

# 疏勒河流域最高、最低气温变化规律

贾玲, 孙栋元, 牛最荣, 鄢继选, 武兰珍, 王兴繁, 肖锋, 马亚丽

(甘肃农业大学 水利水电工程学院, 兰州 730070)

**摘要:**为探讨流域极端气候事件的演变规律,基于疏勒河流域瓜州站、玉门站和敦煌站 1951—2018 年月气温极值数据,采用线性倾向、滑动平均等方法分析了疏勒河流域气温年、季极值变化特征、突变特征以及周期特征。结果表明:(1) 年极值气温变化均呈上升趋势,年最高和最低气温分别以  $0.06^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  和  $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  的速率上升,但年最低气温上升趋势较年最高气温显著;(2) 季最高气温变化均呈上升趋势,倾向率排序表现为冬季 ( $0.36^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) > 春季 ( $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) > 夏季 ( $0.07^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) > 秋季 ( $0.01^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ),且各季呈现不同波动变化趋势;(3) 季最低气温均呈现上升变暖趋势,倾向率排序表现为秋季 ( $0.53^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) > 春季 ( $0.39^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) > 冬季 ( $0.24^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) > 夏季 ( $0.19^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ),且各季呈现不同的波动变化趋势;(4) 流域年最高气温和年最低气温突变时间分别为 2011 年和 1961 年。(5) 年最高气温和年最低气温的第一主周期均为 58 a。总的来说,疏勒河流域的气温在未来几年还会持续升高。研究成果对于全面认识疏勒河流域气候变化特征、合理开发利用水资源具有一定的现实意义。

**关键词:**疏勒河流域; 极端气温; Mann-Kendall 检验; 小波分析

中图分类号: P468.021

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)01-0281-07

## Pattern of Maximum and Minimum Temperature Variation in Shule River Basin

JIA Ling, SUN Dongyuan, NIU Zuirong, YAN Jixuan,

WU Lanzhen, WANG Xingfan, XIAO Feng, MA Yali

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to explore the evolution pattern of extreme climatic events in the basin, based on the monthly temperature extreme data at Guazhou Station, Yumen Station and Dunhuang Station in the Shule River Basin from 1951 to 2018, the linear trend and moving average methods were used to analyze the characteristics of annual and seasonal extreme temperature changes, sudden changes and periodic characteristics in the Shule River Basin. The results show that: (1) the annual changes of extreme temperature showed an upward trend; the annual maximum and minimum temperatures increased at a rate of  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{decade}$  and  $0.27^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ , respectively, but the annual minimum temperature increase trend was more significant than the annual maximum temperature; (2) seasonal changes of maximum temperature showed an upward trend, the tendency rate was in order: winter ( $0.36^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ) > spring ( $0.23^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ) > summer ( $0.07^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ) > autumn ( $0.01^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ), and different seasons showed different fluctuating trends; (3) seasonal changes of minimum temperatures all showed a rising and warming trend, and the order of trend rate were autumn ( $0.53^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ) > spring ( $0.39^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ) > winter ( $0.24^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ) > summer ( $0.19^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ), and different seasons presented different fluctuating trends; (4) the mutation times of the annual maximum temperature and the annual minimum temperature in the basin occurred in 2011 and 1961, respectively; (5) the first major cycle of the annual maximum temperature and the annual minimum temperature were both 58 years. On the whole, the temperature in the Shule River Basin will continue to rise in the next few years. These research results have certain practical significance for the comprehensive understanding of the characteristics of climate change and the rational development and utilization of water resources in the Shule River Basin.

收稿日期: 2020-12-19

修回日期: 2021-02-25

资助项目: 甘肃省重点研发计划项目 (21YF5NA015, 21YF5FA094); 甘肃省水利科研与计划项目 (甘水科外发[2019]8); 甘肃省水利厅水资源研究项目 (GASU-JSZX-2020-1205)

第一作者: 贾玲 (1998—), 女, 甘肃省白银人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源与水利工程方面科研工作。E-mail: 799456567@qq.com

通信作者: 孙栋元 (1978—), 男, 甘肃省民乐县人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源与干旱区水土资源方面的教学和科研工作。E-mail: sundy@gsau.edu.cn

**Keywords:** Shule River Basin; extreme temperature; Mann-Kendall mutation test; wavelet analysis

在全球气候变暖的背景下,极端气候事件频频发生,给农业生产、水资源供给、生态系统安全、灾害预测等方面带来直接影响<sup>[1]</sup>。气温和降水是研究水文气候的两个基本要素,其变化对该地区生态环境的变迁起着决定性作用<sup>[2-3]</sup>。随着变暖趋势的不断上升,极端气候的频发和强度加深引发了一些气象灾害,对农业生产造成重大威胁。极端高温的不断加剧,会出现高温热害,引发灾害干旱,有利于作物病虫生长,影响作物减产。极端低温引发冰冻冷害,在一定程度上抑制了作物生长。因此研究极端气温和极端降水的变化特征成为了当前的热点。研究结果表明:全国各区域气温均呈上升趋势<sup>[4]</sup>,未来也继续保持不断上升。其中,东北、西北和华北地区的增暖幅度最为明显,而西南、华南地区增暖幅度最小<sup>[5]</sup>。

