DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.06.02

# 1971-2015年鄂西山地极端气温变化特征分析

师银芳, 熊劲锟, 邢 捷
(西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要**: 为深入了解全球气候变暖背景下鄂西山地极端气温事件的变化规律与特征,基于1971-2015年恩施、巴东、来凤、房县4个气象台站的逐日数据,采用线性回归、滑动平均、Mann-Kendall检验和小波分析方法,探讨分析了鄂西地区极端气温的时空变化特征。结果表明:1971-2015年鄂西山地极端最低气温、极端最高气温和高温日数均呈上升趋势,其中极端最低气温的升幅最大,霜冻日数呈减少趋势;极端冷事件数逐年减少,极端热事件数逐年增多,突变年份分别为1996和2007年。鄂西山地极端气温事件具有5、18 a等周期的周期性变化特征,极端气温事件发生频率具有明显交替的变化特征。研究结果能够对鄂西地区防灾减灾,构建极端气温气象灾害的综合防范机制提供参考依据。

**关键词**: 极端气温; 趋势分析; M-K突变检验; 小波分析; 鄂西山地
**中图分类号**:P467 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2022)06-0010-08

# Characteristics of extreme temperature changes in Western Hubei mountains from 1971 to 2015

**SHI Yinfang, XIONG Jinkun, XING Jie**
(*College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *China*)

**Abstract**: In order to have a deep understanding of the changing features of extreme temperature events under the influence of global warming in Western Hubei mountains, the variation characteristics of the extreme temperature events in Western Hubei mountains were analyzed and discussed based on the daily data of four meteorological stations in Enshi, Badong, Laifeng and Fangxian from 1971 to 2015, using methods of linear regression, moving average, Mann-Kendall test and Morlet wavelet. The results showed that the extreme minimum temperature, extreme maximum temperature and the number of high temperature days all showed an increasing trend in the past 45 years, among which, the extreme minimum temperature increased the most; whereas the number of frost days showed a decreasing trend. The number of extreme cold events decreased during the past 45 years, but the number of extreme hot events increased, with 1996 and 2007 as the abrupt change years, respectively. The extreme temperature events had the characteristics of periodic change of 5 and 18 a and so on, and the events changed alternatively. The research results can provide a reference for disaster prevention and mitigation and the formulation of a comprehensive mechanism for the prevention of extreme temperature meteorological disasters in western Hubei.

**Key words**: extreme temperature; trend analysis; M-K abrupt change test; wavelet analysis; Western Hubei mountains

## 1 研究背景

IPCC第六次评估报告(Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report, IPCC AR6)指出,已观测到的极端气候事件频率和强度有所增加,包括极端高温、强降水、干旱和火灾天气[1],以气温为主的气象要素的变化以及极端天气事件发生频率的变化给全球人类的生产和生活带来了深刻影响[1-2]。此外,大量研究表明极端气候在农业、环境等领域所造成的损失尤为严重[3-5]。

在全球气候变暖的趋势下,极端气候事件表现出日趋增多的态势,近年来气温变化相关研究逐渐

**收稿日期**:2021-12-28; **修回日期**:2022-06-21
**基金项目**:国家自然科学基金项目(42161072); 甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA094); 甘肃省高等学校创新基金项目(2020A-017); 西北师范大学青年教师骨干项目(NWNU-LKQN2022-12)
**作者简介**:师银芳(1985-),女,甘肃靖远人,博士,副教授,研究方向为极端气候及环境遥感。

受到国内外众多学者的重视。宁忠瑞等[6]在分析 1948 – 2016 年全球气象要素的演变过程中发现,各大洲的气温在过去近 70 年中均表现出显著的上升趋势;近百年来气温的实测资料显示,我国增暖幅度最大的区域主要在北方地区和高原地区,且出现过气温突变的情况[7-8],这与当地的地理条件与大气环流的变化密切相关;刘微等[9]分析了黄河中游流域极端降水与气温间的关系,结果表明极端降水事件数量在高温区间呈上升趋势;Trenberth 等[10]利用干旱指数分析了过去几十年中全球许多地区气候变化与干旱间的关系,发现全球干旱增长较为明显;Qi 等[11]则重点关注了中国丝绸之路经济带内气候变化与植被间的关系,发现半干旱区和干旱区气温与植被变化呈负相关关系;崔凤琪等[12]通过分析呼伦贝尔草原气象台站的逐日气象数据发现表征极端高温指数的夏日日数、暖夜日数、暖昼日数、暖持续日数显著增多;唐恬等[13]和翟盘茂等[14]分别对 2013 年夏季我国南方大部分地区遭遇的罕见持续性高温天气及 2015 – 2016 年东太平洋海域强厄尔尼诺事件进行了研究,其中不少台站的极端最高气温和高温持续时间打破了历史纪录。极端气候事件的增多是气候变化的缩影,若不对此类现象进行深入研究及高度重视,极有可能对我国的农业生产、环境保护及经济发展等方面带来不利影响。

鄂西山地地形复杂,是地理上的重要分界线,气候变化响应敏感。此外,目前关于鄂西山地区域气候变化的研究还很不充分,因此对该地区极端气候的时空变化规律进行研究具有十分重要的意义。本文选取处于不同地貌区和地理环境的恩施、巴东、来凤、房县 4 个代表性气象台站,分析 1971 – 2015 年鄂西地区的极端气温变化特征与规律,以期为该地区应对气候变化、构建防灾减灾及综合防范体系提供参考。

