

# 山西南部近50年极端气温变化研究

马淑苗<sup>1</sup>, 赵景波<sup>1,2</sup>

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710062;  
2. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075)

**摘要:**根据山西南部1961—2010年的日气温资料,结合线性拟合、M-K突变检验以及小波分析,分析山西南部各个极端气温指标的变化趋势、突变年份以及振荡周期等。结果表明:山西南部的冷日和冷夜显著减少,分别为 $3.2 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 和 $5.4 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ ;暖日和暖夜显著增加,分别为 $9.4 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 和 $9.2 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ ;极端最低气温和极端最高气温都以 $0.36^\circ\text{C} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 的速率增加。极端气温事件的各指标均发生了突变,且突变多集中在1980年代和1990年代。极端气温事件有3 yr、5 yr、14 yr、18 yr 和 28~32 yr 左右的振荡周期。

**关键词:**极端气温; M-K突变检验; 小波分析; 山西南部

**中图分类号:** P467    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-9901(2011)06-0653-06

## Research on annual extreme temperature of southern Shanxi Province in recent 50 years

MA Shu-miao<sup>1</sup>, ZHAO Jing-bo<sup>1,2</sup>

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;  
2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology,  
Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** Based on daily air temperature data of southern Shanxi Province from 1961 to 2010, the trends, jumping years and periodic changes of indices for extreme air temperature in southern Shanxi Province were analyzed with linear fitting, M-K abrupt change test and wavelet analysis. Cold days and cold nights in southern Shanxi Province decreased significantly at the speed of  $3.2 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$  and  $5.4 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ , respectively. Warm days and warm nights increased significantly at the speed of  $9.4 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$  and  $9.2 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ , respectively. Extreme minimum temperature and extreme maximum temperature both increased  $0.36^\circ\text{C} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ . All of the indices for extreme air temperature occurred abrupt change and the abrupt years mainly centralized in the 1980s and 1990s. The extreme temperature events have several oscillating period such as three years, five years, fourteen years eighteen years and twenty eight to thirty two years.

**Key words:** extreme temperature; M-K abrupt change test; wavelet analysis; southern Shanxi Province

IPCC的第四次评估报告指出(IPCC, 2007),在1906—2005年间,全球平均地表温度升高了 $0.74^\circ\text{C}$ ( $0.56 \sim 0.92^\circ\text{C}$ ),大于第三次评估报告(Houghton et al., 2001)给出的1901—2000年增加了 $0.6^\circ\text{C}$ ( $0.4 \sim 0.8^\circ\text{C}$ ),说明近些年来全球变暖趋势越来越明显。在全球变暖的大背景下,极端气温的变化规

律受到国内外学者的广泛关注。Alexande et al (2006)对全球极端气温和降水变化的研究表明,在1951—2003年间,全球70%的陆地暖夜显著增加,冷夜以相同的速率减少。Karl(1996)对美国的研究显示,冷夜显著减少,但暖日增长不明显。在大不列颠(Jones et al., 1999)、欧洲北部和中部(Heino et

al, 1999)以及澳大利亚和新西兰(Plummer et al, 1999)都存在与美国相同的现象。Klein Tank et al (2006)对亚洲中部和南部的研究表明,亚洲中部和南部日较差在逐渐变小,且暖日、冷日的变化趋势比暖夜、冷夜的变化趋势小,表现出不对称性。在中国,翟盘茂(1997)和任福民(1998)对中国极端气温变化的研究表明,极端最低温度显著上升,极端最高温度在缓慢下降,唐红玉等(2005)研究1951—2002年中国最高、最低气温及日较差变化发现,中国最高气温在南方变化不明显或呈弱的降温趋势,而北方增暖明显,年平均最低气温的变化在中国各地基本一致,呈明显的变暖趋势,中国年平均日较差呈下降趋势。刘学华等(2006)研究发现,气温极端暖指数整体呈上升趋势,极端冷指数整体呈下降趋势。马柱国等(2003)对中国北方1951—2000年的极端温度发生频率和强度进行研究表明,在中国北方地区,最低温度发生频率显著减少,而最高温度发生频率的变化趋势具有很大的区域差异,在华北南部、江淮和新疆北部等地区最高温度发生的频率在减少,其余地区则增加,年最低温度在中国北方均为显著的增加趋势,而年最高温度在西北西部为降温趋势。任朝霞和杨达源(2007)研究西北干旱区1961—2000年的日最高、最低气温得出,西北干旱区年最低温度有增加趋势,年最高温度略有减少趋势。

