

# 1961—2016 年黑龙江省极端气温事件变化特征

尹明丽<sup>1</sup>, 徐华君<sup>1</sup>, 赵国永<sup>2</sup>, 韩艳<sup>2</sup>

(1.新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2.信阳师范学院 地理科学学院, 河南 信阳 464000)

**摘要:**为了分析黑龙江地区对全球变暖的响应,运用 Mann-Kendall 检验、Morlet 复小波分析以及反距离加权插值法,研究了 1961—2016 年黑龙江省 27 个气象站的 16 个极端气温指数变化特征。结果表明:(1)近 56 年,黑龙江省极端气温指数呈显著暖化趋势,且与日最低气温相关指数暖化趋势最显著(TN<sub>10p</sub>, FD<sub>0</sub>和 TN<sub>90p</sub>);27 个站点极端气温指数均呈暖化趋势,说明黑龙江省极端气温指数在时间和空间上均呈暖化趋势。其中,暖化趋势最为显著的是漠河、孙吴等地;(2)大部分指数约 1980s 中后期—1990s 中期发生暖化突变。(3)日最低温均值大约存在 5~6 a, 8~10 a, 13~15 a, 18~25 a 共 4 个尺度的周期变化,其中主周期为 20 a;日最高温均值大约存在 4~8 a, 13~18 a, 25~30 a 共 3 个尺度的周期变化,经历了高一低—高一低等 7 个循环交替,说明未来 2~3 a 日最高温均值继续增加。(4)相对指数与纬度的相关性普遍较高;绝对指数和其他指数与纬度的相关性不明显;极值指数中 TX<sub>x</sub> 与纬度的相关性较高;所有指数与经度和海拔高度的相关性不显著。

**关键词:**黑龙江省;极端气温;突变

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0238-08

## Characteristics of Extreme Temperature Events in Heilongjiang Province in the Period 1961—2016

YIN Mingli<sup>1</sup>, XU HuaJun<sup>1</sup>, ZHAO Guoyong<sup>2</sup>, HAN Yan<sup>2</sup>

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2.College of Geography, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China)

**Abstract:**In order to analyze the response of Heilongjiang Province to global warming, the variation characteristics of 16 extreme temperature indexes of 27 meteorological stations in Heilongjiang Province from 1961 to 2016 were analyzed by employing Mann-Kendall test, Morlet complex wavelet analysis and inverse distance weighted interpolation. The results showed that: (1) the extreme temperature index in Heilongjiang Province presented the significant warming trend in recent 56 years, and the index related to the daily minimum temperature showed the most significant warming trend (TN<sub>10p</sub>, FD<sub>0</sub> and TN<sub>90p</sub>); in terms of space, the extreme temperature indexes of 27 stations in Heilongjiang Province showed the warming trend in recent 56 years, indicating that the extreme temperature indexes of Heilongjiang Province showed a warming trend in time and space, among them, the most significant warming trend was found in Mohe City, Sunwu County and other places; (2) most indices showed the sudden warming in the mid-to-late 1980s and mid-1990s; (3) the mean value of the daily lowest temperature varied in four scales: 5~6 years, 8~10 years, 13~15 years and 18~25 years, among which the main period is 20 years. The mean value of the daily maximum temperature was about 4~8 years, 13~18 years and 25~30 years, and experienced 7 cycles of high-low-high-low pattern, indicating that the mean value of the daily maximum temperature continued to increase in the future 2~3 years; (4) the correlation between the relative index and latitude was generally high; the correlation between absolute index and other index and latitude was not obvious; in the extreme value index, TX<sub>x</sub> had a higher correlation with latitude; the correlations between all the indices and longitude or altitude was not significant.

**Keywords:** Heilongjiang Province; extreme temperature; mutation

收稿日期:2019-02-26

修回日期:2019-05-05

资助项目:国家自然科学基金“近百年来不同时代吐鲁番坎儿井与灌区聚落关系的文化地理研究”(41961024)

第一作者:尹明丽(1996—),女,河南杞县人,硕士研究生,研究方向为资源与环境。E-mail:861252112@qq.com

通信作者:徐华君(1962—),男,上海人,博士,副教授,主要从事环境与资源研究。E-mail:hjj\_xu@qq.com

近年来,全球变暖及其伴随的极端天气和气候事件引起了人们的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。20 世纪 60—90 年代,亚洲和中国大部分地区的气温持续上升。20 世纪 80 年代以来,东北地区低温冷害发生的频率明显减少<sup>[4]</sup>。特别是 20 世纪 90 年代以后,世界进入了百年来最热的时期<sup>[5]</sup>。中国极端最低气温的变化在春季和秋季是最大的,而在北方则更为明显<sup>[6]</sup>。自 20 世纪 90 年代后期以来,冬季极端低温频率的变化是渐进的<sup>[7]</sup>。极端温度是反映一个地区冷暖的一项重要指标<sup>[8]</sup>,极端气温的变化可能会影响该国部分地区的气候<sup>[9-10]</sup>。

黑龙江省位于中国东北部,地理坐标为北纬  $43^{\circ}26' - 53^{\circ}33'$ ,东经  $121^{\circ}11' - 135^{\circ}05'$ ,属于温带大陆性气候。与其他地区相比,黑龙江省极端气温研究相对较低。近几十年来我国极端温度事件也表现出区域性特征,而且东北地区作为对极端高温事件和极端低温事件高度敏感的地区之一,更应该引起注意<sup>[11-18]</sup>。目前,国内外学者对极端温度事件已有较多的研究。刘丹等<sup>[19]</sup>对哈尔滨地区极端气温进行研究得出哈尔滨平均气温的升温幅度高于全国平均升温值;周晓宇等<sup>[20]</sup>研究得出东北地区年极端最高(最低)气温呈下降(升温)趋势,极端高温(低温)日数呈增加(减少)趋势;严晓瑜等<sup>[21]</sup>研究得出东北大部分地区年极端最高气温和年极端最低气温均呈升高趋势,且后者比前者显著;朱红蕊等<sup>[22]</sup>得出空间分布方面,极端气温指数在全区基本都呈一致的增大或减小分布。然而,这些研究主要集中在极端温度频率和强度的变化上,而且关于温度的综合研究很少,特别是关于黑龙江省与气候变暖极端气候事件的时空特征研究还鲜有报道。已有的研究时间跨度不大,本文的研究相比之前的研究时间跨度大,可以充分反映黑龙江省极端气候的变化。本文研究结果,有助于黑龙江省在应对极端气候事件方面制定切实可行的措施,减少不必要的损失。黑龙江省 27 个站点、经纬度以及高程信息如图 1 所示。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据处理