近年来,大流域尺度下的极端气温研究引得了国内众多学者的关注。时光训等<sup>[6]</sup>研究发现长江流域平均气温呈显著增加趋势,张克新等<sup>[7]</sup>研究发现黄河流域极端高温天气日数在各个季节均呈现上升趋势,而极端低温天气日数在四季呈现下降趋势,黄强等<sup>[8]</sup>研究发现在过去半个多世纪里,珠江流域总体上呈现出极端高温事件增多,极端低温事件减少。同时,国内一些学者针对石羊河、疏勒河和黑河这三大内陆河流域开展了极端水文气候方面的相关研究。马亚兰等<sup>[9]</sup>研究表明石羊河流域极端气温有明显的增温趋势,最低气温增暖幅度较高气温显著。李玲萍等<sup>[10]</sup>研究表明近45 a以来,石羊河流域气温整体呈上升趋势。王兴梅等<sup>[11]</sup>研究表明近50 a来,石羊河流域最高气温和最低气温在所有季节均呈现增高趋势。郭昆明等<sup>[12]</sup>研究阐明了黑河流域逐年和各季节气温均呈显著上升趋势。然而,针对疏勒河流域极端气温研究相对较少。

疏勒河是甘肃省河西走廊内流水系的第二大河,是区域农业灌溉、工业供水、生态供水以及水利发电供水的主要水源。目前针对疏勒河流域,诸多学者展开了大量研究,主要集中在水资源调度和评价、生态保护、气候变化、降水和径流变化特征以及它们之间的响应关系等方面<sup>[13-19]</sup>,而对极端气温方面的研究仍然相对薄弱。本文以疏勒河流域月气温极值为基本数据,运用线性倾向估计法、滑动平均、累计距平和Mann-Kendall检验法,研究分析极端气温的趋势性、突变性以及周期性,以此为疏勒河流域自然灾害防治、促进农业生产高质量发展、水资源合理调配等方面提供参考,为区域极端气候、灾旱预测、预警与评估提供可借鉴依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

疏勒河流域作为甘肃省三大内陆河流域之一,位于欧亚大陆腹地,远离海洋,地理位置介于 $92^{\circ}11' - 98^{\circ}30'E$ , $38^{\circ}00' - 42^{\circ}48'N$ ,干流全长670 km,流域面积4.13万 $km^2$ <sup>[16]</sup>。由于独特的地理地形特征,使得太平洋、印度洋和北冰洋的暖湿气流无法到达本区,就形成了气候干旱、风沙大,蒸发量大、降水极少的大陆性荒漠气候,是我国极度干旱地区之一。

敦煌、瓜州、玉门为疏勒河水系三大代表性水文站,通过这3个水文站的气温数据对疏勒河流域气候变化进行分析研究,从而为疏勒河旱情防控、水资源调度提供有力的参考依据。

### 1.2 数据来源与研究方法

本文采用瓜州、敦煌和玉门三大站点1951—2018年月最大气温值、月最小气温值作为基础数据,所有数据均来自于甘肃省水文水资源局。文中春季为3—5月,夏季为6—8月,秋季为9—11月,冬季为12—次年2月<sup>[20]</sup>。将三站数据的平均值作为流域极端气温变化分析的依据。

采用线性倾向估计法研究气温随时间变化的趋势,根据倾向值和相关系数来判断极端气温变化特征趋势。通过5 a滑动平均法,以确定时间序列的平滑值来显示气温变化趋势<sup>[21]</sup>。以累计距平曲线明显的起伏趋势,分析气温演变规律和持续性变化特征。利用Mann-Kendall检验法对气温进行突变检验。运用小波分析,研究气温极值变化的周期规律,通过小波方差进一步确定主周期。

## 2 分析与结果

### 2.1 年、季变化特征

**2.1.1 年气温变化特征** 图1为疏勒河流域1951—2018年最高气温变化趋势。由图可知,流域年平均最高气温为 $37.14^{\circ}C$ ,年最高气温总体以 $0.06^{\circ}C/10 a$ 的速率上升,1952年出现年最大值 $43.20^{\circ}C$ 、1993年出现年最小值 $33.93^{\circ}C$ ,整体上呈波动上升、其中1951—1970年呈明显下降趋势、倾向率为 $-1.22^{\circ}C/10 a$ ,1971—2018年以 $0.40^{\circ}C/10 a$ 的速率上升。图2为疏勒河流域1951—2018年最高气温累积距平曲线。由图可知:流域年最高气温以上升—下降—上升的变化过程变化,1951—1953年以 $44.43^{\circ}C/10 a$ 的速率上升,1954—2004年呈现下降趋势,倾向率为 $-5.54^{\circ}C/10 a$ ,2005—2018年呈现

