

# 湖南省常德市近 50 年极端气温变化特征及周期

周学锋<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 710061)

**摘要:** 利用 1963—2012 年湖南省常德市逐日气温观测资料, 运用线性拟合、主成分分析、Mann-Kendall 突变检验和 Morlet 复数小波等方法对 WMO 发布的 10 种极端气温指数进行了计算和分析。结果表明常德地区近 50 年来, 极端最高气温、极端最低气温都呈上升趋势, 冰日、霜日、冷夜、冷日数量呈下降趋势, 夏日、热夜、暖夜、暖日数量呈上升趋势。除冰日天数未出现突变外, 各极端气温指标的突变基本发生在 1980 年代到 1990 年代末。极端最高气温、极端最低气温、夏日、热夜、霜日、暖夜、冷日、冷夜、暖日都存在 27 a 左右的周期, 冰日存在 29 a 左右的周期。总体来说, 近 50 年来, 常德地区极端天气热指数呈上升趋势, 极端天气冷指数呈下降趋势, 发生极端天气现象的可能性增加。由此可能造成夏季高温干旱和暖冬等灾害, 需要及时采取预防措施, 防止高温干旱和暖冬等情况对工农业生产和居民生活带来负面影响。

**关键词:** 常德市; 极端气温; 变化趋势; 气温突变; 周期规律

**中图分类号:** P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2015)02-0087-11

## Variation characteristics of extreme temperature and cycle of Changde in the past five decades

ZHOU Xue-feng<sup>1</sup>, ZHAO Jing-bo<sup>1,2</sup>

(1. Collage 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 710061, China)

**Abstract:** Based on daily temperature data in Changde of Hunan Province from 1963 to 2012, the indices of ten kinds of extreme temperature published by WMO were calculated and analyzed using linear regression, principal component analysis, Mann-Kendall mutation test and the plural Morlet wavelet. We found that in the past 50 years, the extreme maximum temperature and extreme minimum temperature increased. The occurrence of ice days, frost days, cold nights and cold days decreased, while the occurrence of summer days, tropical nights, warm nights and warm days increased. In addition to the ice days, the mutation of other extreme temperature indices occurred in the 1980's to 1990's. The extreme maximum temperature and extreme minimum temperature, numbers of summer days, tropical nights, frost days, warm nights, cold days, cold nights, warm days all had cycles of 27 years; and the number of ice days had a cycle of 29 years. Overall, in the past 50 years, extreme warm indices increased, and extreme cold indices decreased in Changde. The possibility of occurrence of extreme weather phenomena increased, which might cause drought and high temperature in summer and warm winter. Preventive measures should be taken to protect the industrial and agricultural production and people's life from negative effects.

**Key words:** Changde of Hunan Province; extreme temperatures; variation trend; temperature abrupt change; periods

收稿日期: 2014-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40672108); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目 (SKLLQG0606)

通讯作者: 赵景波, E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn

目前,全球气候正经历一次以变暖为主要特征的显著变化,IPCC第五次评估报告(AR5)指出近130年(1880—2012年)全球平均地表温度升高了 $0.85^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2013)。相关研究表明,近100多年来中国平均地表温度升高了约 $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ (气候变化国家评估报告编写委员会, 2007),而最近的50年,中国年平均地表温度则以 $0.22^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 的增温速度升高了 $1.1^{\circ}\text{C}$ (丁一汇等, 2006)。

伴随着全球气候变暖趋势的加剧,特大干旱、强降雨等一些极端天气事件发生的频率也是越来越高(刘吉峰等, 2007; 徐雨晴等, 2009),破坏的程度越来越强,造成的影响也越来越广泛(王琮等, 2013)。尤其是在近10年来,表现的尤为突出,这些极端天气事件对农业、交通运输以及工业生产带来极大影响(施雅风等, 2002),而且这些影响会逐渐波及到国民经济的其他部门(王新华等, 2011)。在此背景下,对极端天气的研究显得越来越重要。全面认识和了解极端天气的变化特点,找出极端天气发生的一些规律,对准确预测未来的极端天气和气候变化,提高减灾防灾的能力有着非常重大的意义。本文研究的常德市地处湖南省北部,洞庭湖西濒,属于亚热带季风气候,冬冷夏热,经常因为出现极端天气而形成自然灾害,如2013年夏季的干旱和2008年初的冰冻灾害等。国内以往的研究都关注大尺度空间区域或长株潭等相对发达地区,对于湖南北部地区的研究比较缺乏,有必要对这一地区的极端天气做进一步研究。通过极端天气指数对常德市极端天气的变化特征和突变性进行研究,认识它们的变化特点和规律,为常德地区工农业生产和居民生活应对极端灾害性天气提供科学依据。

## 1 研究地区自然概况

常德市地处长江中游,湖南省的西北部, $28^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$ 。东临洞庭,西接黔渝,南通长沙,北连荆襄。常德市西北部属武陵山系,多为中低山区,中部多见红岩丘陵区,东部为沅、澧水下游及洞庭湖平原区,西南部为雪峰山余脉组成的中山区。由此构成南、北高,中间低,两山夹一凹的基本地貌轮廓。

常德市属于中亚热带湿润季风气候向北亚热带湿润季风气候过渡的地带。气候温暖,四季分

明,春秋短,夏冬长。热量丰富,雨量丰沛,春温多变,夏季酷热,秋雨寒秋,冬季严寒。年平均气温 $16.7^{\circ}\text{C}$ ,年降水量 $1200\sim 1900\text{ mm}$ ,由于受地形影响,该地气候呈现非地带规律。西部山区的东部比西部略低,石门东山峰农场年平均气温 $9.2^{\circ}\text{C}$ ,而石门等澧水河谷地带年平均气温 $16.8^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

本文所选用的气象资料均来源于“中国气象科学数据共享服务网”(http://cdc.cma.gov.cn)中地面气候资料日值数据集常德站。区域气候变化情况的分析和检测需要时间长度尽可能长和完整的气候要素作为对象进行研究。但我国很多气候数据的观测记录是从20世纪50年代才开始的,所以近50年来的区域气象要素研究也是很有意义的。本文采用1963—2012年这50年的气温日最高值、日最低值作为数据来源进行统计分析。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 极端气温指数定义与计算