## 2　数据来源与研究方法

### 2.1　研究区概况

鄂西山地主要包括湖北省西部的丹江口至宜昌一线以西地区,包括十堰市、襄阳市、宜昌市、恩施土家族苗族自治州和神农架林区[15],其范围东界大致在老河口 – 南漳 – 宜昌一线,西部与秦岭、大巴山等山脉相接。鄂西山地平均海拔超过 1 000 m,明显高于东部江汉平原地区和西部四川盆地地区,长江河谷如巫山、巴东等地的海拔高程仅为 100 ~ 200 m,而位于神农架林区的神农顶,海拔高程为 3 106.2 m,是华中地区的最高峰,相对落差约达 3 000 m。鄂西山地地势险峻、地形复杂,气候复杂多变,局地小气候突出,河谷地区夏季高温强度大,高山地区冬季冻雨、雪灾等灾害天气频发,局地气温特征受地形因素的影响较大,这给当地的农业生产和居民生活带来了一定影响。鄂西山地地区高程及所选气象台站分布见图 1。

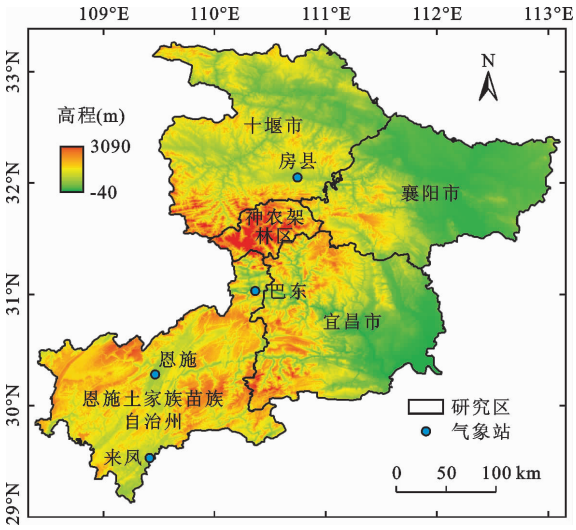



**图 1　鄂西山地地区高程及所选气象台站分布**

鄂西山地包括武当山、大巴山、巫山等众多山脉,是中国地势第二级阶梯和第三级阶梯的界线之一。鄂西山地东西两侧气候差异较大,其中四川盆地由于秦岭和鄂西山地的阻挡,冬季气温比山地东侧的江汉平原高,另外由于山脉的阻挡,盆地内水汽无法完全消散,使得四川盆地内阴雨日数显著偏多,日照时数显著少于江汉平原地区,且在四川盆地内诱发的西南涡东移后常引起长江中下游地区出现强降雨过程[16]。因此,处于四川盆地与江汉平原之间的鄂西山地在气候上具有一定的过渡特征,这对研究江南中西部和江汉地区的气候特征及变化具有重要意义。

### 2.2　数据及预处理

考虑到部分气象台站的气象要素起始记录时间不一致,且存在缺测、漏测及台站迁移等现象,以及研究区西部高原盆地、低海拔河谷地区、高原山地以及中北部河谷盆地不同的气候特征,选取恩施、巴东、来凤、房县 4 个国家级气象站 1971 – 2015 年的逐日气象数据作为数据来源。

为直观、全面地反映该区域内的气候变化,本文选取年极端最低气温、年极端最高气温、高温日数和霜冻日数共 4 个指标来研究鄂西山地多年来极端气温的变化特征,对统计数据中的异常值和异常指标

予以剔除或更正。

### 2.3 研究方法

世界气象组织(World Meteorological Organization,WMO)在 1998 – 2001 年的气候变化监测会议中提出了一套极端气候指数,其中有 27 个指数被认为是核心指数。这一指数集作为气候变化研究的统一标准,具有弱极端性、显著性强等特点,受到不同地区学者的广泛应用[17-18]。本文依据研究区的实际特点,选取 4 个极端气候指标(见表 1)进行气候变化的分析。

表 1 本研究所采用的极端气候指标

| 气候指标(单位) | 代码 | 指标含义 |
|---|---|---|
| 极端最高气温(℃) | TXx | 年内日最高气温最大值 |
| 极端最低气温(℃) | TNn | 年内日最低气温最小值 |
| 霜冻日数(d) | FD | 日最低气温≤0 ℃的日数 |
| 高温日数(d) | | 日最高气温≥35 ℃的日数 |

(1)趋势分析。采用线性回归和 5 a 滑动平均法进行极端气温的变化趋势分析。线性回归法可分析各气象台站部分指标的气候倾向率,5 a 滑动平均法能有效反映极端气候指标随时间序列的增减波动变化趋势,且变化较为平和,受极端数据的影响小。

(2)突变分析。使用 Mann – Kendall 突变检验[19]进行突变分析,监测突变点。该方法简称 M – K 检验,是一种非参数检验方法,不受数据中个别异常值的干扰,能够客观表征样本序列的整体变化趋势[20]。其中,*UF* 为标准正态分布统计量,*UB* 则通过将 *UF* 按时间序列逆序排列得到。将 *UF* 值和 *UB* 值绘制在同一张统计图中,观察曲线 *UF* 和曲线 *UB* 的交点个数,若仅有一个交点,且位于临界值 ± 1.96 置信度线之间,则说明在交点所对应年份处发生了突变;若有多个交点或交点在临界值之外,则不能断定在这些年份发生了突变,要结合其他方法进行判别。

(3)周期分析。小波能量图可反映气候指标在不同时间尺度下随时间的周期性变化特点,且能显示振荡周期及幅度的大小,对未来的气候预测也能起到很好的指导意义[21]。因此,本文选用小波变换分析极端气候随时间变化的周期性特点。

