

云南省丽江市 1960—2017 年极端气温变化特征

吉正熙¹, 赵景波^{1,2}

1. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 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: 云南丽江市是位于南方且具有温带气候特点的地区, 研究该区近 58 年极端气温变化对查明极端气温变化特点、规律和趋势具有重要科学意义, 对极端气温引起的气象灾害的预防及减少气象灾害造成的损失有实际意义。利用丽江市气象站 1960—2017 年的日最高、最低气温和平均气温等气象数据, 采用线性趋势分析法、累积距平值分析法、主成分分析法、Mann-Kendall 突变检验法、Morlet 复数小波变换系数及小波方差法, 对选用的 8 个极端气温指数进行了研究。结果表明: 丽江市的极端最高气温、极端最低气温、夏季日数、暖昼日数、暖夜日数等 5 个指数呈现上升趋势, 冷昼日数、冷夜日数、霜冻日数等 3 个指数呈现下降趋势。主成分分析结果表明: 丽江市的夏季日数、暖昼日数和暖夜日数的增加对气温升高起到了主要作用。突变分析表明: 丽江各指数的突变年主要出现在 21 世纪初和 1983 年前后。Morlet 小波分析表明: 丽江市极端气温指数的主周期普遍为 18 年, 个别指数有 12 年、30 年的周期。初步认为, 全球气温升高是导致研究区极端气温变化的主要原因, 预测丽江市未来 2—3 年的气温仍会呈现上升趋势, 且极端高温事件的发生频率呈现上升趋势。

关键词: 极端气温; 趋势变化; 周期规律; 突变; 旱灾; 丽江市

Variation characteristics of extreme temperature in Lijiang, Yunnan Province during 1960—2017

Ji Zhengxi¹, ZHAO Jingbo^{1,2}

1. College of Geography Science and Tourism, 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: Background, aim, and scope Since the 20th century, the global temperature is undergoing a general and significant increase, and the extreme temperature events have brought serious threats and shocks to many parts of the Earth in terms of temperature and precipitation. Under the background of global high temperature, China is also affected by extreme temperature. Based on the previous studies on the extreme climate changes in Yunnan Province, a more detailed and in-depth analysis is carried out, which may give us a deeper understanding of the process and reasons of the extreme temperature changes. Lijiang, located in the south of Yunnan Province, is a

收稿日期: 2018-05-10; 录用日期: 2018-08-19; 网络出版: 2018-08-27

Received Date: 2018-05-10; Accepted Date: 2018-08-19; Online first: 2018-08-27

基金项目: 国家社会科学基金重大项目 (11&ZD097); 黄土与第四纪地质国家重点实验室项目 (SKLLQG1713)

Foundation Item: National Social Science Fund of China (11&ZD097); State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology (SKLLQG1713)

通信作者: 赵景波, E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn

Corresponding Author: ZHAO Jingbo, E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn

引用格式: 吉正熙, 赵景波. 2019. 云南省丽江市 1960—2017 年极端气温变化特征 [J]. 地球环境学报, 10(4): 377—389.

Citation: Ji Z X, Zhao J B. 2019. Variation characteristics of extreme temperature in Lijiang, Yunnan Province during 1960—2017 [J]. Journal of Earth Environment, 10(4): 377—389.