上升趋势,倾向率为  $8.74^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

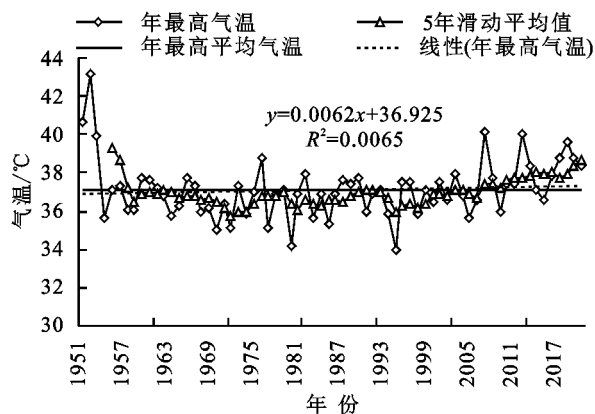


图1 疏勒河流域 1951—2018 年最高气温变化趋势

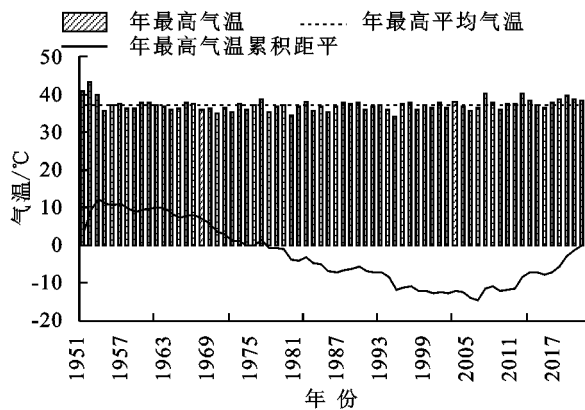


图2 疏勒河流域 1951—2018 年最高气温累积距平

图3为疏勒河流域 1951—2018 年最低气温变化趋势,由图可知:流域年平均最低气温为  $-23.43^{\circ}\text{C}$ ,流域年最低气温整体以  $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  的速率上升,增温率明显大于年最高气温变化,1987 年出现年最大值  $-19.57^{\circ}\text{C}$ ,1991 年出现年最小值  $-30.60^{\circ}\text{C}$ ,整体上呈多段缓慢下降—上升—下降—上升的变化过程变化。图4为疏勒河流域 1951—2018 年最低气温累积距平曲线,整体上呈多段下降—上升—下降—上升的波动变化,其中,1951—1961 年、1971—1981 年、1992—1993 年呈现下降趋势,1962—1970 年、1982—1991 年、1994—2018 年呈现上升趋势。

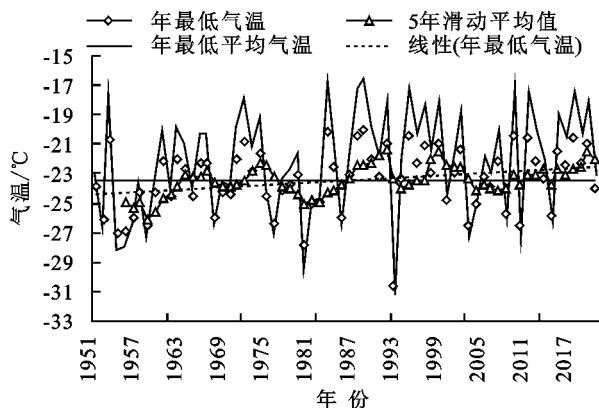


图3 疏勒河流域 1951—2018 年最低气温变化趋势

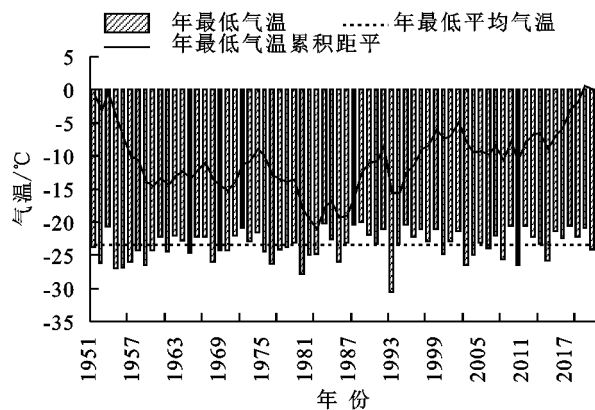


图4 疏勒河流域 1951—2018 年最低气温累积距平

2.1.2 季气温变化特征 图5为疏勒河流域 1951—2018 年季最高气温变化趋势。倾向率排序为:冬季 ( $0.36^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) > 春季 ( $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) > 夏季 ( $0.07^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) > 秋季 ( $0.01^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ),即各个季度增温幅度存在明显差异,其中春季、夏季、秋季检验值均为正值,且均未通过显著性水平  $\alpha=0.05$  的信度检验,表现为不显著增加趋势,而冬季通过了显著性检验,表现为显著增加趋势。夏季最高气温增温率与年最高气温增温率大致接近,由 5 a 滑动平均曲线知,春季、夏季、秋季和冬季均呈现多段下降—上升—下降—上升的波动变化趋势。

图6为疏勒河流域 1951—2018 年季最高气温累积距平曲线。总体上,流域春季和夏季最高气温以下降—上升变化过程变化,春季 1951—1993 年呈现下降趋势,1994—2018 年呈现上升趋势;夏季 1951—2004 年呈现下降趋势,2005—2018 年呈现上升趋势;秋季最高气温以下降—上升—下降变化过程变化,1951—1991 年呈现下降趋势,1992—2007 年呈现上升趋势,2008—2018 年呈现下降趋势;冬季最高气温以下降—上升—下降—上升变化趋势变化,1951—1972 年和 1980—2000 年呈现下降趋势,1973—1979 年和 2001—2018 年呈现上升趋势。总体上,疏勒河流域季最高气温呈现不同波动变化趋势。

图7为疏勒河流域 1951—2018 年季最低气温变化趋势,根据图7倾向率排序为:秋季 ( $0.53^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) > 春季 ( $0.39^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) > 冬季 ( $0.24^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ) > 夏季 ( $0.19^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ),即各个季度的增温幅度存在明显差异。虽整体都呈现上升趋势,但其中春季、夏季、冬季检验值均为正值,且均未通过显著性水平  $\alpha=0.05$  的信度检验,表现为不显著增加趋势,而秋季通过了显著性检验,表现为显著增加趋势。相比较图5,季最低气温变化幅度更大。由 5 a 滑动平均曲线可知,春季、秋季和冬季呈现多段缓慢上升—下降—上升—下降的变化趋势,夏季呈现多段下降—上升—下降—上升的变化趋势。