本研究数据来自中国气象科学数据共享服务网。选取 1961 年 1 月 1 日—2016 年 12 月 31 日逐日记录完整观测站,剔除缺失数据站点,最终选择 27 个站点。研究数据包括逐日最高气温、最低气温和平均气温,并进行一系列严格质量控制。然后,运用 R 编辑器和 RCLim-Dex 软件进一步质量控制(消除错误值,异常值等)。

### 1.2 极端温度指数概念

本研究使用由 WMO-CCL 和 CLIV 气候变化检测,监测和指标专家组(ETCCDMI)确定的指数系统定义和

计算极端温度指数<sup>[23]</sup>。本文选取的温度指数包括相对指数、绝对指数、极值指数和其他指数,这些温度指数都是与最高温和最低温相关的指数(表 1)<sup>[24]</sup>,这些极端气温指数都是基于数学统计并能很好反映极端温度的变化,这些指数都是采用阈值指标来度量的(反映季节或年内最大、最小值的极值指数除外)。超过阈值指标的极值被认为是极值,该事件称为极端事件<sup>[25]</sup>。

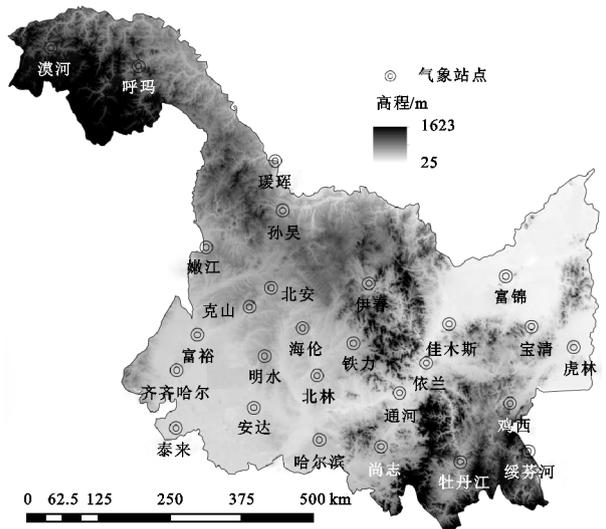


图 1 1961—2016 年黑龙江省各站点及高程分布

### 1.3 研究方法

本文主要运用 Mann-Kendall 检验、Morlet 复小波分析以及反距离加权插值法来分析黑龙江省极端气温变化趋势。Mann-Kendall 检验是常用的一种揭示时间序列变化的非参数检验,对于非正态分布数据,有更好的适用性,并能很好揭示时间序列趋势变化<sup>[26-27]</sup>。黑龙江极端气温指数的变化周期是采用 Morlet 复小波分析来确定的,小波方差变化图(小波方差随尺度变化的过程)能反映气象要素时间序列中包含的各种周期的波动及其强弱随尺度变化的特性,可以通过小波方差变化图找出一个时间序列中起主要作用的尺度(周期)<sup>[28]</sup>。同时,在 ArcGIS 10.0 环境下,利用反距离加权插值法绘制了黑龙江省极端温度指数和显著性检验空间分布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 时间变化特征

1961—2016 年黑龙江省 27 个站点相对指数中,2 个指数( $TX_{10p}$  和  $TN_{10p}$ )呈降低趋势,2 个指数( $TX_{90p}$  和  $TN_{90p}$ )呈升高趋势;绝对指数中,2 个指数( $ID_0$  和  $FD_0$ )呈降低趋势。2 个指数( $SU_{25}$  和  $TR_{20}$ )呈升高趋势;所有极值指数均呈升高趋势;其他指数除了 DTR 外,所有指数均呈升高趋势。

其中, $FD_0$ ,  $TN_{10p}$  和  $TN_{90p}$  两个指数的变化趋势最显

著,变化的速率分别为 3.18,3.8,3.53 d/10 a;13 个指数 (TX<sub>10p</sub>, TN<sub>10p</sub>, FD<sub>0</sub>, TN<sub>n</sub>, T<sub>minmean</sub>, DTR, TX<sub>90p</sub>, TN<sub>90p</sub>,

SU<sub>25</sub>, TR<sub>20</sub>, TN<sub>x</sub>, T<sub>maxmean</sub> 和 GSL)通过了  $\alpha=0.05$  显著性检验(表 2),表明极端气温指数有明显的升温趋势。

表 1 极端气温指数定义<sup>[21]</sup>

分类	缩写	极端气温指数	定义	单位
相对指数	TX <sub>10p</sub>	冷昼天数	日最高温<10%分位值天数	d
	TN <sub>10p</sub>	冷夜天数	日最低温<10%分位值天数	d
	TX <sub>90p</sub>	暖昼天数	日最高温>90%分位值天数	d
	TN <sub>90p</sub>	暖夜天数	日最低温>90%分位值天数	d
绝对指数	ID <sub>0</sub>	冰冻天数	年日最高温<0℃天数	d
	FD <sub>0</sub>	霜冻天数	年日最低温<0℃天数	d
	SU <sub>25</sub>	夏季天数	年日最高温>25℃天数	d
	TR <sub>20</sub>	热夜天数	年日最低温>25℃天数	d
极值指数	TX <sub>x</sub>	日最高温最大值	年内日最高温的极大值	℃
	TX <sub>n</sub>	日最高温最小值	年内日最高温的极小值	℃
	TN <sub>x</sub>	日最低温最大值	年内日最低温的极大值	℃
	TN <sub>n</sub>	日最低温最小值	年内日最低温的极小值	℃
其他指数	T <sub>maxmean</sub>	日最高温平均值	最高温年/月平均值	℃
	T <sub>minmean</sub>	日最低温平均值	最低温年/月平均值	℃
	DTR	平均气温日较差	年日最高温与日最低温差值平均	℃
	GSL	生物生长季	年日均温首次连续 6 d>5℃日数	d