本研究中的极端气温指数的定义和计算采用的标准是基于世界气象组织(WMO)气候委员会(CCI)的定义和标准(Aguilar et al, 2005),极端气温指数是从世界气象组织(WMO)发布的极端天气指数中选取的10种(表1)。文中将极端气温指数分为3种类型(周雅清和任国玉, 2010),第一类称为极值指数,即每年每日最高(最低)气温的最大(最小)值,直接由气象站逐日观测数据统计而来;第二类称为绝对指数,是在气象站观测数据基础上根据国际气象机构定义的固定阈值进行处理得到的指数,包括夏季日数、冰冻日数、热夜日数、霜冻日数。第3类称为相对指数,是基于相对(浮动)阈值的指数,包括冷夜、暖夜、冷日和暖日数。以冷(暖)夜为例,将1963—2012年每年的同一日最低气温进行升序排列,以第10(90)个百分位值作为该日期极端气温的阈值,然后将每年的同一日期最低气温与该阈值比较,若小于(大于)该阈值,则算当年此日期为冷夜(暖夜),冷日、暖日以此类推。

文中极端气温指数是由在1998年到2001年的气候变化监测会议中通过研究和讨论(Peterson

et al, 2001) 所提出, 这些极端天气指数是从逐日最高、最低气温计算得到的, 能够展现极端天气不同方面的变化。由各指数的定义表明, 上述极端指数综合考虑了气象灾害的强度与持续时间, 已成为欧盟计划推荐用于描述与气象灾害有关的核心指标。

表 1 本文所选极端气温指数  
Table 1 Indices for extreme air temperature used in this study

| 指数分类 | 指数名称与定义                   | 单位 |
|------|---------------------------|----|
| 极值指数 | 极端最高气温: 每年最大的日最高气温        | ℃  |
|      | 极端最低气温: 每年最小的日最低气温        |    |
| 绝对指数 | 夏季日数: 每年日最高气温 ≥ 25℃ 的日数   | d  |
|      | 冰冻日数: 每年日最高气温 ≤ 0℃ 的日数    | d  |
|      | 热夜日数: 每年日最低气温 ≥ 20℃ 的日数   | d  |
|      | 霜冻日数: 每年日最低气温 ≤ 0℃ 的日数    | d  |
| 相对指数 | 冷夜: 日最低气温小于基期阈值 (10%) 的天数 | d  |
|      | 暖夜: 日最低气温大于基期阈值 (90%) 的天数 | d  |
|      | 冷日: 日最高气温小于基期阈值 (10%) 的天数 | d  |
|      | 暖日: 日最高气温大于基期阈值 (90%) 的天数 | d  |

2.2.2 分析方法

为得到极端天气指数的变化特征, 本文采用了线性趋势拟合进行研究, 分析其在不同年和年代的变化特征。通常采用一次直线方程拟合其趋势, 即关系式 (1), 关系式 (2) 表达其趋势变化率。

$y(t)=at+b$  (1)

$dy(t)/dt=a$  (2)

把  $x \times 10$  作为气候变化倾向变化率, 单位为  $^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$  (气温变化率)、 $\text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$  (极端天气日变化率)。  $a > 0$  时, 表示某气候要素序列随时间递增。  $a < 0$  时, 表示某气候要素序列随时间递减。绝对值越大, 趋势越明显。方程 (1) 和 (2) 中的  $a, b$  用最小二乘法求得。显著性水平取  $\alpha=0.05$  和  $\alpha=0.01$ , 如果检验的显著性水平小于 0.05, 则认为达到了  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验; 如果检验的显著性水平小于 0.01, 则认为达到了  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验。Mann-Kendall (魏凤英, 2007) 突变检验法分析该区各要素在时间上的突变, 使用 SPSS 软件进行主成分分析以及相关性分析 (符淙斌和王强, 1992)。

由于小波分析在时域和频域上同时具有良好的局部性质, 可以分析出时间序列周期变化的局部特征, 能更清楚地看出各周期随时间的变化情况 (林振山, 1993, 1999), 故本文采用 Morlet 复小波 (施能, 2002) 研究该地区年气温的特征尺度和周期性。

3 结果与分析

3.1 极端气温指数趋势与突变分析

根据计算获得的常德市 1963—2012 年的各项极端气温指数变化趋势 (图 1~ 图 3) 及表 2 分析可知, 近 50 年来, 该地区的年最高气温、最低气温、夏日、热夜、暖夜、暖日都呈波动上升趋势, 冰日、霜日、冷夜、冷日呈波动下降趋势。其中, 暖夜和暖日日数上升趋势很显著, 其年际倾向率分别达到  $11.05 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$  和  $6.02 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 而冷夜的下降趋势很显著, 年际倾向率为  $-7.59 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。此外, 夏日数和热夜数上升趋势也较明显, 年际倾向率分别达到  $5.02 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$  和  $5.06 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 霜日数也有较明显的下降, 年际倾向率为  $-3.93 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。这表明, 常德市近 50 年来呈现夏季高温日数增加, 冬季结冰结霜日数减少, 夜间变暖、白天变热, 暖期增加、冷期减少的趋势, 发生极端天气现象的概率增大。

图 1 显示了常德市 1963—2012 年极端最高和最低气温变化趋势。常德市日最高气温极端高值变化总体上呈增加的趋势, 速率为  $0.23 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验水平。从年代际变化来看, 1960s 年代前期到 1970s 年代初最高气温偏高, 1973 年到 1980s 年初最高气温较之前有明显下降, 1980s 年代初之后最高气温明显回升, 进入 21 世纪后, 最高气温继续小幅上升。由 M-K 检验可知, UF 与 UB 曲线交于信度线之间, 交点为 1998 年, 表明常德市日最高气温在 1998 年左右发生了突变 (图 4)。

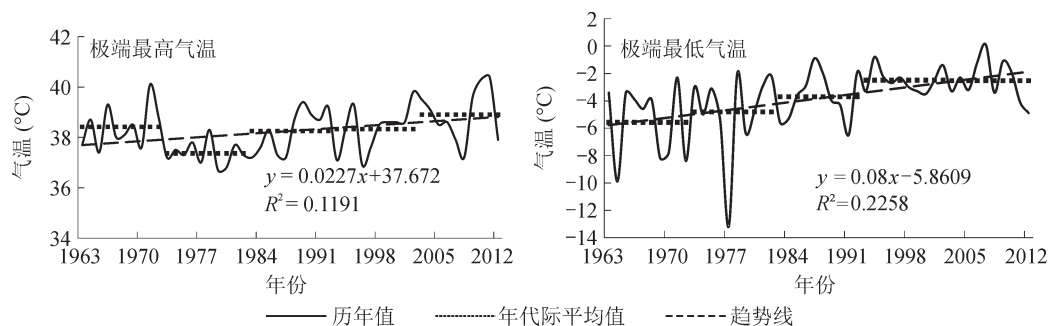


图1 1963—2012年常德市极端最高气温、极端最低气温变化趋势

Fig.1 Change in annual extreme maximum / minimum temperature of Changde during 1963—2012