## 3 结果与分析

### 3.1 极端气温变化趋势

表 2 为 1971 – 2015 年研究区 4 个气象台站的极端气温变化率;应用 5 a 滑动平均法分析极端最低气温和最高气温的变化趋势,结果分别如图 2、3 所示。

表 2 1971 – 2015 年研究区各气象台站的极端气温变化率

| 气象台站 | 气象站地理信息 | | | 极端最低气温变化率/(℃/10a) | 极端最高气温变化率/(℃/10a) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 经度/°E | 纬度/°N | 高程/m | | |
| 恩施 | 109.28 | 30.17 | 457.1 | 0.54** | 0.08 |
| 巴东 | 110.22 | 31.02 | 334.0 | 0.37 | 0.01 |
| 来凤 | 109.25 | 29.31 | 459.5 | 0.44** | 0.24 |
| 房县 | 110.46 | 32.02 | 426.9 | 0.42 | 0.20 |

注:“*”表示通过 0.05 显著性检验,“**”表示通过 0.01 显著性检验,下同。

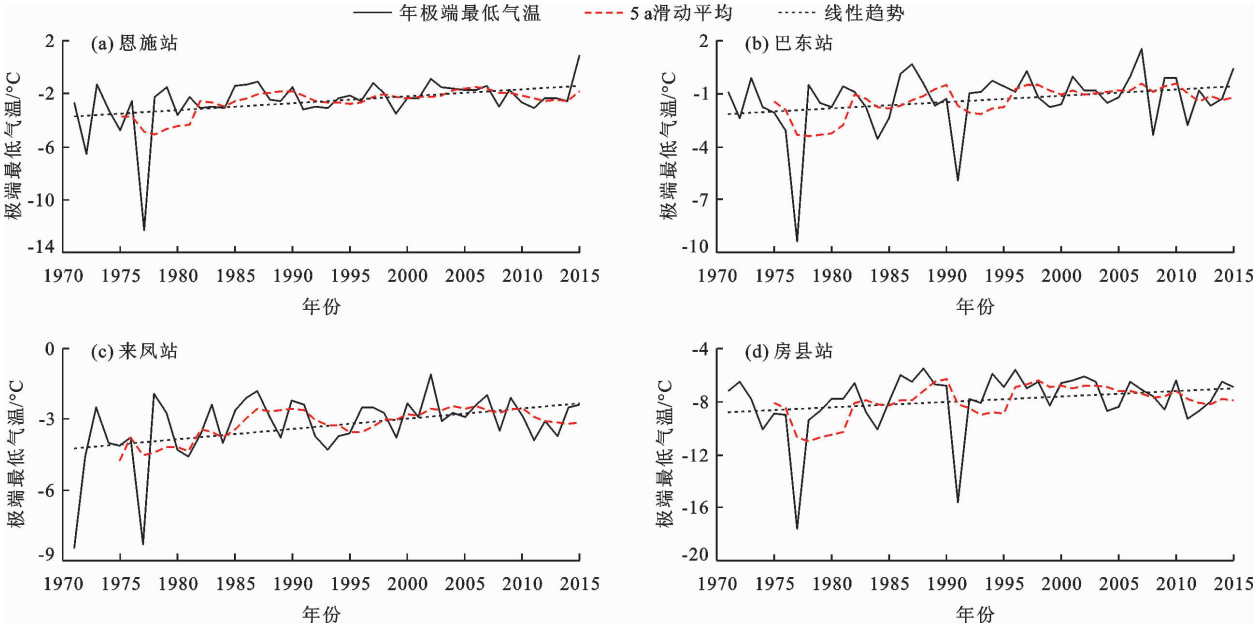



图 2 1971 – 2015 年研究区各气象台站极端最低气温变化趋势

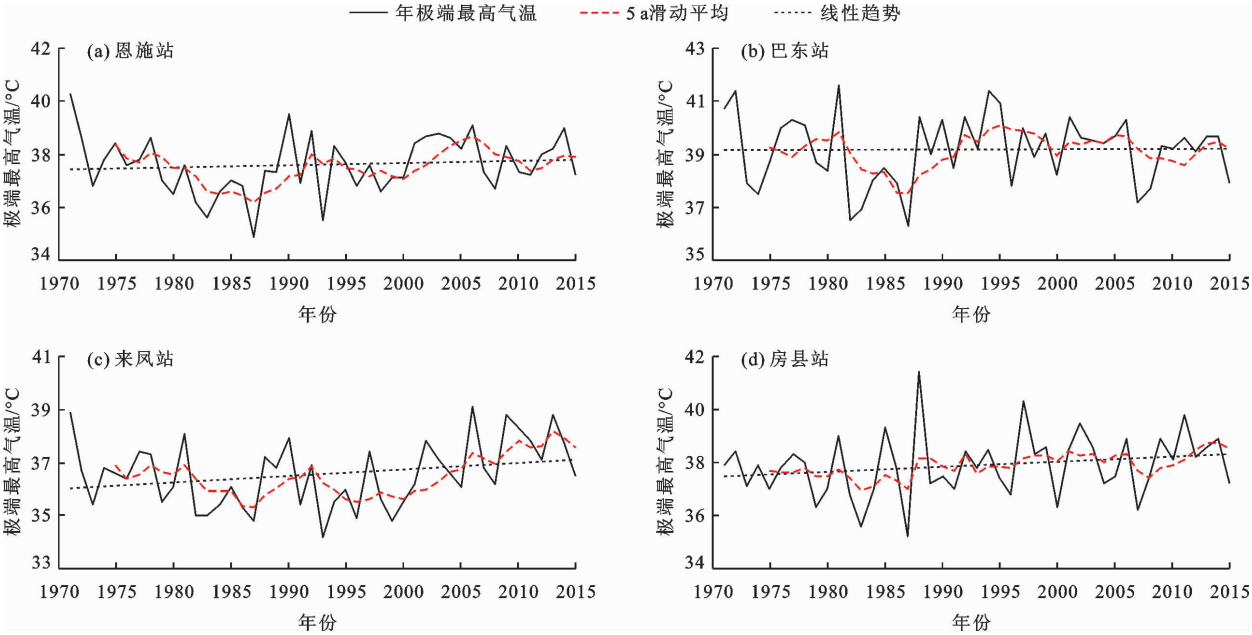



**图 3　1971 – 2015 年研究区各气象台站极端最高气温变化趋势**

由表 2 可知,各台站 1971 – 2015 年极端最低气温和极端最高气温均呈上升趋势,其中极端最低气温的上升幅度大于极端最高气温的上升幅度,且相关性也更高。各台站的极端最低气温上升幅度介于 0.37 ~ 0.54 ℃/10a 之间,其中恩施站的平均上升幅度最大,为 0.54 ℃/10a,其次为来凤站,且该两台站的极端最低气温增加趋势均通过了 0.01 的显著性检验;各台站的极端最高气温上升幅度介于 0.01 ~ 0.24 ℃/10a 之间,其中来凤站的平均上升幅度最大,为 0.24 ℃/10a。

图 2 显示,各台站的极端最低气温均呈波动上升趋势,其中以恩施、来凤站最为明显。研究区在 1971 – 1983 年处于冷期,并在 1977 年出现极端最低气温。1983 – 1995 年各台站极端最低气温的 5 a 滑动平均值先升后降;1995 年以后,各台站的极端最低气温呈现较为稳定的上升趋势。图 3 显示,研究时段内各台站极端最高气温整体呈现较为缓慢的上升趋势,其上升的幅度明显较极端最低气温小。从 5 a 滑动平均曲线来看,各台站大致经历了热 – 冷 – 热 3 个时期,其中 1971 – 1979 年各台站极端最高气温较高,1979 – 1991 年有所降低,1991 年后呈现较平稳的升高趋势,其中来凤、房县站的极端最高气温上升趋势最为明显。

### 3.2　极端气温的年代际变化

表 3 反映了 1971 – 2015 年研究区各气象台站极端气温的年代际变化。