表 2 1961—2016 年黑龙江省极端气温指数变化趋势及显著性检验

分类	指数	倾向率/(d/10 a)	Z 值	分类	指数	倾向率/(℃/10 a)	Z 值
相对指数	TX <sub>10p</sub>	-1.75	-3.06**	极值指数	TX <sub>x</sub>	0.10	1.17
	TN <sub>10p</sub>	-3.80	-5.56***		TX <sub>n</sub>	0.32	1.53
	TX <sub>90p</sub>	1.49	2.68**		TN <sub>x</sub>	0.30	3.31***
	TN <sub>90p</sub>	3.53	6.81***		TN <sub>n</sub>	0.53	2.72**
绝对指数	ID <sub>0</sub>	-0.99	-1.42	其他指数	T <sub>maxmean</sub>	0.18	2.47*
	FD <sub>0</sub>	-3.18	-5.17***		T <sub>minmean</sub>	0.47	5.63***
	SU <sub>25</sub>	2.74	3.36***		DTR	-0.28	-5.70***
	TR <sub>20</sub>	1.35	4.18***		GSL	2.59	3.35***

注:\*,\*\*,\*\*\* 分别表示通过  $\alpha=0.05$ ,  $\alpha=0.01$  和  $\alpha=0.001$  显著性检验,下表同。

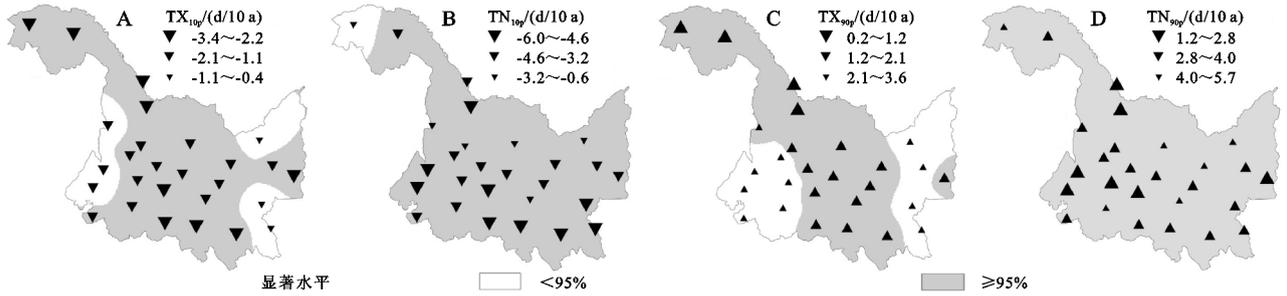
综上所述,近 56 a 黑龙江省极端气温指数呈显著暖化趋势,且与日最低气温相关指数暖化趋势最显著(TN<sub>10p</sub>, FD<sub>0</sub> 和 TN<sub>90p</sub>)。

## 2.2 空间变化特征

2.2.1 相对指数 近 56 a 黑龙江 27 个站点的冷昼天数(TX<sub>10p</sub>)各站均呈减少趋势,减少幅度为 0.4~3.4 d/10 a,瑛珲减幅最大(3.4 d/10 a),绥芬河减幅最小;通过  $\alpha=0.05$  显著性检验的地区主要分布在黑龙江省西北部以及中部大部分地区(图 2A)。冷夜天数(TN<sub>10p</sub>)各站均呈减少趋势,减少幅度为 0.6~6.0 d/10 a,孙吴减幅最大(6.0 d/10 a),漠河减幅最小;除漠河站点外其余站点均通过了  $\alpha=0.05$  的显著性检验(图 2B)。暖昼天数(TX<sub>90p</sub>)各站点均呈增加趋势,增加幅度为 0.2~3.6 d/10 a,漠河增幅最大(3.6 d/10 a),绥芬河增幅最小(0.2 d/10 a);59.3% 站点通过  $\alpha=0.05$  显著性检验(图 2C)。暖夜天数(TN<sub>90p</sub>)各站点均呈增加趋势,增加幅度为 1.2~5.7 d/10 a,

孙吴增幅最大(5.7 d/10 a),漠河增幅最小;所有站点均通过了  $\alpha=0.05$  显著性检验(图 2D)。

2.2.2 绝对指数 就冰冻天数(ID<sub>0</sub>)而言,各站均呈减少趋势,减少幅度为 0~2.2 d/10 a,呼玛减幅最大(2.2 d/10 a),富锦、绥芬河、铁力减幅最小;11.1% 站点通过了  $\alpha=0.05$  显著性检验。(图 3A)。霜冻天数(FD<sub>0</sub>)变化幅度为 -6.7~0.6 d/10 a,漠河变幅为正值,其余变幅均为负值,孙吴减幅最大(6.7 d/10 a),漠河增幅最大;除漠河站外其余站点。均通过了  $\alpha=0.05$  显著性检验(图 3B)。夏季天数(SU<sub>25</sub>)各站均呈增加趋势,增加幅度为 0.3~4.6 d/10 a,呼玛增幅最大(4.6 d/10 a),绥芬河增幅最小;除鸡西和绥芬河外,所有站点均通过了  $\alpha=0.05$  显著性检验(图 3C)。热夜天数(TR<sub>20</sub>)各站均呈增加趋势,增加幅度为 0~4.0 d/10 a,齐齐哈尔的增幅最大(4.0 d/10 a),漠河、绥芬河、伊春增幅最小;88.9% 站点通过了  $\alpha=0.05$  显著性检验(图 3D)。