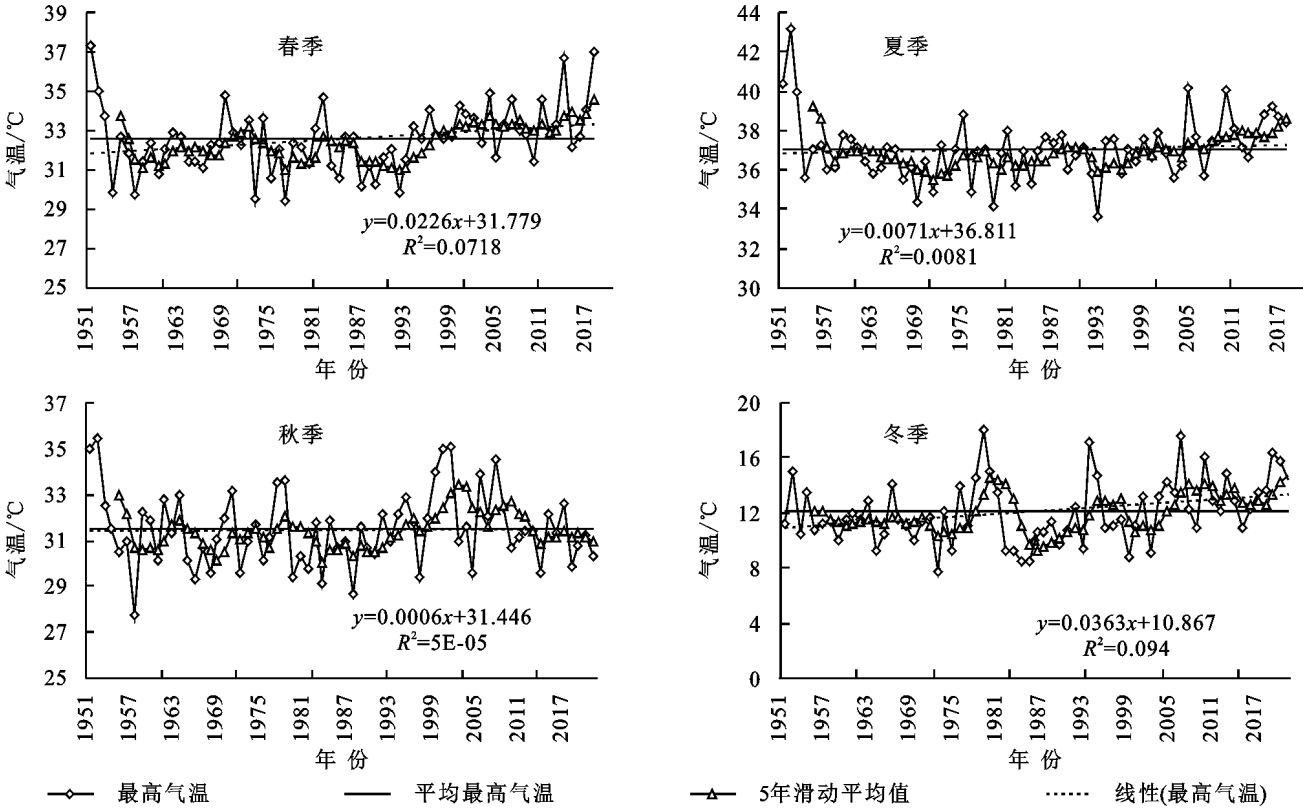


图 5 疏勒河流域 1951—2018 年季最高气温变化趋势

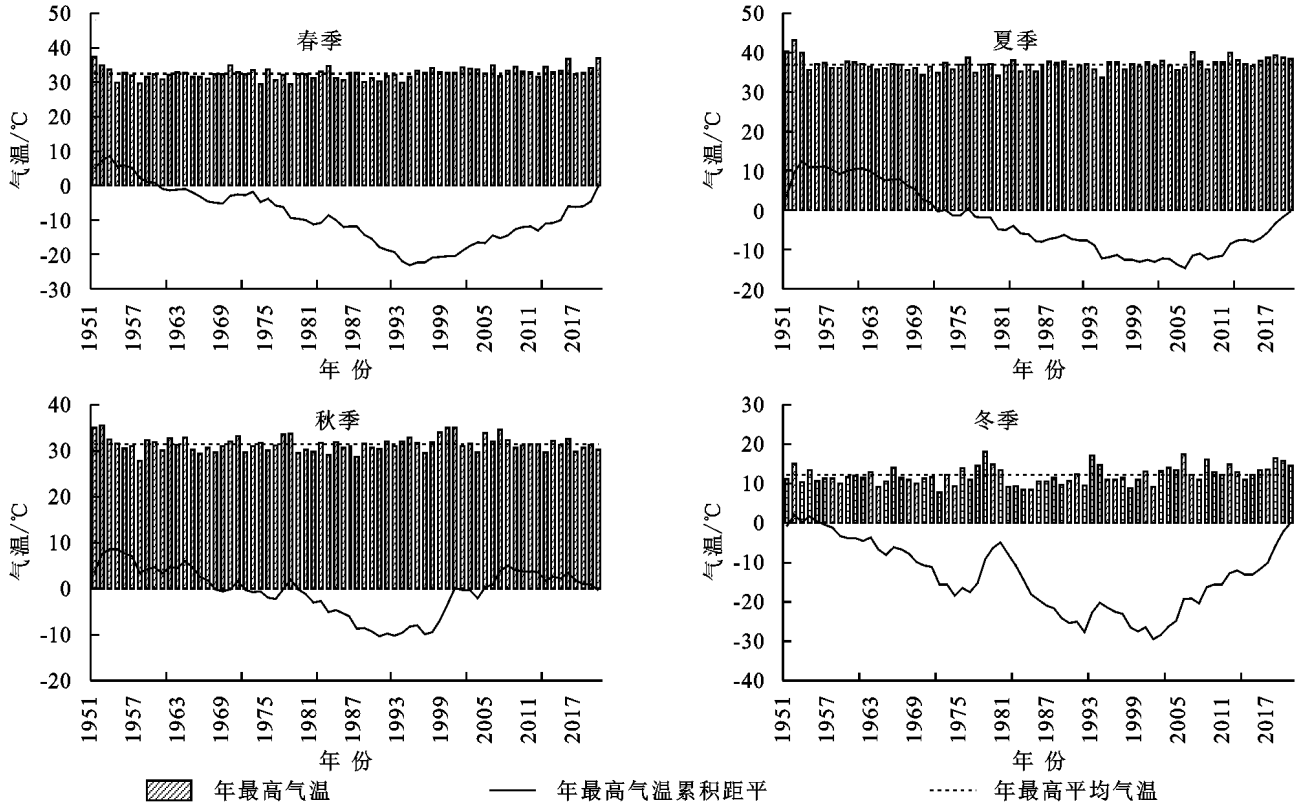


图 6 疏勒河流域 1951—2018 年季最高气温累积距平

图 8 为疏勒河流域 1951—2018 年季最低气温累积距平曲线。由图可知：流域春季、夏季和秋季最低气温以下降—上升的变化过程变化，春季 1951—1989 年呈现下降趋势，1990—2018 年呈现上升趋势；

夏季 1951—1993 年呈现下降趋势，1994—2018 年呈现上升趋势；秋季 1951—1971 年呈现下降趋势，1972—1993 年呈现多次缓慢波动变化，1994—2018 年呈现上升趋势；冬季最高气温以下降—上升—下