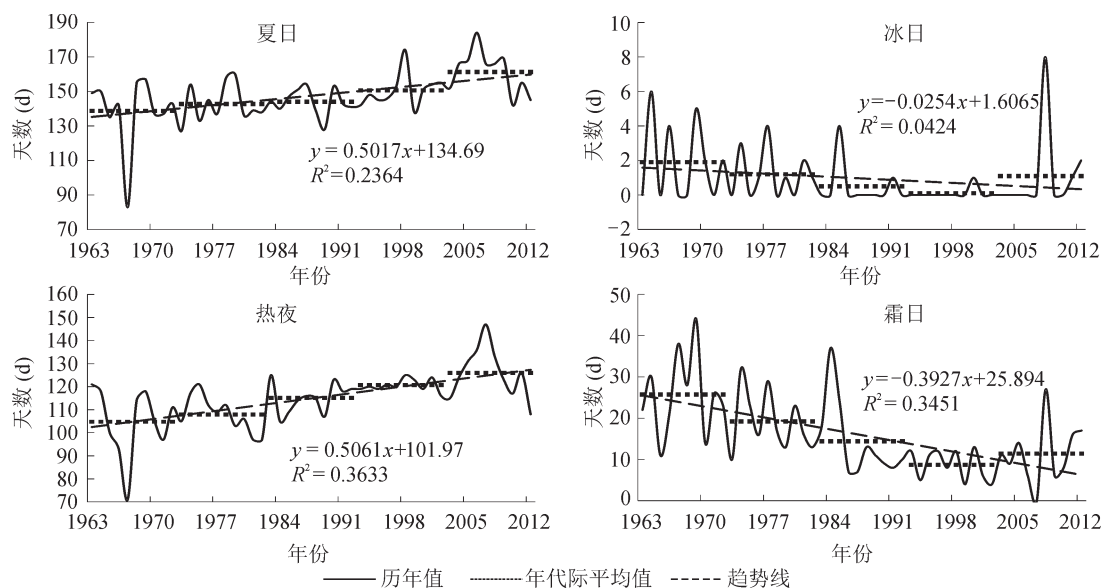


图2 1963—2012年常德市极端气温绝对指数变化趋势

Fig.2 Change in extreme temperature absolute index of Changde during 1963—2012

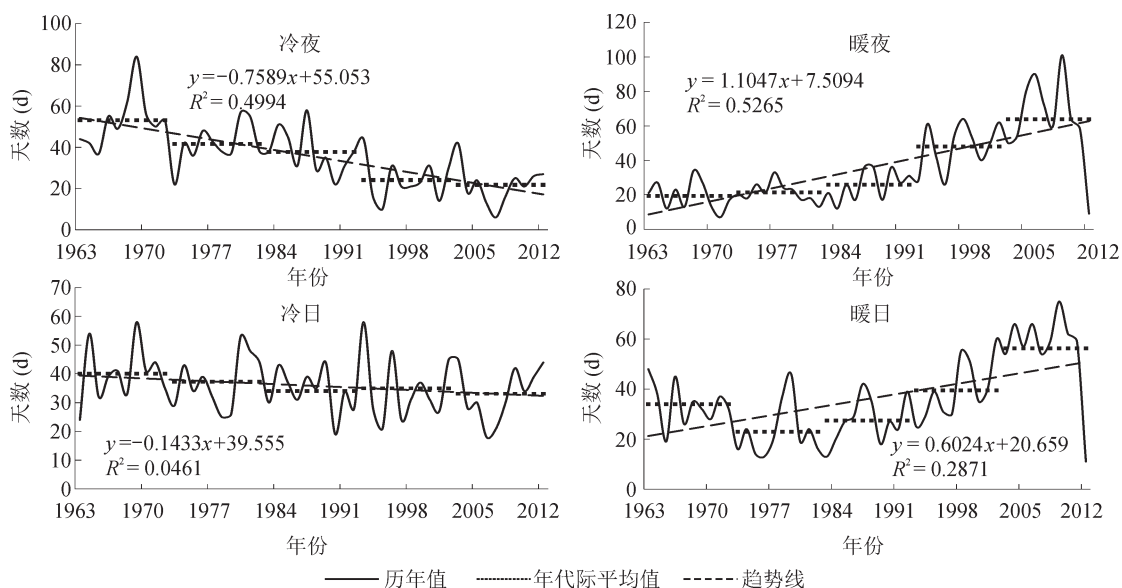


图3 1963—2012年常德市极端气候相对指数变化趋势

Fig.3 Change in extreme temperature relative index of Changde during 1963—2012

表 2 极端气温指标变率分析 (10a<sup>-1</sup>)  
Table 2 Analysis of extreme temperature

| 极端最高<br>(℃) | 极端最低<br>(℃) | 夏日 (d) | 冰日 (d) | 热夜 (d) | 霜日 (d) | 冷夜 (d) | 暖夜 (d) | 冷日 (d) | 暖日 (d) |
|-------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.23        | 0.80        | 5.02   | -0.25  | 5.06   | -3.93  | -7.59  | 11.05  | -1.43  | 6.02   |