注:阴影区域表示通过  $\alpha=0.05$  变化趋势的显著性检验,下同。

图 2 1961—2016 年黑龙江省极端气温相对指数变化趋势及显著性检验空间变化

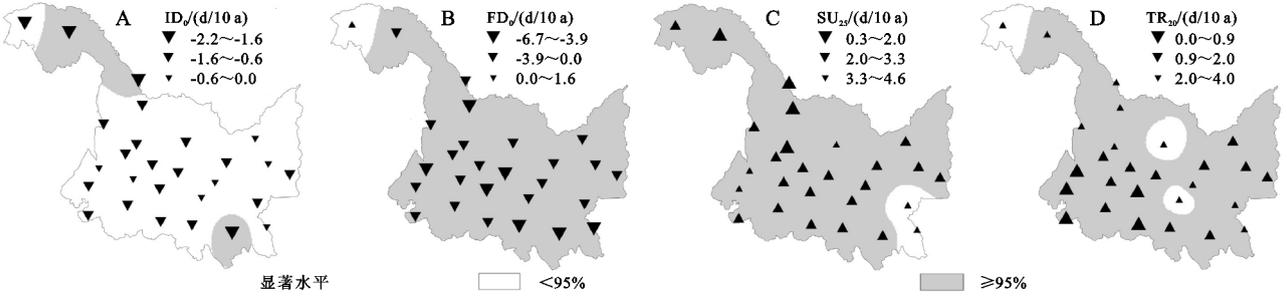


图 3 1961—2016 年黑龙江省极端气温绝对指数变化趋势及显著性检验空间变化

2.2.3 极值指数 近 56 a 日最高温最大值( $T_{x_{max}}$ )变化幅度为  $-0.1 \sim 0.5$  d/10 a, 3 个站点变幅为负值, 24 个站点变幅为正值, 嫩江增幅最大(0.5 d/10 a), 漠河减幅最大(0.1 d/10 a); 14.8% 站点通过了  $\alpha=0.05$  显著性检验(图 4A)。日最高温最小值( $T_{x_{min}}$ )各站均呈增加趋势, 增加幅度为  $0.1 \sim 1.3$  °C/10 a, 漠河增幅最大(1.3 °C/10 a), 铁力增幅最小(图 4B)。日最低温最

大值( $T_{n_{max}}$ )各站均呈增加趋势, 增加幅度为  $0 \sim 0.7$  d/10 a, 孙吴增幅最大(0.7 d/10 a), 漠河、通河增加幅度最小; 62.9% 站点通过  $\alpha=0.05$  显著性检验(图 4C)。日最低温最小值( $T_{n_{min}}$ )各站点均呈升高趋势, 增加幅度为  $0.1 \sim 1.4$  °C/10 a, 孙吴增幅最大(1.4 °C/10 a), 富锦增幅最小; 62.9% 的站点通过  $\alpha=0.05$  显著性检验(图 4D)。

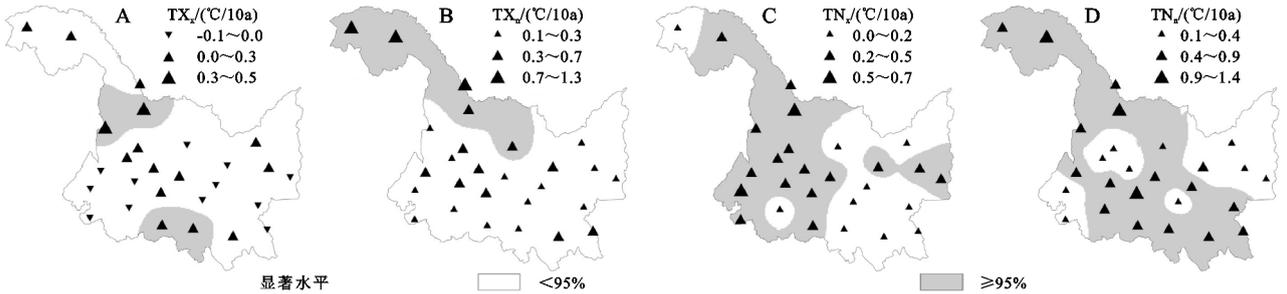


图 4 1961—2016 年黑龙江省极端气温极值指数变化趋势及显著性检验空间变化

2.2.4 其他指数 日最高温平均值( $T_{maxmean}$ )增加幅度为  $0 \sim 0.5$  d/10 a, 漠河增幅最大(0.5 d/10 a), 绥芬河增幅最小; 70.4% 站点通过了  $\alpha=0.05$  显著性检验(图 5A)。日最低温平均值( $T_{minmean}$ )增加幅度为  $0.1 \sim 1.0$  °C/10 a, 孙吴增幅最大(1.0 °C/10 a), 漠河增幅最小; 除漠河站外其余站点均通过了  $\alpha=0.05$  显著性检验(图 5B)。平均气温日较差(DTR)变化幅度为  $-0.7 \sim 0.3$  °C/10 a, 漠河变幅为正值, 其余站点变幅为负值, 孙吴减幅最大(0.7 °C/10 a), 漠河增幅最大(0.3 °C/10 a); 96.3% 站点通过  $\alpha=0.05$  显著性检验(图 5C)。生物生长季(GSL)增加幅度为  $0.8 \sim 3.9$  d/10 a, 牡丹江增幅最大(3.9 d/10 a), 虎林增幅最小; 88.9% 站点通过了  $\alpha=0.05$  显著性检验(图 5D)。

综上所述, 冷昼天数( $T_{x_{10p}}$ )、冷夜天数( $T_{n_{10p}}$ )、冰冻天数( $ID_0$ )各站点均呈减少趋势; 暖昼天数( $T_{x_{90p}}$ )、暖夜天数( $T_{n_{90p}}$ )、夏季天数( $SU_{25}$ )、热夜天数( $TR_{20}$ )、日最高温最小值( $T_{x_{min}}$ )、日最低温最大值( $T_{n_{max}}$ )、日最低温最小值( $T_{n_{min}}$ )、日最高温平均值( $T_{maxmean}$ )、日最低温平均值( $T_{minmean}$ )、生物生长季(GSL)各站点均呈增加趋势。表明在空间分布方面, 近 56 a 黑龙江 27 个站点极端气温指数均呈暖化趋势, 其中, 暖化趋势最为显著的是漠河、孙吴等地。