降—上升的变化趋势变化,1951—1958 年呈现下降趋势,1959—1972 年呈现上升趋势,1973—1984 年呈

现下降趋势,1985—2018 年呈现上升趋势。总体上,疏勒河流域季最低气温呈现不同波动变化趋势。

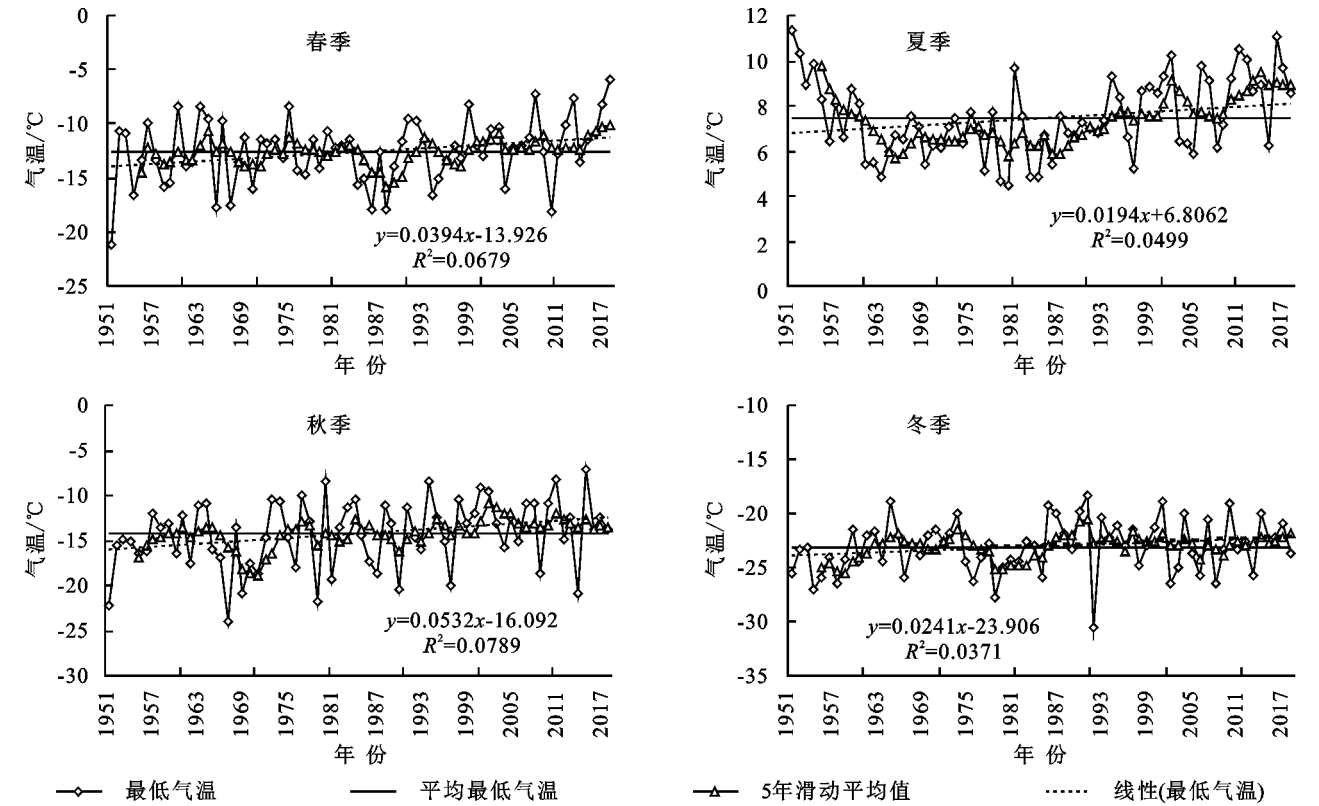


图 7 疏勒河流域 1951—2018 年季最低气温变化趋势

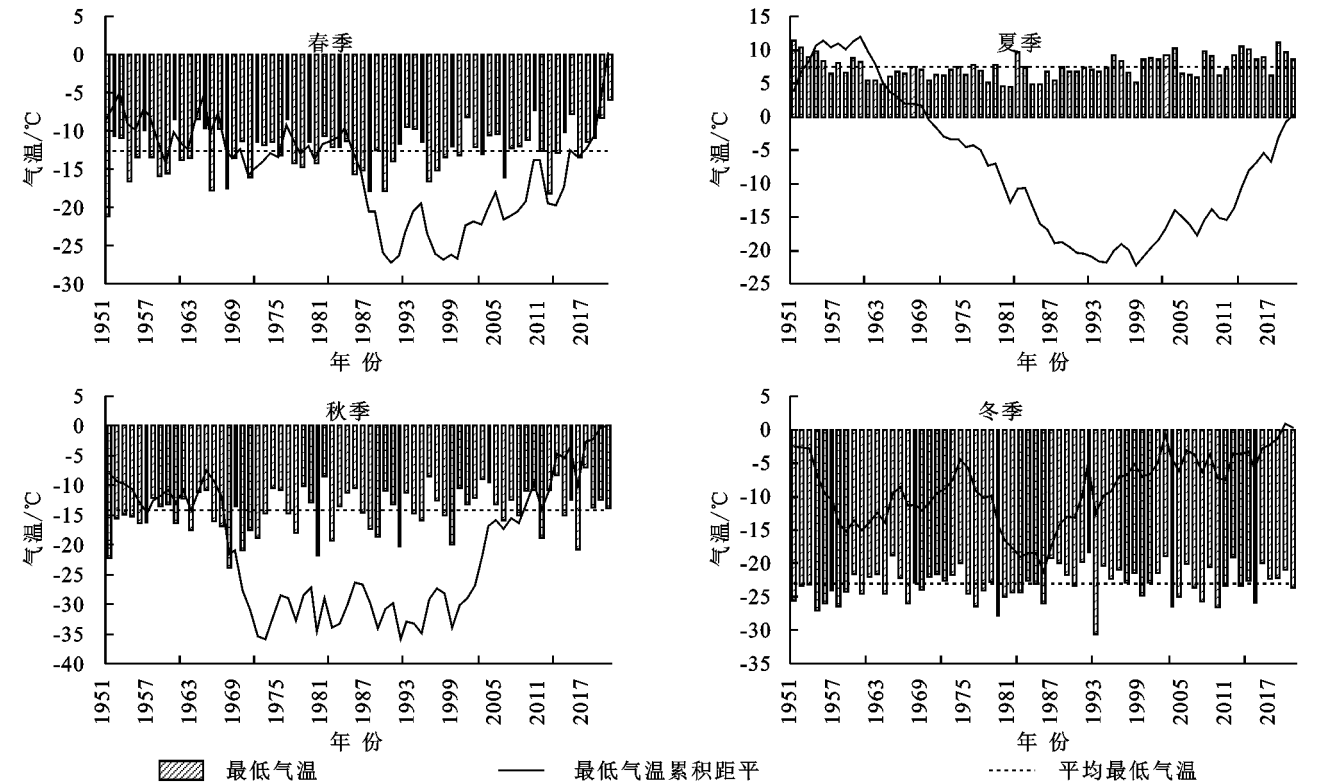


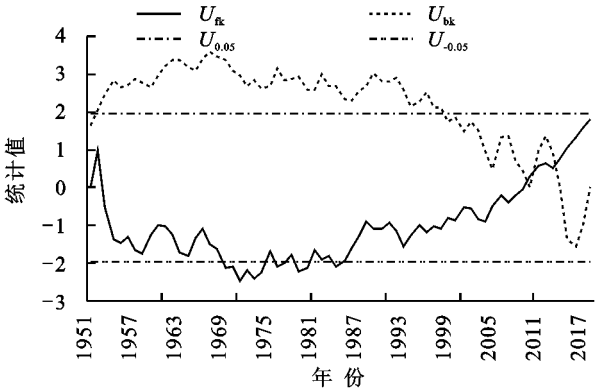
图 8 疏勒河流域 1951—2018 年季最低气温累积距平

2.2 突变特征分析

2.2.1 年最高气温突变特征 图 9 为疏勒河流域 1951—2018 年最高气温 M-K 检验突变曲线,根据

$U_{ik}$  曲线可见,1951—1953 年呈上升趋势,1954—2009 年呈下降趋势,其中 1969—1984 年超过显著性水平 0.05 临界线,说明下降趋势显著。自 2010 年以

后,疏勒河流域年最高气温出现了增暖趋势,但并不显著。 $U_{fk}$ 和 $U_{bk}$ 曲线在 $U \pm 0.05$ 区间里存在交点,表明疏勒河流域年最高气温在2011年发生突变。用滑动t检验,假设基准点为2011年,计算得 $|t|=2.12 > t_{0.05}$ ,即认为年最高气温在2011年处发生了突变。