**表 3　1971 – 2015 年研究区各气象台站的年代际极端平均气温变化**　　℃

| 年代 | 极端最低平均气温 | | | | 极端最高平均气温 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 恩施 | 巴东 | 来凤 | 房县 | 恩施 | 巴东 | 来凤 | 房县 |
| 1971 – 1980 | – 4.05 | – 2.36 | – 4.47 | – 9.30 | 37.94 | 39.37 | 36.71 | 37.57 |
| 1981 – 1990 | – 2.15 | – 1.19 | – 3.00 | – 7.28 | 36.89 | 38.54 | 36.16 | 37.68 |
| 1991 – 2000 | – 2.50 | – 1.39 | – 3.15 | – 7.83 | 37.25 | 39.51 | 35.62 | 37.94 |
| 2001 – 2010 | – 1.82 | – 0.63 | – 2.56 | – 7.23 | 38.14 | 39.23 | 37.30 | 38.08 |
| 2011 – 2015 | – 0.92 | – 1.24 | – 3.12 | – 7.88 | 37.92 | 39.20 | 37.58 | 38.54 |
| 研究期 | – 2.54 | – 1.38 | – 3.28 | – 7.91 | 37.60 | 39.17 | 36.57 | 37.90 |

由表 3 可知,研究区各台站年代际极端最低气温呈现比较明显的上升趋势,其中 20 世纪 70 年代至 80 年代升幅最大,平均升幅达到了 1.64 ℃。1990 年后升幅趋于平缓,2000 年后又经历了一次较强的升温,2011 年后极端最低气温较为平稳。与整个研究期平均值相比,除巴东站外,其他台站 2011

年后的极端最低气温均高于研究期平均值,尤其是恩施站 2011 年以后的年际值比研究期平均值高 1.62 ℃,比 20 世纪 70 年代的年际值高 3.13 ℃,升温趋势十分明显。研究区各台站的极端最高气温也大致呈现逐年代升高的趋势。与极端最低气温不同的是,极端最高气温的升幅较小,且存在比较明显的年际波动。其中来凤站的年代际极端最高平均气温呈现先下降后上升的波动变化,20 世纪 90 年代的极端最高平均气温比整个研究期该平均值低0.95 ℃,比 20 世纪 70 年代该平均值低 1.09 ℃,2000 年后这一数值大幅增长,2011 – 2015 年的极端最高平均气温比 20 世纪 90 年代该平均值升高了将近 2 ℃。在所选取的 4 个气象台站中,仅房县站的极端最高气温年代际平均值呈现稳定的上升趋势,且升幅居于 4 个台站的首位。

### 3.3 极端气温事件的变化趋势

气候分析上通常采用霜冻日数作为衡量极端冷事件的标准之一,采用高温日数作为衡量极端热事件的标准之一。表 4 反映了 1971 – 2015 年研究区各气象台站霜冻日数和高温日数的变化率。图 4、5 分别为 1971 – 2015 年研究区各气象台站霜冻日数、高温日数的变化趋势。