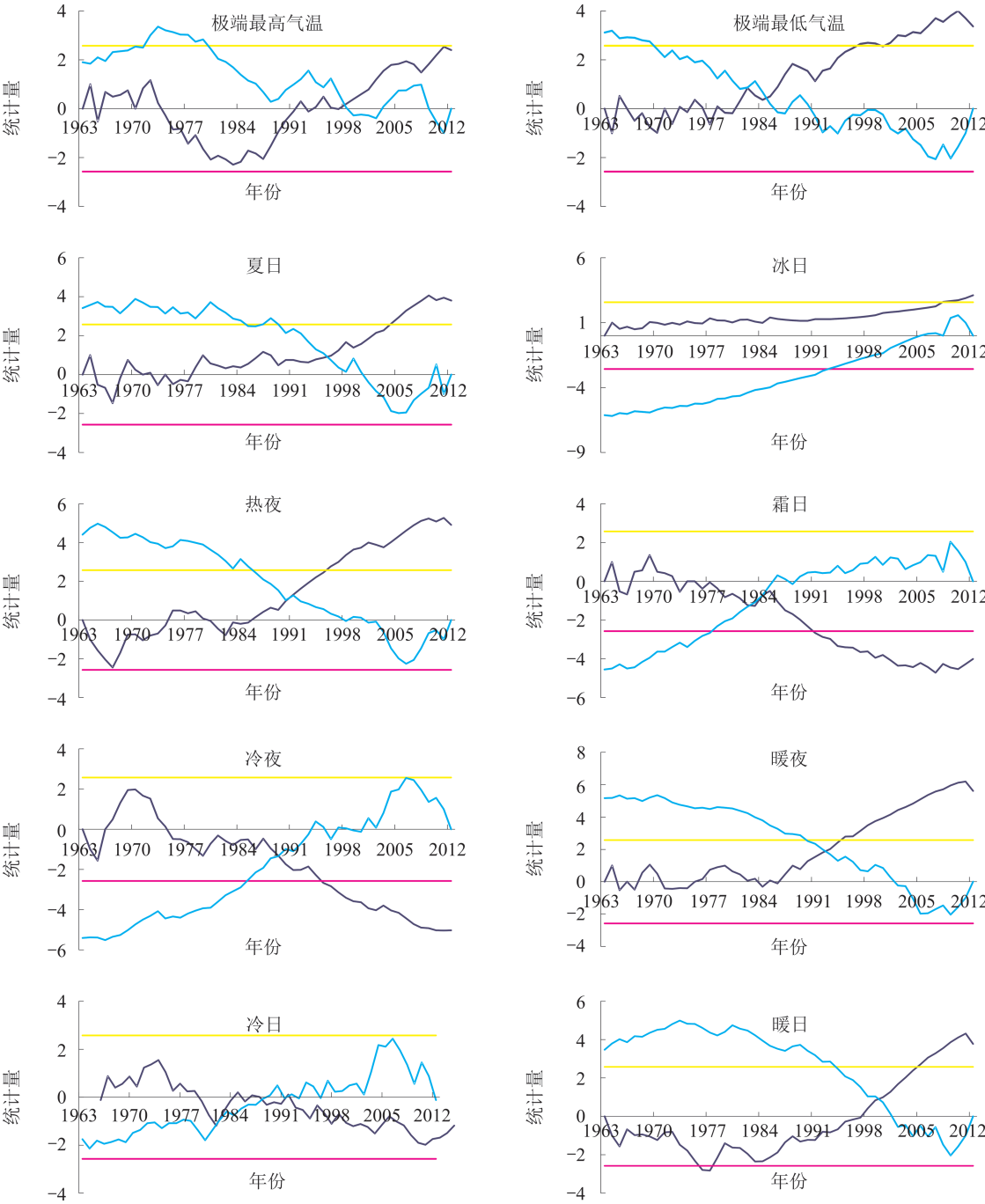


图 4 1963—2012 年常德市各极端气温指数的突变分析  
Fig.4 Abrupt change analysis of extreme temperature index of Changde during 1963—2012

同样的，从时间尺度来看，日最低气温的极端低值变化总体上也是呈增加的趋势，速率为  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ，达到了  $\alpha=0.01$  的显著性检验水平。

其在 1980's 年代以前一直处于大幅波动中，进入 1980's 年代后波动幅度逐渐变小，进入 21 世纪后更趋稳定。从年代际变化来看，极端最低气温从

1960's 年代以来一直处于稳定上升的状态, 进入 21 世纪后基本无变化。由 M-K 检验可知, UF 与 UB 曲线交于信度线之间, 交点为 1985 年, 表明常德市日最低气温在 1985 年左右发生了突变, 且在 1997 年之后超过信度线, 上升趋势显著。

由此可见, 常德市 1963—2012 年各极端气温都呈增加趋势, M-K 检验表明, 突变时间发生在 1980's 年代到 1990's 年代。

图 2 为 1963—2012 年常德市极端气温绝对指数变化趋势。其中, 夏日日数和热夜日数随时间变化呈上升趋势, 而冰冻日数和霜冻日数随时间变化呈下降趋势。夏日天数的增加速率达到了  $5.02 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 达到了  $\alpha=0.01$  的显著性检验水平。从年代际变化来看, 近 50 年夏日天数呈现缓慢上升的趋势, 进入 21 世纪后上升幅度更加明显, 在 1967 年出现了 50 年来夏日数的最小值。由 M-K 检验可知, UF 与 UB 曲线交于信度线之间, 交点为 1996 年, 表明常德市夏日天数在 1996 年后发生由少到多的突变, 且在 2004 年之后超过信度线, 上升趋势显著。

冰冻日数下降幅度很小, 主要是因为该地区处于亚热带湿润季风气候区, 全年的冰冻日数十分有限。冰冻日数下降速率为  $-0.25 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 未通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验水平。由年代际来看, 冰日年代际平均值变化呈现逐步降低的趋势, 并在 1990's 年代降低至最小值 0, 2008 年出现 50 年来的最高值, 这与 2008 年年初中国南方地区出现的冰冻灾害相一致。由 M-K 检验可知, UF 曲线一直大于 0, 表明常德市冰冻天数一直呈下降趋势。

热夜天数呈现稳步的增长趋势, 增加速率达到了  $5.06 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 达到了  $\alpha=0.01$  的显著性检验水平。从年代际变化来看, 近 50 年来热夜日数呈现阶梯式上升变化, 反映出热夜这一指数近 50 年来稳定、较大幅度的增长趋势。由 M-K 检验可知, UF 与 UB 曲线交于信度线之间, 交点为 1991 年, 表明常德市夏日天数在 1991 年后发生由少到多的突变, 且在 1996 年之后超过信度线, 上升趋势显著。

霜冻日数随时间变化下降趋势也较明显 (图 2), 但波动明显, 下降速率为  $-3.93 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 达到了  $\alpha=0.01$  的显著性检验水平。从年代际变化来看, 霜日呈现明显的下降趋势, 其年代际平均值在 1990's 年代降至最低值, 2003 年后略有回升。由 M-K 检验可知, UF 与 UB 曲线交于信度线之间, 交点为 1984 年, 表明常德市霜冻天数在 1984 年

后发生由多到少的突变, 且在 1991 年之后超过信度线, 下降趋势显著。

由以上分析可知, 常德市 1963—2012 年的结冰、结霜日在减少, 而夏日天数和热夜天数在增加, 这也表明常德市近 50 年来气温升高的趋势。这与王琼等 (2013) 对长江流域极端气温事件和 Li et al (2012) 对西南地区的研究得出的结论类似。从 M-K 检验来看, 突变时间发生在 1980's 年代到 1990's 年代。

图 3 为 1963—2012 年常德市极端气温相对指数变化趋势。冷夜天数在近 50 年来明显下降, 2007 年出现了 50 年来最低的数值, 冷夜仅有 6 天, 相当于 1969 年 84 天的  $1/14$ , 冷夜年际倾向率为  $-7.59 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 达到了  $\alpha=0.01$  的显著性检验水平。线性拟合程度较高, 表明了冷夜天数的剧烈变化。由年代际均值变化来看, 总体持续性下降, 1990's 和 2000's 的年代际平均值较为相近。由 M-K 检验可知, UF 与 UB 曲线交于信度线之间, 交点为 1989 年, 表明常德市冷夜天数在 1989 年后发生由多到少的突变, 且在 1995 年之后超过信度线, 下降趋势显著。