极端气温在空间上具有差异性,上述研究成果大多是针对全国或大范围区域的极端气温变化,而目前针对小区域极端气温变化的研究还不全面和深入,有必要选取一个具有代表性地区进行研究。山西南部由临汾盆地和运城盆地组成,地处华北平原以西,介于太行山、中条山和黄河之间,该区气候具有一定的区域代表性,且山西南部经济的发展主要靠农业生产,极端气温会对当地的农业生产带来一定程度的经济损失,因此研究该地区的极端气温变化具有实际意义。本文主要讨论山西南部50年来极端气温的变化趋势、突变以及周期分析,以期

为预测和预防极端气温灾害提供参考和科学依据。

## 1 资料和方法

本文中日最高、最低气温来源于“中国气象科学数据共享服务网”(<http://cdc.cma.gov.cn>)中公布的山西南部气象站的资料。为了尽可能保证气象站数据资料长度的均一、稳定和完整,气象资料时间跨度一致取为1961—2010年。山西南部的气象数据为临汾、隰县和运城3个测站1961—2010年统计资料的加和平均,遇到闰年时,将2月29日的最高(低)气温与2月28日的加和平均,即1961—2010年间每年按365日进行计算。

结合山西南部的气候条件,从已有文献(Aguilar et al, 2005; Peterson et al, 2005; Alexander et al, 2006)选取6个极端气温指标(表1)来分析山西南部极端气温的变化趋势。文中采用线性倾向估计法分析极端气温变化趋势,计算采用最小二乘法进行估计,用其线性倾向值来分析要素的年际变化率。研究显著性水平取0.05和0.01,如果统计量小于0.05,则认为趋势是显著的,统计量小于0.01,则认为趋势是极显著的。用M-K非参数检验方法(魏凤英,1999)检验突变年份,用Morlet复小波(施能,2002)分析极端气温的周期性。

极端气温事件的定义(Aguilar et al, 2005; Zhang et al, 2005),根据每个测站的日最高(低)气温分别确定其极端高(低)温阈值,方法如下:选取1961—1990年的日最高(低)气温作为基期进行分析,将某站1961—1990年中同日的最高(低)气温资料按升序排列,得到该日第90(10)个最高(低)气温的百分位值,按照此方法得到365个最高(低)气温的第90(10)个百分位值,将之作为极端高(低)气温事件的上(下)阈值,如果某日的最高温度超越了该日极端气温事件的上阈值,则认为该日出现了极端高温事件,同理如果某日的最低温度超越了该日极端气温事件的下阈值,则认为该日出现了极端低温事件。

表1 极端气温的指标

Table 1 Indices for extreme air temperature

指标名称	定义	单位
极端最高气温	每年最高的日最高气温	℃
极端最低气温	每年最低的日最低气温	℃
冷夜	日最低气温小于1961—1990年间的第10个百分位数值的天数	天数
暖夜	日最低气温大于1961—1990年间的第90个百分位数值的天数	天数
冷日	日最高气温小于1961—1990年间的第10个百分位数值的天数	天数
暖日	日最高气温大于1961—1990年间的第90个百分位数值的天数	天数