表 4 1971 – 2015 年研究区各气象台站霜冻日数和高温日数变化率 d/10a

| 气象台站 | 霜冻日数变化率 | 高温日数变化率 |
|---|---|---|
| 恩施 | – 1.34 * | 1.82 |
| 巴东 | – 0.67 | 0.59 |
| 来凤 | – 1.07 | 2.62 ** |
| 房县 | – 4.05 ** | 1.00 |

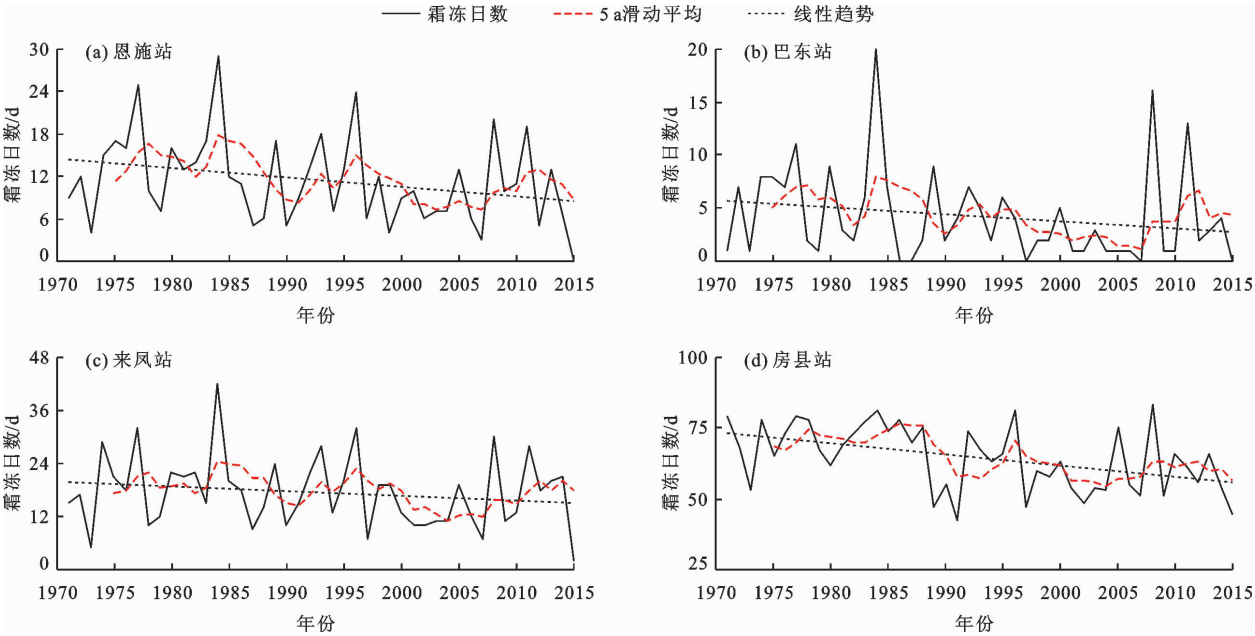



图 4 1971 – 2015 年研究区各气象台站霜冻日数变化趋势

由表 4 可知,整体而言,研究期内鄂西山地极端冷事件数在减少,极端热事件数在增加。具体而言,各台站霜冻日数均呈下降趋势,高温日数均呈上升趋势,仅各台站之间的降幅或升幅略有差异。其中,房县站的霜冻日数减少幅度最大,平均减幅为 4.05 d/10a;来凤站的高温日数增幅最大,平均增幅为 2.62 d/10a。

由图 4 可以看出,鄂西山地的霜冻日数虽有年际波动,但整体上呈现显著的减少趋势,其中纬度最高的房县站减幅最大。绝大多数台站的霜冻日数最大值主要出现在 20 世纪 70 年代和 80 年代,80 年代之后各台站的霜冻日数开始明显减少,2007 年前后达到谷值。此后几年间霜冻日数虽有微弱的增加趋势,但难以扭转整体减少的大趋势。上述结果表明该地区 1971 – 2015 年间极端冷事件数在逐渐减少,而无霜期的减少可能会给当地的农业生产带来一定影响。

由图 5 整体来看,各台站的高温日数呈逐步增加趋势,且研究区高温日数的变化趋势与其极端最高气温的变化趋势大致相同,经历了多 – 少 – 多 3 个时期。具体而言,1991 年后各台站的高温日数有明显的增加趋势,其中海拔较高的恩施站和来凤站的增幅最大。2000 年后各台站的高温日数频创纪录,如 2013 年,房县站、来凤站和巴东站高温日数达

到最大值,分别为 35、38 和 51 d,较常年平均日数偏多 20 d 以上。

### 3.4　极端气温事件的突变分析

为分析鄂西山地极端气温事件的突变特征,取各台站 1971 – 2015 年霜冻日数和高温日数的算术平均值进行 M – K 检验,结果如图 6 所示,由图 6 的 M – K 检验图可得出该地区各台站极端气温事件变化趋势及突变年份,见表 5。

