。

年极端最高气温最早出现在5月3日(2020年),最晚出现在8月10日(1970年、1986年),主要集中在6—7月,占比80%以上,大多在 $37.0\sim 40.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,达到高温橙色预警级别^[20],占比为70%(图2b),达到高温红色预警($>40\text{ }^{\circ}\text{C}$)的年份也较多,占比达26.7%(图2c)。年极端最低气温最早出现在11月29日(1987年),最晚出现在2月17日(1988年),主要集中在12月下旬—次年2月上旬,占比90%以上,1月出现的年份最多,达60%(图2b),主要在 $-15\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$,占比达78.3%,低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的次之,占比为13.3%(图2c)。

总之,运城市极端最高气温和最低气温都呈增加趋势,极端最低气温的变率明显大于最高气温的变率,这与人类活动和自然因素共同作用造成的全球气候变暖大趋势一致^[22]。

2.3 极端气温概率分布

极端高温和低温都对农业生产、居民生活等造成严重的影响,了解极端高温和低温分布情况和出现概率很重要。分别以5、10、50和100 a为重现期尺度,计算对应的极端最高气温和最低气温(表1)。

运城市极端最高气温在重现期为5 a时,3种概率分布拟合值均超过了 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$;重现期为10 a时,均超过了 $41\text{ }^{\circ}\text{C}$;重现期为50 a时,均超过了 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$;重现期100 a时,耿贝尔分布拟合值超过了 $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。另外,从表1和图3a中可以看出,P-III分布和对数正态分布的拟合值高度一致;重现期小于30 a时,3种函数的拟合值差别不大;重现期大于30 a时,用耿贝尔分布拟合的运城市极端最高气温明显偏高。

运城市极端最低气温在重现期为5 a时,3种概率分布拟合值均低于 $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$;10 a时都低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,当重现期为50 a时,拟合值均低于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$,重现期100 a时,均低于 $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从重现期分布图(图3b)可知,

表1 运城市极端最高和最低气温3种分布方式计算结果

Table 1 Results of three probability distributions for extreme maximum and minimum temperatures in Yuncheng City

重现期/a	P-III分布				耿贝尔分布				对数正态分布			
	5	10	50	100	5	10	50	100	5	10	50	100
最高气温/℃	40.5	41.1	42.1	42.5	40.3	41.1	42.7	43.6	40.5	41.1	42.1	42.5
最低气温/℃	-14.7	-15.8	-17.8	-18.6	-14.5	-15.8	-18.7	-19.9	-14.7	-15.9	-18.1	-19.0

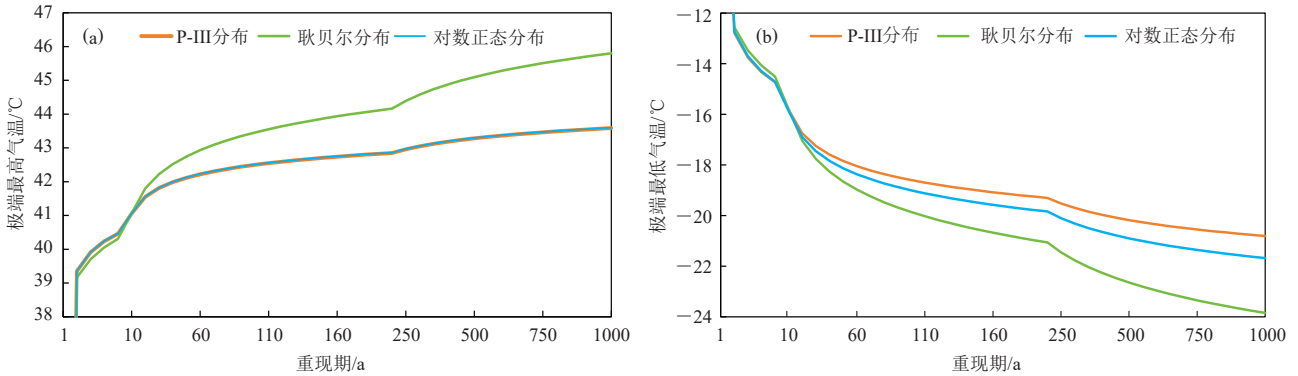


图3 3种不同函数拟合的运城市极端气温重现期分布

Fig. 3 The distribution of extreme temperature return periods fitted with three different functions in Yuncheng City

重现期小于30 a时，3种函数拟合的运城市极端最低气温差别很小，超过30 a后，P-III和对数正态分布拟合曲线相对差别较小，耿贝尔拟合值整体偏小，P-III拟合的值最大。