在世界变暖这个大背景下, 全国各地都表现不同程度的暖化, 另外, 黑龙江是国家重要的能源工业基地, 是主要的煤炭调出省之一, 而黑龙江相比于全国来说温度相对较低, 冬季人们大量烧煤取暖, 产生温

室气体,使得气温变得温暖。黑龙江省林业发达,但最近这些年树木数目呈下降趋势,同样加剧了气候变

暖。黑龙江省森林面积减少同样导致全年日最高气温最高(低)值下降、最低气温最高值上升<sup>[29]</sup>。

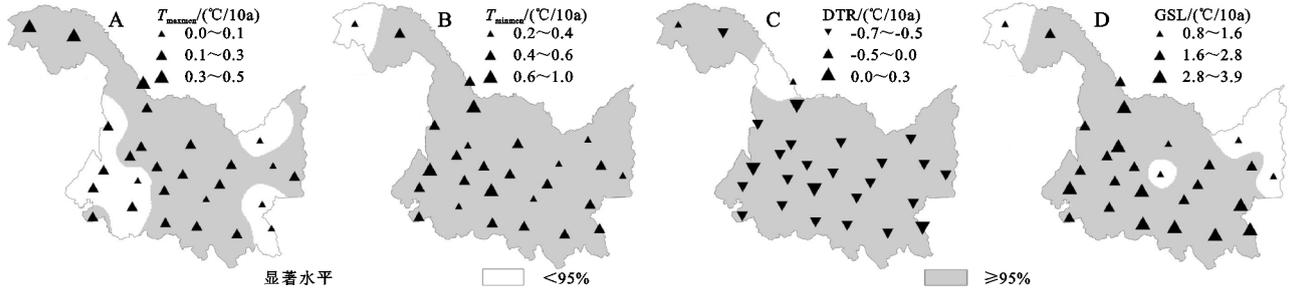


图 5 1961—2016 年黑龙江省极端气温其他指数变化趋势及显著性检验空间变化

### 2.3 突变分析

如图 6 所示,由 Mann-Kendall 突变检验可知,4 个相对指数中,2 个指数( $TX_{10p}$ ,  $TN_{10p}$ )分别在 1992 年、1986 年发生减少突变,  $TN_{90p}$  不存在突变点,  $TX_{90p}$  于 1987 年发生增加突变;对绝对指数而言,  $ID_0$  不存在突变点,  $FD_0$  在 1988 年发生减少突变,  $SU_{25}$ ,  $TR_{20}$  分别于 1997 年、1994 年发生增

加突变;4 个极值指数变化不大,2 个指数( $TX_x$ ,  $TX_n$ )不存在突变点,2 个指数( $TN_x$ ,  $TN_n$ )分别在 1976 年、1981 年发生增加突变;其他指数中,3 个指数( $T_{maxmean}$ ,  $T_{minmean}$  和  $GSL$ )分别于 1988 年、1985 年、1987 年发生增加突变,  $DTR$  在 1986 年发生减少突变。综上所述,大部分指数约在 1980s 中后期至 1990s 中期发生暖化突变。