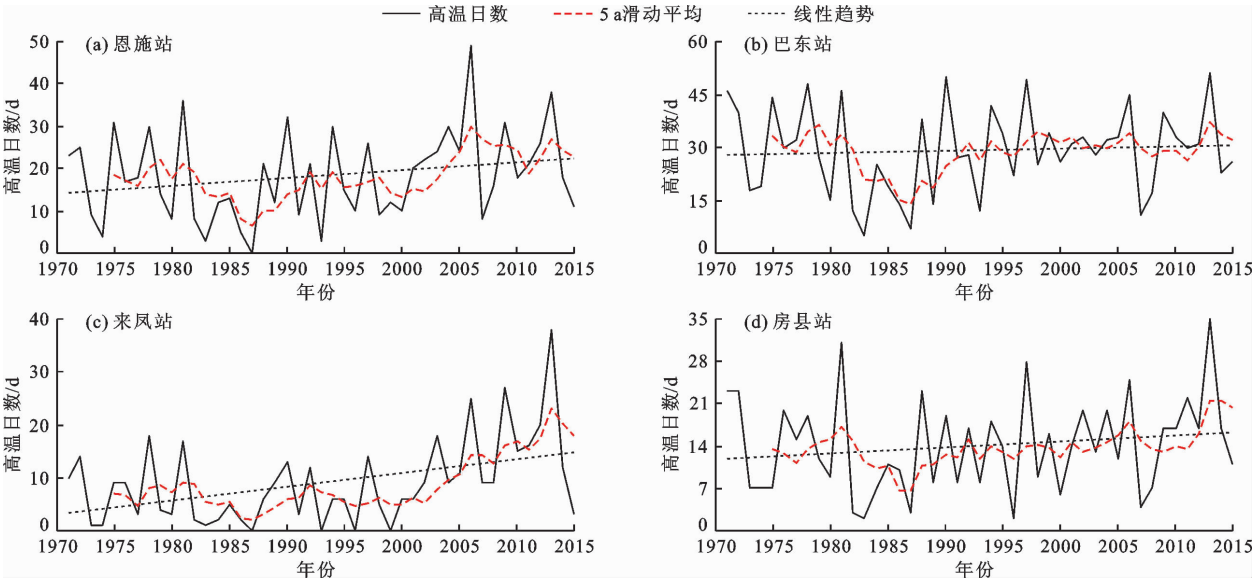



图 5　1971 – 2015 年研究区各气象台站高温日数变化趋势

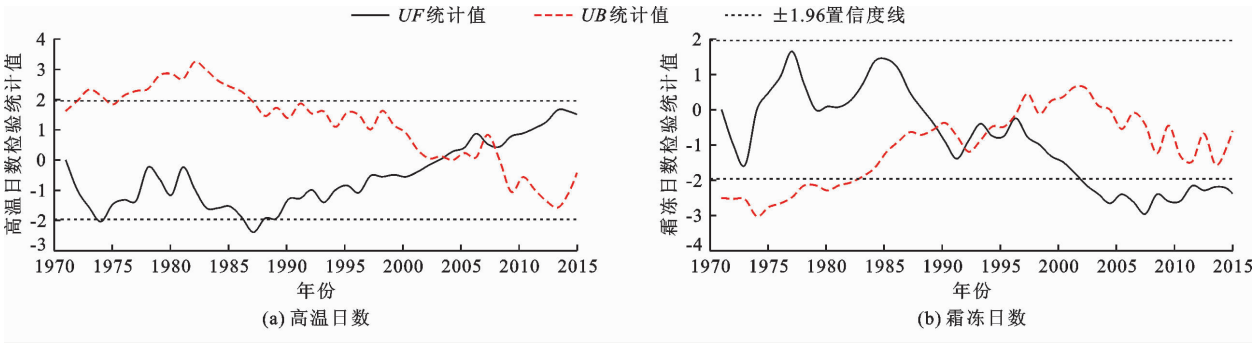



图 6　1971 – 2015 年研究区各气象台站高温日数、霜冻日数均值的 M – K 检验

表 5　1971 – 2015 年研究区各气象台站极端气温事件的变化趋势

| 极端气温指标 | 统计量 $Z$ | 变化趋势 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 显著增加年份 | 显著减少年份 | 突变年份 |
| 高温日数 | 0.33 | 2008 – 2015 | 1983 – 1989 | 2007 |
| 霜冻日数 | – 0.87 | 1976 – 1986 | 2000 – 2015 | 1996 |

由图 6 和表 5 可见,高温日数的增减趋势与霜冻日数的增减趋势截然相反,高温日数呈现先减后增的趋势,其中 1987 年前后的减少趋势显著,2003 年后则表现为明显的增加趋势;而霜冻日数则呈现先增后减的趋势,从 1987 年开始明显减少,2000 年后减少趋势显著。由统计数据可以得到,高温日数突变年份大致为 2007 年,霜冻日数突变年份为 1996 年。突变年份前后高温日数、霜冻日数的平均值均发生了较大变化,这与线性统计结果相一致。

### 3.5　极端气温的周期分析

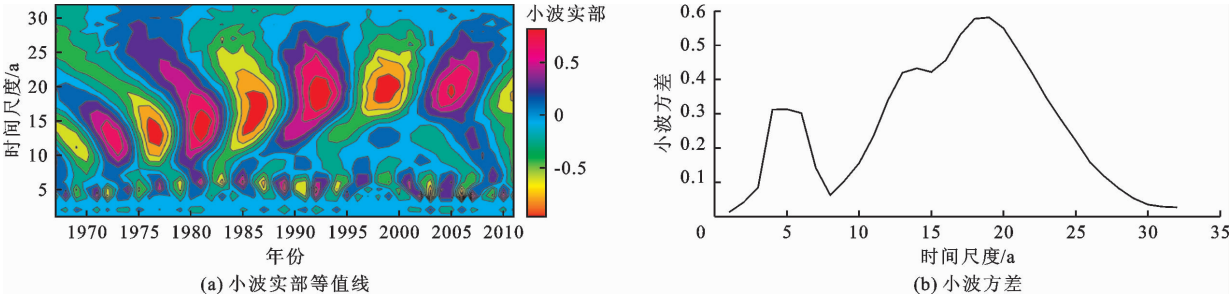
采用 Morlet 小波分析法分析鄂西山地 1971 – 2015 年极端冷事件数和极端热事件数的周期性特征,结果如图 7、8 所示。