2.4 极端气温拟合效果检验

计算3种表征不同分布函数拟合优良性的指标，

比较不同参数估计方法的优良性，主要比较 σ ，若两种方法的 σ 相同，则再比较 V 与 K_f 值。从表2可知，3种拟合分布的 K_f 值均小于0.210，两种分布小于等于0.176，说明运城市极端气温均服从P-III、耿贝尔和对数正态分布($P < 0.1$)，P-III和对数正态分布的拟合效果更好($P < 0.05$)。

表2 运城市极端气温3种分布方式拟合检验结果

Table 2 The fitting test results of three distribution modes for extreme temperature in Yuncheng City

拟合指标	P-III分布			耿贝尔分布			对数正态分布			最优拟合
	σ	V	K_f	σ	V	K_f	σ	V	K_f	
最高气温/℃	0.178*	0.002**	0.120*	0.321	0.005**	0.186*	0.176**	0.002**	0.118**	对数正态分布
最低气温/℃	0.213	0.040*	0.120*	0.344	0.023**	0.178*	0.199*	0.012**	0.093**	对数正态分布

注：*代表通过0.1的显著性水平检验，**代表通过0.05的显著性水平检验。

对3种分布函数的3个检验指标值进行对比分析发现，运城市极端最高气温和极端最低气温的拟合中，对数正态分布的 σ 值均最低，其次是P-III分布，耿贝尔分布的最大，说明运城市极端气温用对数正态分布拟合效果最好，耿贝尔拟合效果最差。从图4给出的3种不同函数极端气温分布曲线(对实测最高气温进行降序排列，对实测最低气温进行升序排列)可以直观看出3种函数的拟合效果。另外，拟合的 σ 值最高气温均小于最低气温，说明对运城市极端最高气温的拟合效果要好于最低气温。

采用对运城市极端气温模拟最好的对数正态分布，反查极端最高气温、最低气温的邻近整数温度的重现期，当最高气温为42℃时，对应重现期为40.3 a，最高气温为43℃时，对应重现期为265.6 a，而近60年

运城市最高气温为42.7℃时，对应重现期为144.6 a；当最低气温为-19℃时，对应重现期为99.7 a，最低气温为-18℃时，对应重现期为57.5 a，而近60年运城市最低气温为-18.9℃时，对应重现期为91.9 a。这体现极值分布模拟的特点，高于(低于)现有极大(小)值，微小的变化会引起重现期大幅增长，反之，则重现期大大缩短。

3 结论与讨论

1) 近60年，运城市年平均最高、最低气温和极端气温呈现一致增加趋势，低温增加趋势明显大于高温的增加趋势；年极端最高气温最早出现在5月3日，最晚出现在8月10日，主要集中在6—7月；年极端最低气温最早出现在11月29日，最晚出现在2月17日，主要集中在12月下旬一次年2月上旬。

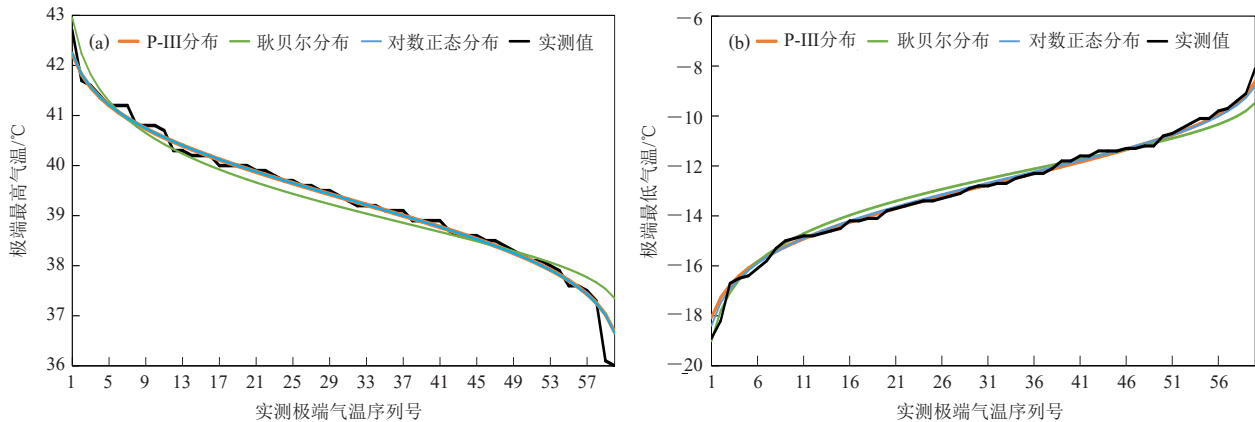


图4 3种不同函数拟合的运城城市极端气温分布曲线(横轴为实测极端气温排序后序号)