## 2 结果与分析

### 2.1 趋势分析

图1a、图1b和图1c分别为山西南部冷日、冷夜以及极端最低气温的时间序列。从图1a可以看出,山西南部冷日的变化总体上呈减少趋势,速率为 $3.2 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ ,达到99%信度检验。从年代际变化来看,冷日在1960年代到1990年代期间呈阶梯式下降,最近10年冷日相对1990年代有略微的增加,其冷日的平均值为28.7 d,但仍比1960年代的10年平均值少11.1 d。参与统计的三个台站都为减少趋势,但仅隰县站通过显著性检验,其下降速率为 $5.7 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ ,其余两个站均未通过显著性检验(表2)。

从图1b统计整个序列得到冷夜呈很强的减少趋势,为 $5.4 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ ,达到99%信度检验,强的趋势主要是由于1990年代后期以来的异常减少造成的,最近10年冷日的平均值为21.5 d,比1960年代的10年平均值少一倍多。由表2得,参与统计的三个台站均为减少趋势,临汾站和运城站通过99%的信度检验,其下降速率为 $6.0 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 、 $7.2 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ ,隰县站通过95%的信度检验,其下降速率为 $2.5 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 。

从图1b得,极端最低气温以 $0.36^\circ\text{C} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 的趋势在增加。从年代际变化来看,极端最低气温呈波动式增加,以1960年代为基期,1980年代极端最低气温增加的幅度比其余的三个年代增加幅度略大。临汾站和运城站的极端最低气温呈增加趋势,分别为 $1.05^\circ\text{C} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 和 $0.64^\circ\text{C} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ ,且均通过99%的信度检验,隰县站的呈减少趋势,速率为 $0.15^\circ\text{C} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ ,但未通过显著性检验(表2)。

图1d、图1e和图1f为山西南部暖日、暖夜和极端最高气温的时间序列。从图1d得出,山西南部暖日以 $9.4 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 的速率增加,且通过99%的信度检验。山西南部暖日的增加趋势主要是由

1990年代的暖日异常增加造成的,最近10年的暖日平均值为70.0 d,比1960年代10年平均值的37.5 d高出近一倍。统计的三个台站的暖日均为增加趋势,且均通过99%的信度检验(表2)。

从图1e得出,山西南部的暖夜呈增加趋势,变率为 $9.2 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ ,且通过99%的信度检验。从年代际变化来看,暖夜基本呈阶梯式增加趋势,在1960年代至1980年代变化较为稳定和缓慢,到1990年代迅速增加,进入21世纪后,仍然持续快速增加,最近10年的平均值为72.4 d,比1960年代的高出一倍多。由表2得出,参与统计的三个台站除运城站呈极显著的增加趋势(通过99%的信度检验)外,其余两个站均呈下降趋势,临汾站的通过99%的信度检验,隰县站的通过95%的信度检验。

从图1f得出,山西南部的极端最高气温以 $0.36^\circ\text{C} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 的速率增加。从年代际变化来看,极端最高气温在1970年代和1980年代呈微弱的下降趋势,进入1990年代后呈增加趋势,这与马柱国等(2003)的研究结果一致。由表2得出,参与统计的三个台站的极端最高气温均呈增加趋势,但仅隰县站通过显著性检验,其余两个站均未通过显著性检验。

总之,山西南部1961—2010年冷日和冷夜为减少趋势,暖日和暖夜为增加趋势,这与前人(翟盘茂和潘晓华,2003;游庆龙等,2009;You et al, 2011)分别对中国北方1951—1999年以及中国和全球1961—2003年极端气温变化研究的结论一致,但山西南部冷日、冷夜、暖日和暖夜的变率比中国北方、中国和全球的大很多,且冷日和冷夜的变率比暖日和暖夜的变率小;山西南部的极端最高气温和极端最低气温都以 $0.36^\circ\text{C} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 的速率增加,这与马柱国等(2003)对中国北方极端温度变化的研究不太一致,马柱国等研究的中国北方极端最高温度和极端最低温度虽然都为增加趋势,但极端最低气温的变率明显大于极端最高气温的变率,其原因需要进一步的研究。