在小波实部等值线图中,正值表示相应的极端气温事件数为正距平,说明该时期处于极端冷事件或极端热事件频发时期;负值表示相应的极端气温事件数为负距平,说明该时期处于极端冷事件或极端热事件偏少时期。

由图 7 可见,鄂西山地 1971 – 2015 年极端冷事件数存在 5 和 18 a 左右的振荡周期,其中 18 a 左右

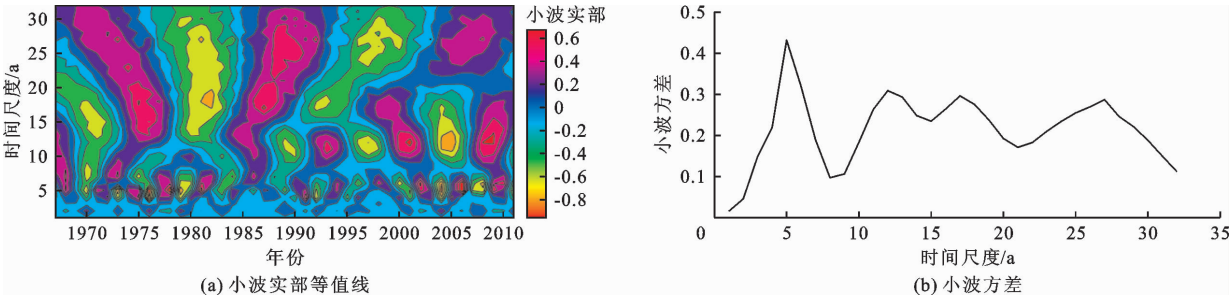
的时间尺度能量最强,周期变化最显著,小波方差值最大,为主周期。需要注意的是,主周期的时间尺度变化呈现逐年增加的趋势,1980 年以前,主周期的时间尺度约为 13 a,1993 年左右周期变化的时间尺度达到了 18 a,2000 年以后周期变化的时间尺度约为 20 a。这一变化说明极端冷事件数的大周期振荡变化尺度正逐步增大,极端冷事件数的周期交替频率趋于缓和。此外,极端冷事件数还存在 5 a 的变化小周期,变化最显著的时段在 1981 – 1996 年间。根据小波分析图可以预测,2009 – 2018 年间极端冷事件数的发生频率将较低,尤以 2014 年左右偏低最为显著,这与实际观测情况大致相符。而 2019 年之后的 10 年将可能迎来极端冷事件数的频发阶段,结合小周期来看,2022 年左右为极端冷事件数频发大周期内的频发小周期,极端冷事件数可能将迎来一个新的频发段。

由图 8 可见,极端热事件方面的周期变化波动性较大,不同时间段的主导周期不同,较明显的时间尺度周期有 5、12、17、27 a。其中以 5 a 为时间尺度的周期变化最为明显;以 12 a 为时间尺度的周期变化在 1984 年后逐渐明显,并且周期振荡有增强趋势;以 17 或 27 a 为时间尺度的周期振荡有减弱趋势。从实际来看,应以 5 和 12 a 时间尺度为主要分析依据。由于 12 a 的周期振荡有增强趋势,这说明在未来几年内,极端热事件数的强度有两极分化的趋势,冷夏、热夏的出现频率将会更高。



(a) 小波实部等值线 (b) 小波方差

**图 7 1971 – 2015 年研究区各气象台站极端冷事件数小波周期变化**



(a) 小波实部等值线 (b) 小波方差

**图 8 1971 – 2015 年研究区各气象台站极端热事件数小波周期变化**

## 4 讨 论

鄂西山地 1971 – 2015 年的极端冷事件数逐渐减少,极端热事件数逐渐增加,这与全国范围内极端气温事件的变化趋势相一致[22-23]。通过 M – K 检验和小波变换表明研究区的极端气温事件存在突变现象,且有明显的冷暖交替周期,这与 Li 等[24]的研究结果相似,同时与蔡慧君等[21]对辽东山区春季极端低温时空分布特征及发生概率预测的研究结果类似。针对可能发生的极端冷事件和极端热事件,本文采用小波分析法进行周期分析,通过对鄂西山地最近几年气候状况的研判,发现实际情况与小波变换得到的结果基本一致,并进一步对鄂西山地未来的气候状况做了一定的预测和判断,得出未来的极端冷热事件数出现频率可能更高的结论,并给出了最有可能发生的时段。

此外,Li 等[24]通过对中国西南地区分布于不同高程的 111 个气象站点极端温度指数的研究表明,平原站和山间盆地站、山谷站、山峰站的极端气温指数变化有所区别,因而局地的极端气温变化还需进一步讨论。本文选取的 4 个气象台站有各自的代表性,但由于鄂西山地面积较大,地形复杂多样,且气候变化的研究应该与大气环流的变化相结合,因此本研究还具有一定的局限性,具体极端气温事件的形成原因,还需结合宏观大气状况,以及当下热点气候话题如热岛效应、下垫面等进行深入讨论。