Fig. 4 The extreme temperature distribution curves fitted with three different functions in Yuncheng City (the horizontal axis is the serial number after sorting the measured extreme temperatures)

2) 从拟合标准差、拟合相对偏差和柯尔莫哥洛夫检验3个指标来看,运城城市极端气温均服从P-III、耿贝尔和对数正态3种分布,对数正态分布的拟合效果最好;而用耿贝尔分布拟合的极端最高气温偏大,极端最低气温整体偏低。

3) 仅仅用几十年的气象资料,对运城城市极端气温分布特征进行拟合,尽管具有一定的科学性,但存在一定的不确定性,例如,P-III分布和对数正态分布对极端高温的拟合值高度一致,而极端低温中这种一致性不明显,这可能与样本数和样本分布范围有关。因此,拟合要求资料序列越长越好,近年来极端天气气候事件高发频发,对“多少年一遇”问题,还需要通过重建资料序列长度、精选优化分布函数等使拟合更加科学。

运城城市的极端最高和最低气温值呈增大趋势,整体气温呈现上升的趋势,这可能与全球气候变暖的大趋势相关。需进一步分析运城城市极端气温变化的原因,以及对年极端气温理论分布的影响,科学地预测极端气温的变化,为农业生产规划做好服务。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [2] 谭显春, 顾佰和, 王毅. 气候变化对我国中长期发展的影响分析及对策建议. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 1029-1035.
- [3] 江晓菲, 李伟, 游庆龙. 中国未来极端气温变化的概率预估及其不确定性. 气候变化研究进展, 2018, 14 (3): 228-236.
- [4] 马淑苗, 赵景波. 山西南部近50年极端气温变化研究. 地球环境学报, 2011, 2(6): 653-658.
- [5] 屠其璞, 王俊德, 丁裕国, 等. 气象应用概率统计学. 北京: 气象出版社, 1984.
- [6] 丁裕国, 刘吉峰, 张耀存. 基于概率加权估计的中国极端气温时空分布模拟试验. 大气科学, 2004, 28(5): 771-782.
- [7] 么枕生. 气候统计学的研究展望. 气象科技, 1984(6): 1-9.
- [8] 张玉虎, 王琛茜, 刘凯利, 等. 不同概率分布函数降雨极值的适用性分析. 地理科学, 2015, 35(11): 1460-1467.
- [9] 荣艳淑, 王文, 王鹏, 等. 淮河流域极端降水特征及不同重现期降水量估计. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 1-8.
- [10] 杜晓阳, 杜尧东, 唐力生. 广州市单日降水量极值特征、分布拟合与推算. 气象与环境科学, 2018, 41(4): 79-83.
- [11] 黄世成, 周嘉陵, 任分支, 等. 长江下游百年一遇的极值风速分布. 应用气象学报, 2009, 20(4): 437-442.
- [12] 庞文保, 白光弼, 滕跃, 等. P-III型和极值-I型分布曲线在最大风速计算中的应用. 气象科技, 2009, 37(2): 221-223.
- [13] 孟庆珍, 王增武, 冯新, 等. 重庆地面最高气温与最大风速年极值的渐近分布. 成都信息工程学院学报, 2004, 19(3): 436-441.
- [14] 黄浩辉, 宋丽莉, 植石群, 等. 重现期风速风压计算系统介绍. 广东气象, 2009, 31(3): 1-3.
- [15] 苏志, 李艳兰, 涂方旭. 广西冬季极端最低气温的概率分布模型选择及其极值和重现期计算. 广西科学, 2002, 9(1): 73-77.
- [16] 林晶, 陈惠, 陈家金, 等. 福建省年极端低温的分布及其参数估计. 中国农业气象, 2011, 32(S1): 24-27.
- [17] 刘广海, 谢如鹤, 屈睿瑰. 夏季室外高温皮尔逊-III型分布模型的分析与确定. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(4): 107-110.
- [18] 徐军祀, 高彦斌, 李四虎. 基于GIS的陕西省极端气温及其重现期值的空间分布特征研究. 陕西气象, 2010(1): 6-9.
- [19] 胥珈珈, 刘娜, 王鑫. 白山市低温极值重现期的计算方法与比较. 气象灾害防御, 2018, 25(1): 21-24.
- [20] 尹义星, 王小军, 叶正伟, 等. 1951—2013年江苏省极端最高和最低气温变化趋势及概率特征. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1351-1360.
- [21] 马柱国, 符淙斌, 任小波, 等. 中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系. 地理学报, 2003, 58(S1): 11-20.
- [22] 张秀伟, 赵景波. 1956—2012年太原市极端气温变化研究. 自然灾害学报, 2015, 24(1): 77-87.