表2 1961—2010年山西南部各站极端气温变化趋势

Table 2 Spatial distribution of temperature indices in southern Shanxi Province from 1961 to 2010

站名	冷日 ( $\text{d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ )	冷夜 ( $\text{d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ )	极端最低气温 ( $^\circ\text{C} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ )	暖日 ( $\text{d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ )	暖夜 ( $\text{d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ )	极端最高气温 ( $^\circ\text{C} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ )
临汾	-1.9	<b>-6.0</b>	<b>1.05</b>	<b>5.6</b>	<b>-10.3</b>	0.16
隰县	<b>-5.7</b>	-2.5	-0.15	<b>16.5</b>	-2.4	<b>0.78</b>
运城	-1.7	<b>-7.2</b>	<b>0.64</b>	<b>5.2</b>	<b>7.7</b>	0.22

注:粗体表示通过99%的信度检验,斜体表示通过95%的信度检验

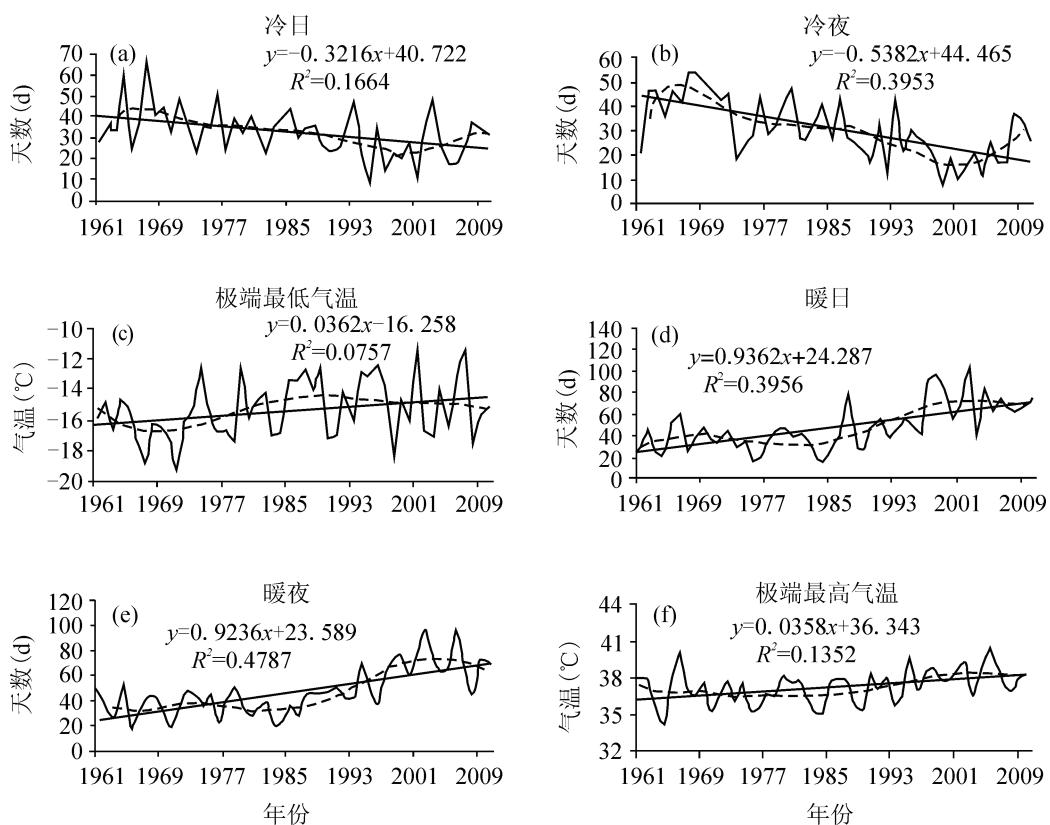


图1 山西南部196—2010年极端温度事件的变化

Fig. 1 Change of extreme temperature events in southern Shanxi Province from 1961 to 2010