暖夜天数与冷夜相反, 近 50 年呈现大幅上升趋势, 变率为  $11.05 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 达到了  $\alpha=0.01$  的显著性检验水平。1960's 到 1980's 年代增加缓慢, 但进入 1990's 年代后快速上升且波动较大, 其年代际平均值持续上升, 且上升幅度逐渐增大, 1990's 年代后出现明显上升。由 M-K 检验可知, UF 与 UB 曲线交于信度线之间, 交点为 1992 年, 表明常德市暖夜天数在 1992 年后发生由少到多的突变, 且在 1995 年之后超过信度线, 上升趋势显著。

与冷、暖夜相比, 冷日天数呈现小幅下降趋势, 且波动幅度很大, 变率为  $-1.43 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 未通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验水平。从年代际变化来看, 1980's 年代后冷日的年代际平均值呈现较稳定的态势, 大约在 34 d 左右。由 M-K 检验可知, UF 与 UB 曲线交于信度线之间, 交点为 1987 年, 表明常德市冷日天数在 1987 年后发生由多到少的突变。

暖日呈现出明显的上升趋势, 其年际倾向率为  $6.02 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 波动较大, 达到了  $\alpha=0.01$  的显著性检验水平。由年代际均值变化来看, 1960's 年代至 1970's 年代呈下降趋势, 1980's 年代开始回升,

进入21世纪后上升幅度更加明显。由M-K检验可知,UF与UB曲线交于信度线之间,交点为2000年,表明常德市暖日天数在2000年后发生由少到多的突变,且在2005年后超过信度线,上升趋势显著。

由以上分析可知,常德市1963—2012年冷夜日数和暖夜日数变化明显,表明常德市近50年来夜间气温显著升高,暖日天数和冷日天数随时间变化的趋势也说明常德市近50年来白天气温持续升高。1990's年代初期之后冷夜天数减少较快,而暖夜、暖日天数显著增加,且暖夜日数的增加率高于冷夜日数的减少率,暖日天数的增加率大于冷日天数的递减率,也从侧面表明常德市1963—2012年气候变暖的趋势。从M-K检验来看,突变时间基本发生在1980's年代末到1990's年代末。

### 3.2 极端气温周期分析

如图5、图6、图7为本文所选10个极端气温指数的Morlet复小波变换图。Morlet小波变换系数的实部可以用来判别气候资料序列中所包含的不同时间尺度气温的结构。本文用Morlet小波研究常德市近50年气温的特征尺度和周期性。图中实线代表偏多,虚线代表偏少。

图5表示极端最高气温和极端最低气温的复小波分析,从图中可以看出极端最高气温存在17 a、27 a左右的准周期,27 a左右的振荡周期为其主要控制周期,极端最高气温呈现高—低—高的变化过程。极端最低气温存在2.5 a、6 a、11 a、28 a左右的准周期,6 a周期产生于1960's年代,消失

于20世纪末;11 a周期产生于1970's年代,消失于1990's年代;28 a左右的周期贯穿始终,为其主控周期。

图6分别为夏日、冰日、热夜、霜日的小波变换图。从图5中可以看出,夏日具有17 a、27 a左右的准周期,17 a周期于1970's年代出现,消失于20世纪末。热夜存在18 a、27 a左右的准周期,18 a周期开始于1970's年代,消失于21世纪初,变化趋势与夏日相同。霜日存在17 a、27 a左右的准周期,17 a周期开始于1970's年代,消失于21世纪初。以上三个指数的27 a准周期都贯穿研究时域,均为主控周期。近50年来,常德市这三个极端气温指数经历了多—少—多的变化过程。冰日周期变换比较复杂,存在2.5 a、6 a、14 a、18 a、21 a、29 a左右的准周期,29 a为主控周期。

图7分别为冷夜、暖夜、冷日、暖日的小波变换图。从图6中可以看出,冷夜具有4 a、14 a、28 a左右的准周期,变化较复杂,4 a周期不明显,由1960's年代持续至20世纪末消失,14 a周期出现于1960's年代后期,消失于1990's年代,28 a周期贯穿始终,为主要控制周期。冷日存在3 a、7 a、14 a、27 a左右的准周期,变化复杂,3 a、7 a周期不明显,14 a周期出现于1960's年代,消失于1990's年代,27 a周期贯穿整个研究时域,为主要控制周期。暖夜存在3 a、10 a、27 a左右周期,3 a周期不明显,10 a周期起始于1960's年代,结束于1990's年代初,27 a周期贯穿始终,为主控周期。暖日存在6 a、18 a、28 a左右的周期,其中28 a周期为主控周期。暖夜和暖日均呈现暖—冷—暖趋势。