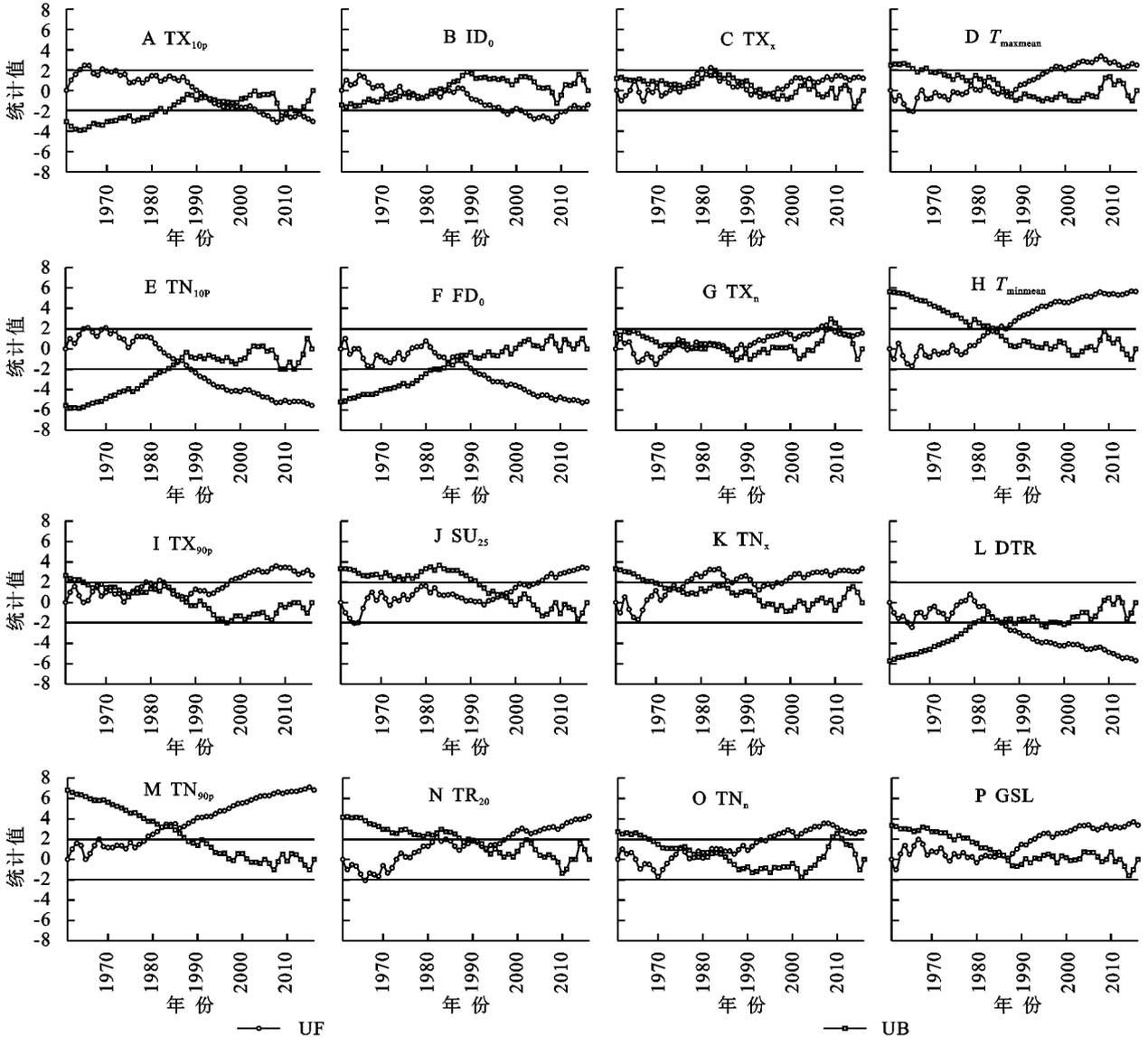


图 6 1961—2016 年黑龙江省极端气温指数突变检验

### 2.4 极端气温小波分析

小波分析能够较好地揭示地学中时间序列降水和气温多种变化周期以及不同时间尺度中的变化趋势<sup>[30]</sup>。关于小波分析方法的介绍详见文献<sup>[26,31—32]</sup>。利用 MATLAB 对黑龙江省极端最高气温(日最高温平均值)和极端最低气温(日最低温平均值)进行了小波分析。从图 7A 可以看出,  $T_{\max\text{mean}}$  大约存在 4~8 a, 13~18 a,

25~30 a 共 3 个尺度的周期变化, 25~30 a 震荡周期最为显著, 其中主周期为 27 a, 日最高温平均值经历了高一低—高一低等 7 个循环交替, 说明未来 2~3 a 日最高温平均值继续增加。  $T_{\min\text{mean}}$  大约存在 5~6 a, 8~10 a, 13~15 a, 18~25 a 共 4 个尺度的周期变化, 18~25 a 震荡周期最为显著, 其中主周期为 20 a, 日最低温平均值经历了高一低—高一低等 9 个循环交替。

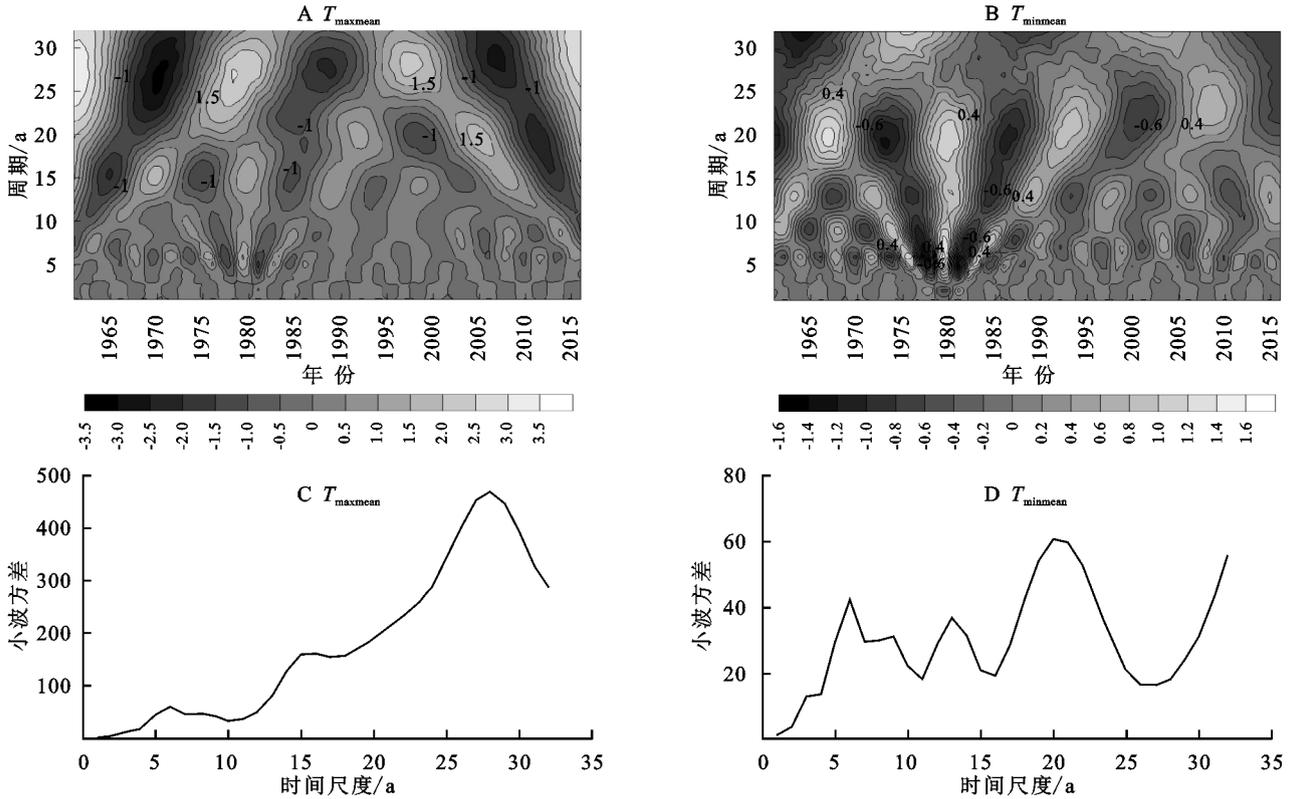


图 7 1961—2016 年黑龙江省极端气温指数的小波分析

### 2.5 极端气温指数变化趋势与海拔高度、经纬度的关系

根据各项极端气温指数变化趋势与地理参数的线性相关分析来看(表 3), 相对指数与纬度的相关性普遍较高; 绝对指数和其他指数与纬度的相关性不明

显; 极值指数中  $TX_x$  与纬度的相关性较高。可能是由于黑龙江省跨纬度比较大所致。所有指数与经度和海拔高度的相关性不显著。另外, 所有相对指数与极值指数中的  $TX_x$  与纬度的相关性通过  $\alpha=0.05$  显著性检验。指数与指数之间的相关关系见表 4。