## 2.2 突变分析

图2表示1961—2010年山西南部极端温度事件M-K突变检验结果,用于分析极端温度事件的突变。冷日的UF和UB线交于信度线之间,交点为1982年,表明山西南部冷日于1982年发生了由多到少的突变,这是突变的开始。UF曲线在1995年低于了-1.96的信度线,表明减少趋势在1995年后更加显著。冷夜在1982年发生由多到少的突变,且在1987年以后减少更加显著。极端最低气温的上升突变发生在1979年,但总体的上升比较缓慢。暖日和暖夜都在1993年发生由少到多的突变,且都在1999年以后上升更加显著。极端最高气温的上升突变发生在1995年,且在2004年以后上升更为显著。总之,山西南部极端温度事件各指标都发生了突变,突变年份多集中在1980年代和1990年代,且除极端最低气温变化趋势较为平缓外,其余的基本都在1990年代末有较为显著的变化。

## 2.3 周期分析

图3为山西南部1961—2010年极端温度事件的Morlet复小波变换图,图中实线表示偏多或偏暖,虚线表示偏少或偏冷。从图3a可见,冷日存在

5 yr、18 yr 和 29 yr 左右的准周期。29 yr 左右的振荡周期为主要控制周期,贯穿始终,冷日的变化过程为偏多-偏少-偏多。17 yr 左右的周期也很显著,经历了偏多-偏少-偏多-偏少-偏多的交替变化。5 yr 左右的周期振荡并不是很明显。

从图3b可见,冷夜存在 5 yr、14 yr、19 yr 和 32 yr 左右的振荡周期。5 yr 左右的周期振荡不明显,在 20 世纪 80 年代逐渐消失。14 yr 左右的振荡周期自 1970 年代中期持续到 21 世纪初期。19 yr 左右的振荡周期自 1980 年代持续到 20 世纪末,32 yr 左右的振荡周期贯穿始终,经历偏多-偏少-偏多的交替变化。

从图3c 和 图3f 得出,极端最低气温和极端最高气温都存在 19 yr 和 27 yr 左右的振荡周期,极端最低气温和极端最高气温的主控周期都为 27 yr 左右的振荡周期,且贯穿始终,在 27 yr 左右的振荡周期上,前者为偏冷-偏暖-偏冷的交替变化,而后者相反。极端最低气温和极端最高气温的 19 yr 左右的周期自 20 世纪 60 年代末持续到 21 世纪初,前者经历了偏暖-偏冷-偏暖的变化,后者相反。