**图 9 疏勒河流域 1951—2018 年最高气温 M-K 检验**

**2.2.2 年最低气温突变特征** 图 10 为疏勒河流域 1951—2018 年最低气温 M-K 检验突变曲线,根据  $U_{fk}$  曲线可见,自 20 世纪 60 年代以后,疏勒河流域年最低气温出现了明显的增暖趋势。90 年代末至 21 世纪初,增暖趋势超过了显著性水平 0.05 的临界线,这表明疏勒河流域年最低气温在这一时段上升趋势比较显著。由  $U_{fk}$  和  $U_{bk}$  曲线在 1961 年的交点位置,确定疏勒河流域年最低气温自 20 世纪 60 年代以后呈现出不断上升的趋势。同样的,用滑动 t 检验,假设基准点为 1961 年,计算得  $|t|=2.25 > t_{0.05}$ ,即认为年最低气温在 1961 年处发生了突变。

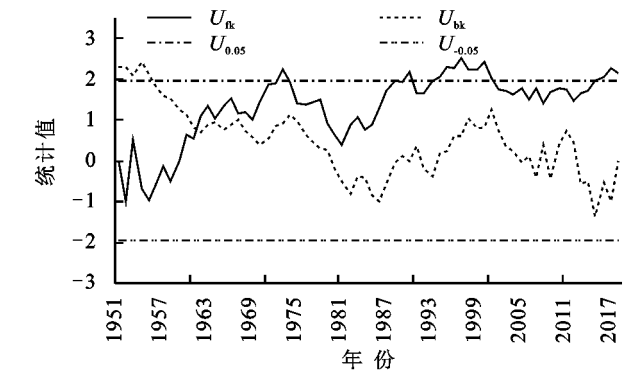
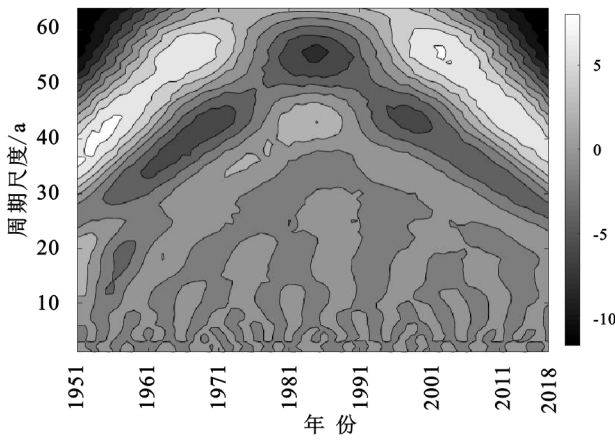


图 10 疏勒河流域 1951 年—2018 年最低气温 M-K 检验

2.3 周期特征分析

近 68 年来,疏勒河流域气温具有多尺度的变化特征。其年际尺度周期不具有全时域性,年最高气温具有 18 a 的振荡周期,且该周期在小波方差图中峰值不明显。年最高气温还存在 45 a,58 a 的振荡周期,以 58 a 为第一主周期,该周期在小波方差图中峰值最明显,振荡较强烈。第二周期为 45 a(图 11);年最低气温具有 4 个振荡周期,58 a 为第一主周期,该周期在小波方差图中峰值最明显,振荡较强烈。第二、第三、第四周期分别为 43 a,17 a,9 a(图 12)。

进一步分析可知,本区的小波分析等值线均为闭合,在年际尺度上分别处于正、负相位。可推测疏勒河流域在未来较长时间将处于持续偏暖。年最高气温、最低气温振荡周期基本一致,在 58 a 周期振荡明显、强烈,但本文采用 68 a 研究时长,因而该尺度周期有待更长时间序列进一步证实。

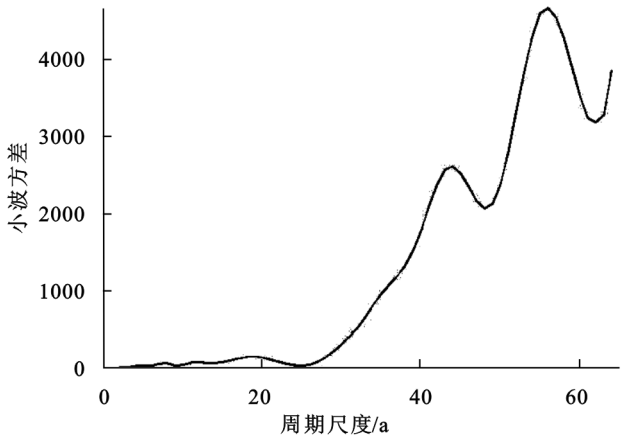


图 11 疏勒河流域 1951—2018 年最高气温小波实部等值线和小波方差

3 结论

- (1) 疏勒河流域气温极值的变化呈上升趋势,同全球增暖变化趋势相同。年最高气温以  $0.06^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  的速率上升,年最低气温以  $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  的速率上升。年最低气温的增暖率大于年最高气温。
- (2) 疏勒河流域 1951—2018 年季最高气温变化

- 总体上都呈上升趋势,倾向率排序为表现为冬季 ( $0.36^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ )  $>$  春季 ( $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ )  $>$  夏季 ( $0.07^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ )  $>$  秋季 ( $0.01^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ),且各季呈现不同波动变化趋势,其中,冬季增温率最大,秋季增温率最小,夏季增温率与年最高气温增温率大体接近。
- (3) 疏勒河流域 1951—2018 年季最低气温变化总体上都呈上升趋势,倾向率排序表现为秋季

$(0.53^{\circ}\text{C}/10\text{ a}) > \text{春季}(0.39^{\circ}\text{C}/10\text{ a}) > \text{冬季}(0.24^{\circ}\text{C}/10\text{ a}) > \text{夏季}(0.19^{\circ}\text{C}/10\text{ a})$ , 且各季呈现不同波动变