表 3 黑龙江各项极端气温指数变化趋势与地理位置的相关系数

分类	地理参数	经度	纬度	海拔高度	分类	地理参数	经度	纬度	海拔高度
相对指数	$TX_{10P}$	-0.093	0.408 *	-0.063	极值指数	$TX_x$	-0.144	0.401 *	-0.053
	$TN_{10P}$	-0.124	0.407 *	-0.060		$TX_n$	0.268	0.031	-0.047
	$TX_{90P}$	-0.064	0.412 *	-0.105		$TN_x$	0.152	0.258	-0.025
	$TN_{90P}$	-0.028	0.416 *	-0.057		$TN_n$	0.019	0.148	0.125
绝对指数	$ID_0$	-0.356	0.132	0.040	其他指数	$T_{\max\text{mean}}$	0.282	0.089	-0.063
	$FD_0$	-0.081	-0.138	-0.104	$T_{\min\text{mean}}$	0.097	0.195	0.073	
	$SU_{25}$	0.241	0.068	0.063	DTR	0.133	-0.049	-0.238	
	$TR_{20}$	0.113	0.110	-0.118	GSL	0.231	0.020	0.020	

表 4 1961—2016 年黑龙江省极端气温指数之间相关关系矩阵

指数	TX <sub>10p</sub>	TN <sub>10p</sub>	TX <sub>90p</sub>	TN <sub>90p</sub>	ID <sub>0</sub>	FD <sub>0</sub>	SU <sub>25</sub>	TR <sub>20</sub>	TX <sub>x</sub>	TX <sub>n</sub>	TN <sub>x</sub>	TN <sub>n</sub>	T <sub>maxmean</sub>	T <sub>minmean</sub>	DTR	GSL
TX <sub>10p</sub>	1															
TN <sub>10p</sub>	0.785 **	1														
TX <sub>90p</sub>	-0.397 **	-0.325 *	1													
TN <sub>90p</sub>	-0.440 **	-0.646 **	0.743 **	1												
ID <sub>0</sub>	0.528 **	0.391 **	-0.631 **	-0.500 **	1											
FD <sub>0</sub>	0.542 **	0.720 **	0.494 **	-0.790 **	0.494 **	1										
SU <sub>25</sub>	-0.381 **	-0.298 *	0.519 **	0.485 **	-0.147	-0.267 *	1									
TR <sub>20</sub>	-0.336 *	-0.450 **	0.231	0.507 **	0.114	-0.332 *	0.572 **	1								
TX <sub>x</sub>	0.008	0.107	0.392 **	0.231	0.041	0.066	0.584 **	0.442 **	1							
TX <sub>n</sub>	-0.458 **	-0.419 **	0.305 *	0.328 *	-0.250	-0.263 *	0.011	0.133	0.036	1						
TN <sub>x</sub>	-0.182	-0.191	0.291 *	0.359 **	0.046	-0.151	0.420 **	0.736 **	0.622 **	0.310 *	1					
TN <sub>n</sub>	-0.423 **	-0.478 **	0.380 **	0.437 **	-0.226	-0.355 **	0.015	0.160	0.076	0.937 **	0.319 *	1				
T <sub>maxmean</sub>	-0.435 **	-0.302 *	0.648 **	0.462 **	-0.459 **	-0.316 *	0.345 **	0.208	0.486 **	0.592 **	0.557 **	0.607 **	1			
T <sub>minmean</sub>	-0.447 **	-0.567 **	0.565 **	0.684 **	-0.388 **	-0.535 **	0.356 **	0.398 **	0.394 **	0.609 **	0.615 **	0.675 **	0.885 **	1		
DTR	0.178	0.484 **	0.513	-0.281 *	0.014	0.392 **	0.043	-0.174	0.491 **	0.207	0.336 **	0.147	0.633 **	0.298 *	1	
GSL	-0.428 **	-0.469 **	0.501 **	0.614 **	-0.548 **	-0.796 **	0.108	0.079	-0.070	0.164	-0.026	0.247	0.365 **	0.440 **	-0.154	1

### 3 结论

(1) 变化趋势。时间方面,近 56 a 黑龙江省极端气温指数呈显著暖化趋势,且与日最低气温相关指数暖化趋势最显著(TN<sub>10p</sub>,FD<sub>0</sub>和 TN<sub>90p</sub>)。空间方面,近 56 a 黑龙江 27 个站点极端气温指数均呈暖化趋势,说明黑龙江省极端气温指数在时间和空间上均呈暖化趋势。其中,暖化趋势最为显著的是漠河、孙吴等地。

(2) 突变检验。根据 M-K 检验结果,大部分指数约在 1980s 中后期至 1990s 中期发生暖化突变。

(3) 小波分析。日最低温平均值大约存在 5~6 a,8~10 a,13~15 a,18~25 a 共 4 个尺度的周期变化,其中主周期为 20 a;日最高温平均值大约存在 4~8 a,13~18 a,25~30 a 共 3 个尺度的周期变化,经历了高一低—高一低等 7 个循环交替,说明未来 2~3 a 日最高温均值继续增加。

(4) 相对指数与纬度的相关性普遍较高;绝对指数和其他指数与纬度的相关性不明显;极值指数中 TX<sub>x</sub>与纬度的相关性较高;所有指数与经度和海拔高度的相关性不显著。

#### 参考文献:

- [1] Yan Z, Jones P D, Davies T D, et al. Trends of extreme temperatures in Europe and China based on daily observations[J]. *Climatic Change*, 2002,53(1/3):355-392.
- [2] Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment[J]. *Science*, 2006,314(5804):1442-1445.
- [3] Gong D Y, Pan Y Z, Wang J A. Changes in extreme daily mean temperatures in summer in eastern China

during 1955—2000[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004,77(1/2):25-37.