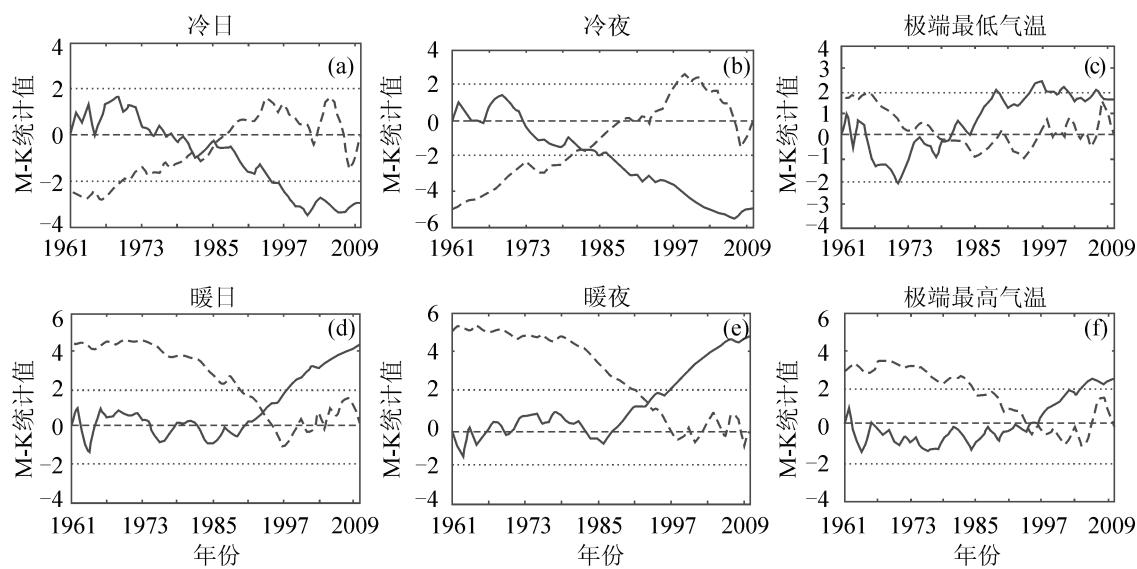


图2 山西南部1961—2010年极端温度事件的突变检验  
实曲线为UF;虚曲线为UB;直线为0.05显著性水平

Fig. 2 Abrupt change of extreme temperature events in southern Shanxi Province from 1961 to 2010

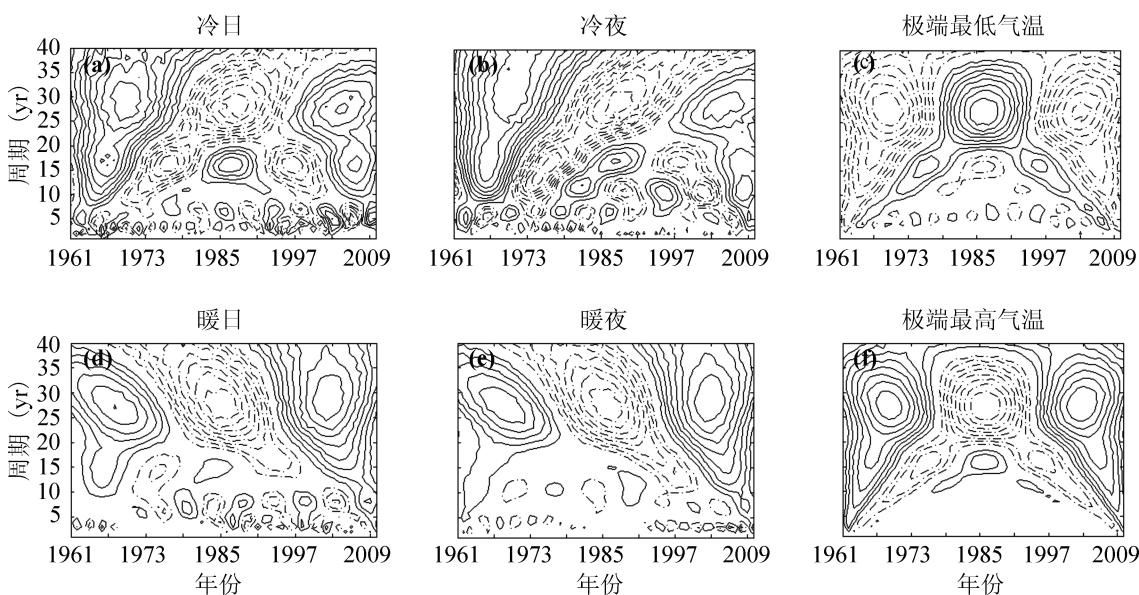


图3 山西南部极端温度事件的变化周期  
Fig. 3 The period of extreme temperature events in southern Shanxi Province

从图3d和图3e得出,暖日和暖夜都存在28 yr左右的主控振荡周期,且两者都经历了偏多-偏少-偏多的变化。此外,暖日存在不明显的8 yr左右的振荡周期,暖夜存在不明显的3 yr和10 yr左右的振荡周期。

由此得出,山西南部极端气温事件普遍存在30 yr左右的主控周期,冷日、冷夜、极端最高气温和极端最低气温还存在19 yr左右的振荡周期,冷日、冷夜、暖日和暖夜都存在更小尺度的振荡周期。