## 5 结　论

(1)1971 – 2015 年鄂西山地的极端气温呈现较为明显的波动升高趋势,其中极端最低气温的升幅较极端最高气温明显,极端气温年际差表现出逐步减小的趋势。

(2)1971 – 2015 年鄂西山地极端冷事件数逐渐减少,极端热事件数逐渐增加,且存在年际突变现象。纬度较高区域的霜冻日数减少幅度最大,海拔较高区域的高温日数增加幅度最大。

(3)1971 – 2015 年鄂西山地极端气温变化呈现较为明显的周期性波动特征,极端冷事件数存在以 18 a 为主周期的周期性变化特征,且主周期的尺度变化有增加趋势。极端热事件数以 5 a 为时间尺度的周期变化最明显,以 12 a 为时间尺度的周期变化在 1984 年后逐渐明显,且周期振荡逐渐增强。

根据周期分析可知,2019 年后的 10 年间极端冷事件数可能迎来一个新的频发段,极端热事件数的强度将呈两极分化趋势,极端冷夏和极端热夏均可能出现。在全球气候变暖的背景下,极端冷事件数异常减少,极端热事件数逐渐增多,结合当前全国极端气候频发的特征,势必会对我国农业生产、生态环境和人民生活造成一定的影响,应引起重视。本研究仅用 4 个代表性气象台站来研究鄂西山地的极端气候事件具有一定的局限性,在此基础上,在以后的研究中将利用多气象台站和多极端气候指标从空间、时间角度进行系统性的研究与分析。

**参考文献:**


[1] 匡舒雅,周泽宇,梁媚聪,等. IPCC 第六次评估报告第二工作组报告解读[J]. 环境保护,2022,50(9):71 – 75.

[2] 封 珊,徐长乐. 全球气候变化及其对人类社会经济影响研究综述[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(S2):6 – 10.

[3] 许 迪,李益农,龚时宏,等. 气候变化对农业水管理的影响及应对策略研究[J]. 农业工程学报,2019,35(14):79 – 89.

[4] ELLIOT J, DDRYNG D, MULLER C, et al. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(9): 3239 – 3244.

[5] GRAFTON R Q, PITTOCK J, DAVIS R, et al. Global insights into water resources, climate change and governance [J]. Nature Climate Change, 2013(3): 315 – 321.

[6] 宁忠瑞,张建云,王国庆. 1948 – 2016 年全球主要气象要素演变特征[J]. 中国环境科学,2021,41(9):4085 – 4095.

[7] 丁一汇,戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J]. 气象,1994,20(12):19 – 26.

[8] 李红梅,李 林. 2℃ 全球变暖背景下青藏高原平均气候和极端气候事件变化[J]. 气候变化研究进展,2015,11(3):157 – 164.

[9] 刘 微,邵广文,吕多智,等. 黄河中游流域极端降水与气温的关系[J]. 水电能源科学,2022,40(4):5 – 9.

[10] TRENBERTH K E,DAI A,SCHRIER G V D,et al. Global warming and changes in drought [J]. Nature Climate Change,2014(4): 17 – 22.

[11] QI Xiangzhen, JIA Junhe, LIU Huiyu, et al. Relative importance of climate change and human activities for vegetation changes on China's silk road economic belt over multiple timescales [J]. Catena, 2019, 180: 224 – 237.

[12] 崔凤琪,唐海萍,张 钦,等. 1960 – 2017 年呼伦贝尔草原极端气候事件时空变化[J]. 干旱区研究,2018,35(6):1382 – 1391.

[13] 唐 恬,金荣花,彭相瑜,等. 2013 年夏季我国南方区域性高温天气的极端性分析[J]. 气象,2014,40(10):1207 – 1215.

[14] 翟盘茂,余 荣,丁一汇,等. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J]. 气象学报,2016,74(3):309 – 321.

[15] 陈 亮,王学雷,杨 超,等. 2000 – 2018 年鄂西山区植被 EVI 时空变化特征及其地形效应[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(2):419 – 426.

[16] 刘晓波,储 海. 一次西南低涡东移引发长江中下游暴雨的诊断研究[J]. 气象,2015,41(7):825 – 832.

[17] 焦文慧,张 勃,黄 涛,等. 近 30 a 河东地区极端气温时空变化[J]. 干旱区研究,2019,36(6):1466 – 1477.

[18] 周玉科,高 琪. 1960 – 2012 年青藏高原极端气候指数数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版),2017,2(2):70 – 78.

[19] 姜雨彤,郭 宁,马勇星,等. 1960 – 2016 年陕西省极端气温的时空变化研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(4):124 – 131.

[20] 张晓闻,臧淑英,孙 丽. 近 40 年东北地区积雪日数时空变化特征及其与气候要素的关系[J]. 地球科学进展,2018,33(9):958 – 968.

[21] 蔡慧君,金 磊,肇同斌,等. 辽东山区春季极端低温时空分布特征及发生概率预测[J]. 自然灾害学报,2020,29(3):173 – 185.

[22] 娄珊珊,陈光舟,陆雅君,等. 安徽省近 40 a 极端温度事件的气候特征分析[J]. 暴雨灾害,2019,38(1):72 – 78.

[23] 谭艳立,罗菊英,向 远. 近 50 年恩施市气温与浅层地温变化特征及其相关性分析[J]. 高原山地气象研究,2018,38(2):42 – 48.

[24] LI Zongxing, HE Yuanqing, THEAKSTONE W H, et al. Altitude dependency of trends of daily climate extremes in southwestern China, 1961 – 2008 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22: 416 – 430.