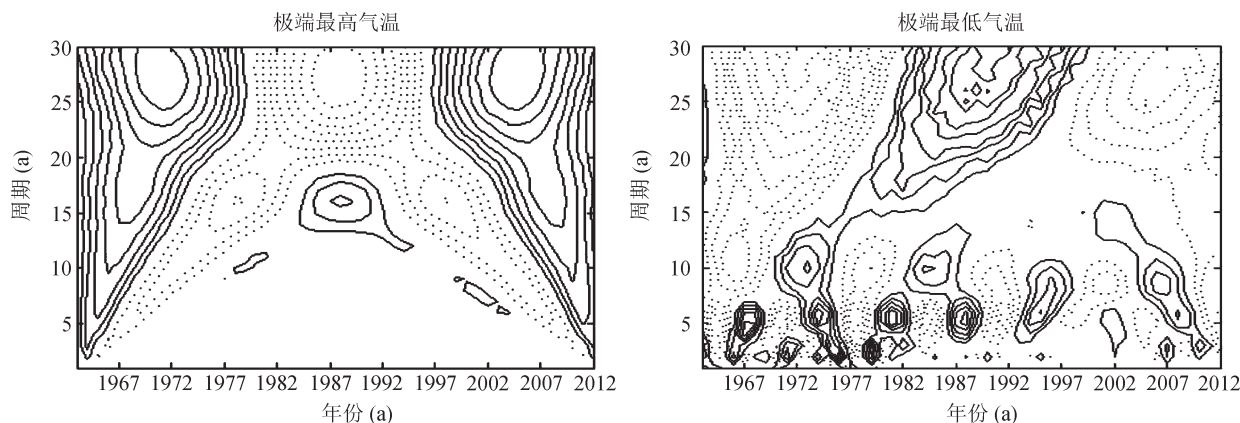


图5 常德市极端温度的变化周期  
Fig.5 The period of extreme temperature of Changde

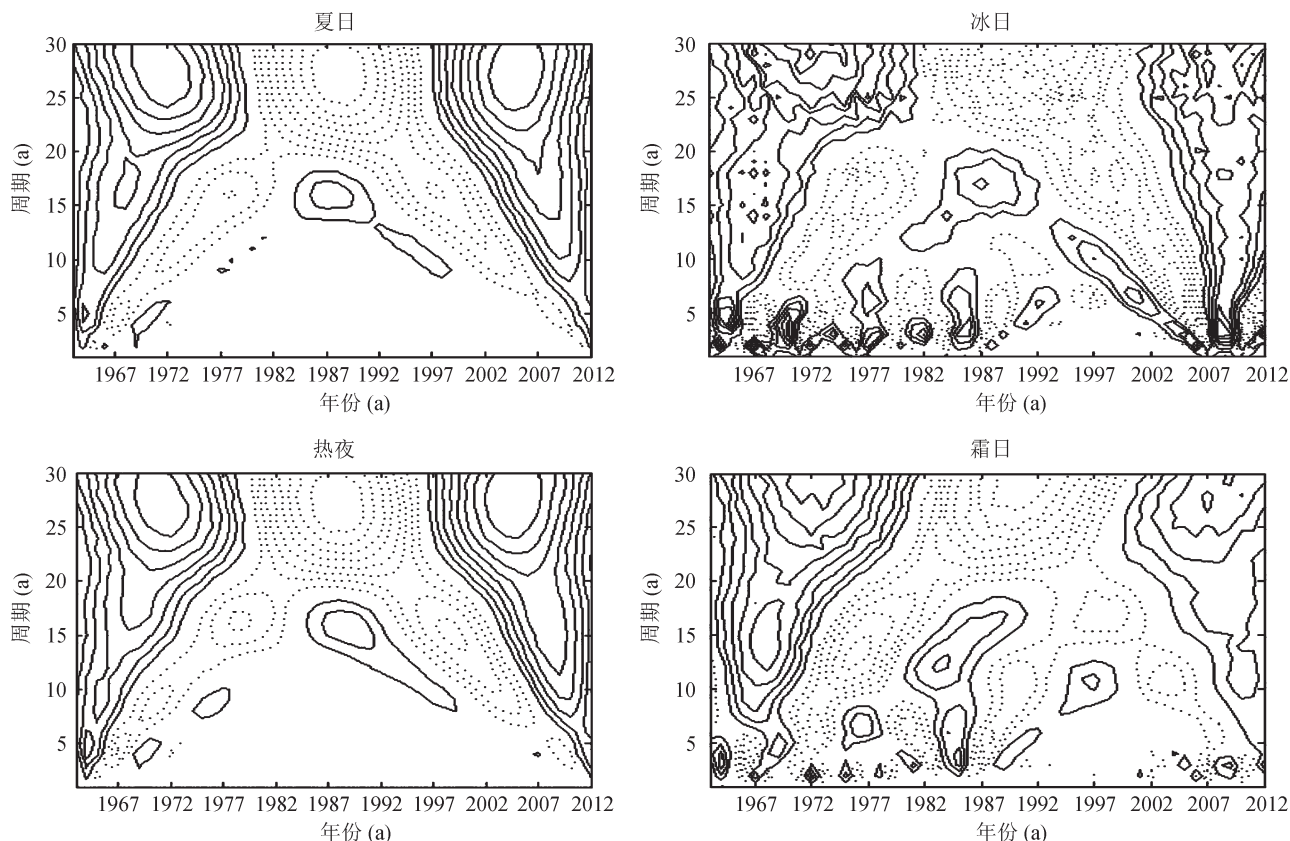


图6 常德市极端气温绝对指数的变化周期

Fig.6 The period of extreme temperature absolute index of Changde

## 4 讨论

### 4.1 极端气温指数的主成分分析

利用 SPSS19.0 软件对常德市极端气温指数的各因子进行主成分分析,可以得出主成分和因子间的相关系数的载荷矩阵(表3)。主成分分析的结果表明,前4个主成分的累积贡献率达到82.4%,完全符合分析的要求。因此,提取这4个主成分,得出主成分与因子之间的相关系数的载荷矩阵。

由表3可知,第一主成分占方差贡献率的45.5%,其中,夏日日数、热夜日数、暖夜日数、暖日日数的荷载值都比较高,以夏日日数最为突出。在表4中这四个极端气温指数的相关关系均通过了0.01的显著性检验。第二主成分占方差贡献率的17.6%,其中冰冻日数、霜冻日数、极端最低气温的荷载值比较高,从表4中可以看出这3个极端气温指数的相关关系均通过了0.01的显著性检验。第三主成分占方差贡献率的12.2%,暖夜

日数、暖日日数、极端最高气温的荷载值比较高,其中极端高温最为突出,在表4中这3个指数的相关关系均通过0.01的显著性检验。第四主成分占方差贡献率的7.1%,霜冻日数、冷夜日数荷载值较高,从表4中可知,这两个指数的相关关系通过了0.01的显著性检验。

总之,除了冰冻日数和极端高温之外,各极端气温指数之间都有很好的相关性,尤其是上面所述的各指数之间均通过0.01的显著性检验。在相对指数和绝对指数中,各暖指数之间、各冷指数之间均为正相关关系,而暖指数与冷指数之间则呈现出负相关关系(表4)。前文在分析各指数的时间趋势变化时,得出各暖指数均呈现升高趋势,各冷指数均呈现出下降趋势的结论,表明其变化具有一致性, Li et al (2012) 在对我国西南地区的研究中,也得出类似的结论。而极值指数则表现出不同程度的升高趋势,从表4中也可以看出,它们之间表现出正相关关系。