化趋势, 其中, 秋季增温率最大, 夏季增温率最小, 与季最高气温相比, 季最低气温上升趋势整体明显。

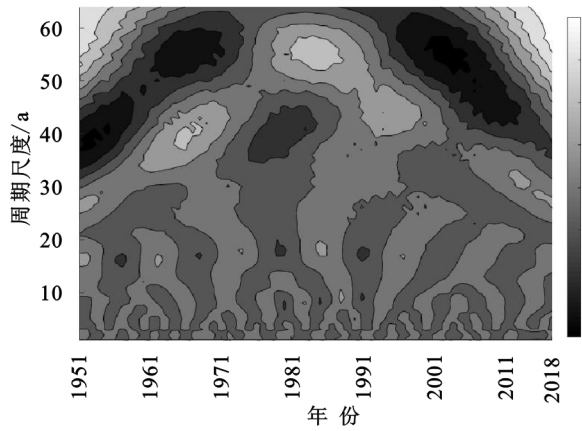


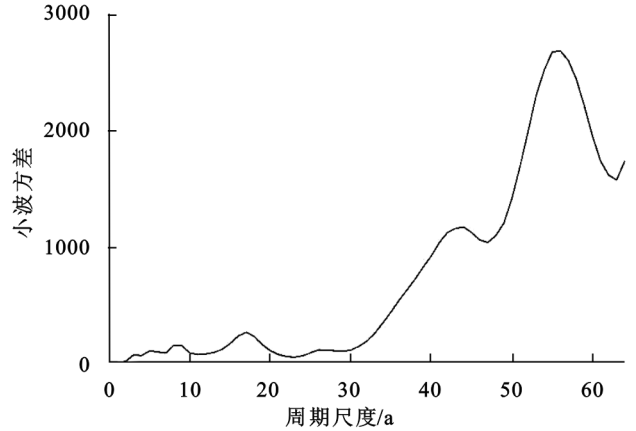
图 12 疏勒河流域 1951—2018 年最低气温小波实部等值线和小波方差

(4) 通过 M-K 检验表明疏勒河流域极端气温年最低温突变时间在 1961 年, 年最高温突变时间在 2011 年。

(5) 年最高气温的振荡周期为 58 a, 45 a 和 18 a; 年最低气温的振荡周期为 58 a, 43 a, 17 a 和 9 a, 其中年最高气温和年最低气温的主周期均为 58 a。

#### 参考文献:

- [1] 王怀军, 潘莹萍, 陈忠升. 1960—2014 年淮河流域极端气温和降水时空变化特征[J]. 地理科学, 2017, 37(12): 1900-1908.
- [2] 王朋, 张蓓蓓, 安康气象站 1953—2016 年气温变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 94-99.
- [3] 孟秀敬, 张士锋, 张永勇. 河西走廊 57 年来气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1482-1492.
- [4] 韩翠华, 郝志新, 郑景云. 1951—2010 年中国气温变化分区及其区域特征[J]. 地理科学进展, 2013, 32(6): 887-896.
- [5] 李庆祥, 董文杰, 李伟, 等. 近百年中国气温变化中的不确定性估计[J]. 科学通报, 2010, 55(16): 1544-1554.
- [6] 时光训. 1970—2014 年长江流域气候变化的时空特征分析[D]. 南昌: 江西师范大学, 2016.
- [7] 张克新, 董小刚, 廖空太, 等. 1960—2017 年黄河流域极端气温的季节变化特征及其与 ENSO 的相关性分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 185-192.
- [8] 黄强, 陈子荣. 全球变暖背景下珠江流域极端气温与降水事件时空变化的区域研究[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 956-967.
- [9] 马亚兰, 刘普幸. 石羊河流域近 46 年来最高、最低气温时空



变化特征分析[J]. 第四纪研究, 2009, 29(5): 957-965.

- [10] 李玲萍, 杨永龙, 钱莉. 石羊河流域近 45 年气温和降水特征分析[J]. 干旱区研究, 2008, 25(5): 705-710.
- [11] 王兴梅, 张勃, 王海军, 等. 石羊河流域近 50 年最高最低气温变化分析[J]. 干旱区地理, 2010, 33(6): 879-888.
- [12] 郭昆明, 颀耀文, 王晓云, 等. 黑河流域 1960—2015 年气温时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 253-260.
- [13] 岳东霞, 陈冠光, 朱敏翔, 等. 近 20 年疏勒河流域生态承载力和生态需水研究[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5178-5187.
- [14] 薛媛, 牛最荣, 赵霞, 等. 基于模糊层次分析法的疏勒河流域高效节水灌溉项目综合评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(2): 147-154.
- [15] 张建新. 疏勒河流域常规节水潜力分析[J]. 水利发展研究, 2019, 19(3): 41-43.
- [16] 孙栋元, 齐广平, 鄢继选, 等. 疏勒河干流降水变化特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 291-303.
- [17] 李曼, 张洁, 李园园. 1985—2010 年疏勒河流域生态系统服务价值评估[J]. 山西师范大学学报: 自然科学版, 2019, 33(3): 56-61.
- [18] 孙栋元, 胡想全, 王忠静, 等. 疏勒河流域径流变化与预测研究[J]. 水利规划与设计, 2019, 191(9): 4-7.
- [19] 张文春. 疏勒河干流中上游径流量变化趋势研究[J]. 地下水, 2019, 41(2): 155-156, 211.
- [20] 张万诚, 郑建萌, 马涛, 等. 1961—2012 年云南省极端气温时空演变规律研究[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 710-722.
- [21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.