### 3 结论

综合以上分析,可得出如下结论:

(1) 线性趋势分析发现,山西南部1961—2010年冷日和冷夜为减少趋势,分别为 $3.2 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 和 $5.4 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 。暖日和暖夜为增加趋势,分别为 $9.4 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 和 $9.2 \text{ d} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 。

(2) 山西南部的极端最高气温和极端最低气温都以 $0.36^\circ\text{C} \cdot (10\text{yr})^{-1}$ 的速率增加。

(3) 从 M-K 突变检验来看, 极端气温事件的各指标均发生了突变, 且突变的时间不同, 突变多集中在 1980 年代和 1990 年代。

(4) 通过小波分析可以看到, 山西南部极端气温事件的各指标普遍存在 30 yr 左右的主控周期, 冷日、冷夜、极端最高气温和极端最低气温还存在 19 yr 左右的振荡周期, 冷日、冷夜、暖日和暖夜都存在更小尺度的振荡周期。

### 参考文献:

- 刘学华, 季致建, 吴洪宝, 等. 2006. 中国近 40 年极端气温和降水的分布特征及年代际差异 [J]. *热带气象学报*, 22(6): 618-624.
- 马柱国, 符淙斌, 任小波, 等. 2003. 中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系 [J]. *地理学报*, 58(增刊): 11-20.
- 任福民, 翟盘茂. 1998. 1951—1990 年中国极端气温变化研究 [J]. *大气科学*, 22(2): 217-227.
- 任朝霞, 杨达源. 2007. 近 40a 西北干旱区极端气候变化趋势研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 21(4): 10-13.
- 施能. 2002. 气象科研与预报中的多元分析方法 [M]. 北京: 气象出版社, 143-154.
- 唐红玉, 翟盘茂, 王振宇. 2005. 1951-2002 年中国平均最高、最低气温及日较差变化 [J]. *气候与环境研究*, 10(4): 728-735.
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [J]. 北京: 气象出版社, 64-66.
- 游庆龙, 康世昌, 同宇平, 等. 2009. 近 45 年雅鲁藏布江流域极端气候事件变化趋势分析 [J]. *地理学报*, 64(5): 592-600.
- 翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. *地理学报*, 58(增刊): 1-10.
- 翟盘茂, 任福民. 1997. 中国近四十年最高最低温度变化 [J]. *气象学报*, 55(4): 418-429.
- Aguilar E, Peterson T C, Obando P R, et al. 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961—2003 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 110, D23107, doi: 10.1029/2005JD006119.
- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 111, D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.
- Heino R, Brázdil H R, Førland E, et al. 1999. Progress in the study of climatic extremes in northern and central Europe [J]. *Climatic Change*, 42: 151-181.
- Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. 2001. IPCC, Climate change 2001: The scientific basis [C] // Observed Climate Variability and Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis [C] // Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jones P D, Horton E B, Folland C K, et al. 1999. The use of indices to identify changes in climatic extremes [J]. *Climatic Change*, 42(1): 131-149.
- Karl T R, Knight R W, Easterling D R, et al. 1996. Indices of climate change for the United States [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(2): 279-292.
- Klein Tank A M G, Peterson T C, Qadir D A, et al. 2006. Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and south Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 111, D16105, doi: 10.1029/2005JD006316.
- Peterson T C. 2005. Climate Change Indices. WMO Bulletin, 54 (2): 83-86.
- Plummer N, Salinger M J, Nicholls N, et al. Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth century [J]. *Climatic Change*, 42(1): 183-202.
- You Q, Kang S, Aguilar E, et al. 2011. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003 [J]. *Climate Dynamics*, 36(11): 2399-2417.
- Zhang X, Hegerl G, Zwiers F W, et al. 2005. Avoiding inhomogeneity in percentile based indices of temperature extremes [J]. *Journal of Climate*, 18(11): 1641-1651.