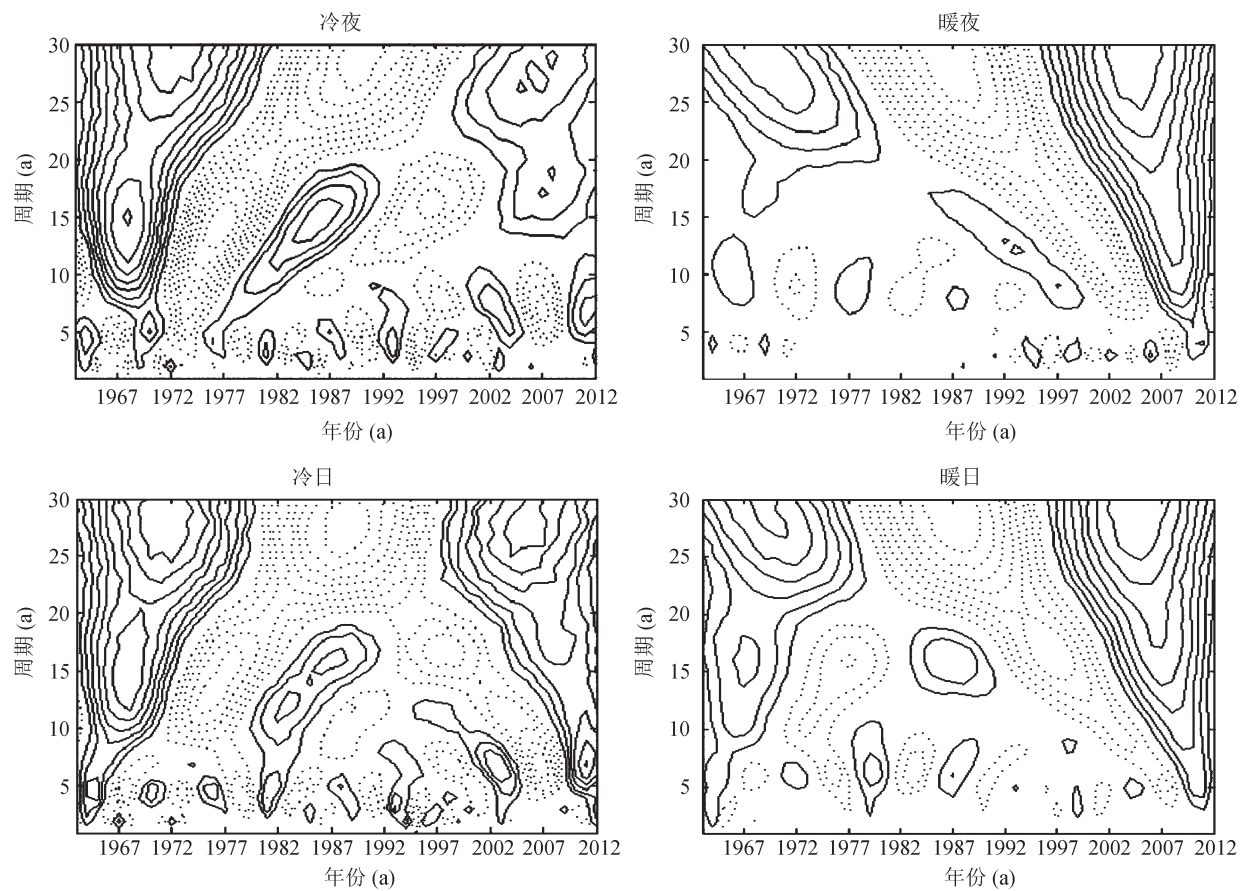


图 7 常德市极端气温相对指数的变化周期  
Fig.7 The period of extreme temperature relative index of Changde

表 3 1963—2012 年常德市极端气温指数的因子分析  
Table 3 Results of factor loadings perceptual explained variance in temperature extremes in Changde from 1963 to 2012

| 指标       | 主成分   |       |       |       | 共同度  |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|
|          | 1     | 2     | 3     | 4     |      |
| 夏日数 SU   | 0.93  | −0.01 | 0.04  | −0.04 | 0.89 |
| 冰日数 ID   | 0.14  | 0.89  | −0.01 | 0.10  | 0.84 |
| 热夜数 TR   | 0.82  | −0.02 | −0.03 | −0.37 | 0.83 |
| 霜日数 FD   | −0.23 | 0.58  | −0.06 | 0.67  | 0.85 |
| 冷夜 TN10  | −0.28 | 0.20  | −0.15 | 0.79  | 0.92 |
| 暖夜 TN90  | 0.72  | −0.17 | 0.43  | −0.33 | 0.85 |
| 冷日 TX10  | −0.20 | 0.18  | 0.01  | 0.24  | 0.98 |
| 暖日 TX90  | 0.66  | −0.14 | 0.64  | −0.02 | 0.88 |
| 最高气温 TXx | 0.04  | −0.08 | 0.94  | −0.09 | 0.90 |
| 最低气温 TNn | 0.24  | −0.81 | 0.17  | −0.19 | 0.78 |
| 方差 %     | 45.54 | 17.55 | 12.23 | 7.08  | —    |
| 累积方差 %   | 45.54 | 63.09 | 75.32 | 82.40 | —    |

表 4 1963—2012 年常德市极端气温指数相关关系矩阵  
Table 4 The correlation matrix of temperature extremes in Changde from 1963 to 2012

| 各极端气温指数 | SU      | ID       | TR       | FD       | TN10     | TN90    | TX10    | TX90    | TXx   | TNn  |
|---------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|-------|------|
| SU      | 1.00    |          |          |          |          |         |         |         |       |      |
| ID      | 0.091   | 1.00     |          |          |          |         |         |         |       |      |
| TR      | 0.760** | -0.037   | 1.00     |          |          |         |         |         |       |      |
| FD      | -0.317* | 0.542**  | -0.409** | 1.00     |          |         |         |         |       |      |
| TN10    | -0.341* | 0.274    | -0.554** | 0.668**  | 1.00     |         |         |         |       |      |
| TN90    | 0.646** | -0.132   | 0.689**  | -0.481** | -0.611** | 1.00    |         |         |       |      |
| TX10    | -0.312* | 0.281*   | -0.386** | 0.419**  | 0.621**  | -0.352* | 1.00    |         |       |      |
| TX90    | 0.611** | -0.032   | 0.484**  | -0.327*  | -0.389** | 0.802** | -0.246  | 1.00    |       |      |
| TXx     | 0.141   | -0.111   | 0.118    | -0.185   | -0.199   | 0.400** | -0.027  | 0.541** | 1.00  |      |
| TNn     | 0.230   | -0.547** | 0.257    | -0.590** | -0.480** | 0.428** | -0.293* | 0.381** | 0.223 | 1.00 |

注: \*\* 表示在 0.01 水平 ( 双侧 ) 上显著相关, \* 表示在 0.05 水平 ( 双侧 ) 上显著相关。

4.2 极端温度变化的原因

由以上分析可以看出,常德市近 50 年极端最高气温、极端最低气温呈逐渐增大趋势,极端气温冷指标下降,极端气温暖指标上升,该地区整体气温呈现上升的状态。从时间特征来看,常德市气温存在着 2.5~3 a、6~7 a、11~14 a、27~28 a 的周期变化,其中,3 a 周期振荡与对流层大气环流的准 2 a 周期振荡 (TBO) (贾建颖等,2009) 存在一致性关系。6 a 周期可能与 ENSO 事件的 5~7 a 准周期相联系,说明 ENSO 事件一定程度上影响该地区的气温变化。11~14 a 周期与太阳活动的准 11 a 周期有关,说明常德市气温受太阳活动的影响 (段长春和孙绩华,2006)。研究发现,中国近 54 年来气温升高趋势达到  $0.25^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,尤其是在 1980 年代以后上升更为明显 (任国玉等,2005a,2005b),常德市气温与中国气温变化一致。