- [4] 廉毅,安刚.东亚季风 El Niño 与中国松辽平原夏季低温关系初探[J]. *气象学报*,1998,56(6):724-735.
- [5] IPCC. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report[R]. Cambridge, UK: Cam-Bridge University Press, 2007.
- [6] 任福民,翟盘茂.1951—1990 年中国极端气温变化分析[J]. *大气科学*,1998,22(2):217-226.
- [7] 王晓娟,龚志强,任福民,等.1960—2009 年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征[J]. *气候变化研究进展*, 2012,8(1):8-15.
- [8] 何卷雄,丁裕国,姜爱军,等.江苏冬夏极端气温与大气环流及海温场的遥相关[J]. *热带气象学报*,2002,18(1):73-82.
- [9] 杨金虎,江志红,魏锋,等.近 45 a 来中国西北年极端高、低温的变化及对区域性增暖的响应[J]. *干旱区地理*, 2006,29(5):625-631.
- [10] 王鹏祥,杨金虎.中国西北近 45 a 来极端高温事件及其对区域性增暖的响应[J]. *中国沙漠*,2007,27(4):649-655.
- [11] Easterling D R, Evans J L, Grosman P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000,81(3):417-425.
- [12] Bonsal B R, Zhang X B, Vincent L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperature over Canada[J]. *Journal of Climate*, 2001,14(14):1959-1976.
- [13] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P M, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century [J]. *Climate research*, 2002,19(3):193-212.
- [14] Mantou M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. Trend

- in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961—1998[J]. *International Journal of Climatology*, 2001,21(3):269-284.
- [15] 翟盘茂,潘晓华.中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J].*地理学报*,2003,58(S1):1-10.
- [16] Zhai P M, Sun A L, Ren F M, et al. Changes of climate extremes in China[J]. *Climate Change*, 1999,42(1):203-218.
- [17] 黄丹青,钱永甫.我国极端温度事件的定义和趋势分析[J].*中山大学学报:自然科学*,2008,47(3):112-116.
- [18] 黄丹青,钱永甫.极端温度事件区域性的分析方法及结果[J].*南京大学学报:自然科学*,2009,45(6):715-723.
- [19] 刘丹,赵景波.黑龙江哈尔滨地区近 60 年极端气温变化研究[J].*地球与环境*,2017,45(6):587-599.
- [20] 周晓宇,崔妍,赵春雨,等.1961—2012 年东北地区极端气温事件变化特征[C]//气候变化与低碳发展委员会、国家气候中心.第 31 届中国气象学会年会 S4 极端气候事件和灾害风险管理,2014.
- [21] 严晓瑜,赵春雨,王颖,等.近 50 年东北地区极端温度变化趋势[J].*干旱区资源与环境*,2012,26(1):81-87.
- [22] 朱红蕊,刘赫军.黑龙江省 1961—2009 年极端气温事件变化特征分析[J].*气候变化研究进展*,2011,7(2):110-115.
- [23] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [R]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [24] 赵国永,韩艳,刘明华,等.1961—2016 年河南省极端气温事件变化特征[J].*信阳师范学院学报:自然科学版*,2019,32(1):95-101.
- [25] 李娇,任玉国,战云健.浅谈极端气温事件研究中阈值确定方法[J].*气象科技进展*,2013,3(5):36-40.
- [26] 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.
- [27] 马明,郑晓鹏.瑞安市近 45 a 气温和降水变化特征分析[J].*浙江农业科学*,2017,58(6):1065-1068.
- [28] 吴利华,彭汐,马月伟,等.1951—2016 年昆明极端气温和降水事件的变化特征[J].*云南大学学报:自然科学版*,2019,41(1):91-104.
- [29] 潘涛.黑龙江省百年森林覆盖变化对极端气温和降水的影响[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2017.
- [30] 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.
- [31] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].*大气科学*,1997,16(4):482-493.
- [32] 吕翠美,吴泽宁,刘文立,等.伊河流域径流周期变化特征的小波分析[J].*人民黄河*,2007,29(5):26-28.

~~~~~

(上接第 237 页)

- [8] 冯建孟,朱有勇.滇西北地区种子植物地理分布及区系分化[J].*西北植物学报*,2009,29(11):2312-2317.
- [9] 张劲峰,李宏斌,周鸿,等.滇西北高山乡土阔叶树种资源极其应用评价[J].*西部林业科学*,2006,35(2):42-47.
- [10] 秦光荣.坚持生态立省建设生态文明切实加强滇西北生物多样性保护:在省府滇西北生物多样性保护工作座谈会上的讲话[J].*云南政报*,2008(4):40-46.
- [11] 张劲峰,周鸿,耿云芬.滇西北高山退化森林生态系统及其恢复途径:“近自然林业”理论及方法[J].*林业资源管理*,2005(5):33-37.
- [12] 刘丽萍.三江并流带新构造运动典型景观旅游地质开发与环境保护[J].*有色金属设计*,2018,45(2):15-17.
- [13] 方向京,朱绍显,李乡旺,等.云南林业生态建设与治理模式[J].*西部林业科学*,2002(S1):1-2.
- [14] 云南森林编写委员会.云南森林[M].昆明:云南科技出版社,1986.
- [15] 赵敏,袁华,耿云芬,等.香格里拉亚高山造林地类型划分及森林植物恢复对策[J].*防护林科技*,2013,113(2):47-51.
- [16] 罗云建,王效科,逯非.中国主要林木生物量模型手册[M].北京:中国林业出版社,2015.
- [17] 林业部科技司.森林生态系统定位研究方法[M].北京:中国科学技术出版社,1994.
- [18] 唐松青.闽江上游木荷与杉木人工林的持水能力和入渗特征比较[J].*中国水土保持科学*,2003,1(2):61-65.
- [19] 石培礼,吴波,程根伟,等.长江上游地区主要森林植被类蓄水能力的初步研究[J].*自然资源学报*,2004,19(3):351-360.
- [20] 李贵祥,孟广涛,方向京,等.珠江源头区几种主要林分类型下土壤的水分涵养功能研究[J].*水土保持学报*,2006,20(6):34-36,40.