5 结论

(1) 常德市 1963—2012 年白天气温呈现升高趋势,夜间气温呈现显著变暖趋势,秋冬季的结冰、结霜日数呈减少趋势,热夜和夏日天数呈现增加趋势。各极值指数也呈现增加趋势,暖指数增加,冷指数减小。

(2) 除冰日天数未出现突变外,各极端气温指标的突变基本发生在 1980 年代到 1990 年代末。其中,各相对指数的突变时间基本发生在 1980 年代末到 1990 年代末,绝对指数的突变时间基本发生在 1980 年代到 1990 年代,各极值指数的突变

时间发生在 1980 年代和 1990 年代。

(3) 冷夜日数和暖夜日数年际倾向率分别为  $-7.59\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$  和  $11.05\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,夜指数的变化是常德市在 1963—2012 年气温呈上升趋势的主要原因。各冷指数间、各暖指数间均为正相关关系,而冷指数与暖指数之间呈负相关关系。

(4) 27 a 左右可能是本文所选 10 个指数比较稳定的周期,共同反映常德地区极端天气的周期变化规律。

(5) 可以推测常德地区极端天气现象的变化与人类活动和全球气候变暖相关。近 50 年常德地区极端天气变化的研究结果可以为本地区应对气候变化和防止气象灾害提供理论依据和参考。

参考文献

丁一汇,任国玉,石广玉,等. 2006. 气候变化国家评估报告 (1): 中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2(1): 3–8. [Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, et al. 2006. National assessment report of climate change (1): Climate change in China and its future trend [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2(1): 3–8.]

段长春,孙绩华. 2006. 太阳活动异常与降水和地面气温的关系 [J]. 气象科技, 34(4): 381–386. [Duan C C, Sun J H. 2006. Relationship between abnormal solar activities and precipitation and temperature in China [J]. *Meteorological Science and Technology*, 34(4): 381–386.]

符淙斌,王 强. 1992. 气候突变的定义和检测方法 [J]. 大气科学, 16(4): 482–493. [Fu C B, Wang Q. 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change [J].

- Scientia Atmospherica Sinica*, 16(4): 482–493.]
- 贾建颖, 孙照渤, 刘向文, 等. 2009. 中国东部夏季降水准两年周期振荡的长期演变 [J]. *大气科学*, 33 (2): 397–407. [Jia J Y, Sun Z B, Liu X W, et al. 2009. Evolution of summer precipitation quasi-biennial oscillation in Eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 33(2): 397–407.]
- 林振山. 1993. 长期预报的相空间理论和模式 [M]. 北京: 气象出版社. [Lin Z S. 1993. Theory and model in the phase space for long-term forecast [M]. Beijing: Meteorological Press.]
- 林振山. 1999. 子波气候诊断技术的研究 [M]. 北京: 气象出版社. [Lin Z S. 1999. Research of the wavelet climatic diagnosis technology [M]. Beijing: Meteorological Press.]
- 刘吉峰, 丁裕国, 江志红. 2007. 全球变暖加剧对极端天气概率影响的初步探讨 [J]. *高原气象*, 26(4): 838–842. [Liu J F, Ding Y G, Jiang Z H. 2007. The influence of aggravated global warming on the probability of extreme climatic event [J]. *Plateau Meteorology*, 26(4): 838–842.]
- 气候变化国家评估报告编写委员会. 2007. 气候变化国家评估报告 [R]. 北京: 科学出版社, 18–40. [The Editorial Committee of China's National Assessment Report on Climate Change. 2007. The China's National Assessment Report on climate change [R]. Beijing: Science Press, 18–40.]
- 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005a. 中国气温变化研究最新进展 [J]. *气候与环境研究*, 10(4): 701–716. [Ren G Y, Chu Z Y, Zhou Y Q, et al. 2005a. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 10(4): 701–716.]
- 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005b. 近50年中国地面气候变化基本特征 [J]. *气象学报*, 63(6): 942–952. [Ren G Y, Guo J, Xu M Z, et al. 2005b. Climate changes of China's Mainland over the past half century [J]. *Acta Meteorological Sinica*, 63(6): 942–952.]
- 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. [Shi N. 2002. Multivariate analysis method in research and forecast of meteorological [M]. Beijing: Meteorological Press, 143–154.]
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. *冰川冻土*, 24 (3): 219–226. [Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24 (3): 219–226.]
- 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 2013. 1962—2011年长江流域极端气温事件分析 [J]. *地理学报*, 68 (5): 611–625. [Wang Q, Zhang M J, Wang S J, et al. 2013. Extreme temperature events in Yangtze River Basin during 1962—2011 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 68 (5): 611–625.]
- 王新华, 延军平, 杨谨菲, 等. 2011. 1950—2008年汉中市气候变暖及其经济适应 [J]. *地理科学进展*, 30(5): 557–562. [Wang X H, Yan J P, Yang J F, et al. 2011. An analysis of global warming and economic adaptation in Hanzhong during 1950—2008 [J]. *Progress in Geography*, 30(5): 557–562.]
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 (第二版) [M]. 北京: 北京气象出版社, 63–66. [Wei F Y. 2007. Modern climatological statistical diagnosis and prediction technology (the second edition) [M]. Beijing: Beijing Meteorological Press, 63–66.]
- 徐雨晴, 苗秋菊, 沈永平. 2009. 2008年: 气候持续变暖, 极端事件频发 [J]. *气候变化研究进展*, 5(1): 56–60. [Xu Y Q, Miao Q J, Shen Y P. 2009. The year 2008: Global warming continued, extreme events occurred frequently [J]. *Advances in Climate Change Research*, 5(1): 56–60.]
- 周雅清, 任国玉. 2010. 中国大陆1956—2008年极端气温事件变化特征分析 [J]. *气象与环境研究*, 15(4): 405–417. [Zhou Y Q, Ren G Y. 2010. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956—2008 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 15(4): 405–417.]
- 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.
- IPCC. 2013. Summary for Policymakers of Climate Change 2013: The physical science basis contribution of Working Group 1 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change [M]. UK: Cambridge University Press.
- Li Z X, He Y Q, Wang P Y, et al. 2012. Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961—2008 [J]. *Global and Planetary Change*, 80–81: 255–272.
- Peterson T C, Folland C, Gruza G, et al. 2001. Report on the activities of the Working Group on Climate Change detection and related rapporteurs [R]. World Climate Research Programme.