city with temperate characteristics. Studying the extreme temperature changes by analyzing the meteorological data in the recent 58 years of this area is of great scientific significance, which not only can help to identify the features, rules, and trends of extreme temperature changes, but also can prevent meteorological disasters and reduce the losses caused by extreme temperatures. **Materials and methods** The paper analyzes the meteorological data including daily maximum temperature, daily minimum temperature and the mean temperature during the period from 1960 to 2017 in Lijiang. The study was performed with diverse methods consisting of Linear Trend Analysis, Cumulative Annual Temperature Anomaly Analysis, Principal Component Analysis, Mann-Kendall Method, Morlet Complex Wavelet Transform Coefficients and Wavelet Variance Method. **Results** The results show that the five extreme indices such as extreme maximum temperature, extreme minimum temperature, summer days, warm days and warm nights in Lijiang have increasing trend, while the three indexes such as cool days, cool nights and frost days present decreasing. **Discussion** It can be found from principal component analysis of extreme temperature index of Lijiang during 1960 to 2017 that load values in summer days, warm days and warm nights were high. On this basis, these three indexes are determined as the main factors leading to the rise of temperature in Lijiang. Through Mann-Kendall abnormal analysis in Matlab software, the symbolic abnormal years in time series can be obtained from the intersection points of the extreme temperature positive and reverse sequence lines. The abnormal years of warmth index appeared in the early 21st century. According to the analysis of droughts and high temperature disasters possibly caused by changes in extreme temperature index, it can be learned that the extreme temperature increase will seriously affect the tourists' direct tourism experience, and will have adverse impact on propagandizing local tourism mainly featuring moderate climate. **Conclusions** The Principal Component Analysis suggests that the rise of the summer days, warm days and nights in Lijiang plays the main part of its growth in temperature. And according to the Mutation analysis, the abnormal change in Lijiang mainly occurred in the early 21st century and around 1983. Morlet Complex Wavelet Transform Coefficients and Wavelet Variance Method presents the primary period of the extreme temperatures in Lijiang is generally 18 years apart from exceptions of 12 years and 30 years. It is initially believed that the global warming is the main cause of extreme temperature changes in Lijiang. **Recommendations and perspectives** The authors predict that the temperature in Lijiang in the near two or three years will appear to be upward, and the frequency of extreme high temperature events will go up.

Key words: extreme temperature; trend change; periodic law; abnormal change; drought; Lijiang

自 20 世纪以来, 全球气温正经历着一次显著升高的变化, 极端气温事件从温度和降水等方面给地球众多地区带来了严重的威胁和冲击。IPCC 第四次评估报告指出, 近 100 年 (1906—2005 年) 来全球地表平均气温处于升高状态, 平均升高 0.74°C , 而中国的平均气温变化趋势与全球变化趋势总体一致, 上升了 $0.5—0.8^{\circ}\text{C}$ (《气候变化国家评估报告》编写委员会, 2007)。极端气温属于气象灾害, 极端高温与极端低温通常会引起热浪与寒潮 (Lee, 2014)。极端气温事件是指一些会伴随严重灾害气候过程发生的异常高温、异常低温和异常强降水等天气事件, 其发生的概率较小 (《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会, 2011)。极端气温天气的发生容易对森林植被、

野生动物的栖息条件带来不良影响, 也对人类的生活、农业生产和能源安全造成严重的冲击和威胁。2003 年, 欧洲的极端高温气象灾害使得 5 万民众受到了不同程度的危害, 农业方面的损失更是超过了 100 亿美元 (Poumadère et al, 2005)。有国外专家学者通过各种分析方法对出现的极端气温现象进行了一系列的研究, 得出的结论是与全球变暖的大背景密切相关 (Kim et al, 2013)。而在全球高温的大背景之下, 中国也同样受到了极端气温的影响。2003 年夏季, 云南出现了历史上罕见的大范围异常高温干旱天气 (解明恩等, 2005), 同年长江中下游以南广大地区出现了较为严峻的伏旱现象 (袁晓玉和马德贞, 2005)。2009 年中国出现局部地区持续高温, 17 个省市的

最高气温打破了已有的夏季极端最高气温记录。在社会经济飞速发展的今天, 极端天气灾害带来的伤害和经济损失将会更加显著, 研究极端气温对人们的生活、生产和未来发展非常重要。

中国在 1955—2005 年的极端最低气温的增温速率大于极端最高气温(张宁等, 2008), 1961—2012 年云南的最高气温和最低气温都呈现明显的增温趋势, 且冷事件在逐渐减少, 热事件在逐渐增多(张万诚等, 2015)。高志伟和严华生(2009)利用 1961—2007 年云南省 121 个地面测站逐月平均气温距平进行 M-K 突变检验, 发现该时间段内云南气温突变趋势明显, 夏季最先开始突变, 其次是冬季, 然后是秋季, 最后是春季, 秋冬季的气温突变是造成年气温突变的关键。周雅清和任国玉(2010)发现, 云南的绝大部分地区出现突变升温, 而只有金沙江流域及西部的部分地区出现了突变降温的现象。陈艳等(2013)对云南不同气候带极端气温变化进行了研究, 认识到选取的各代表站点的气温总体上呈现上升趋势, 但各站点气温变化率的大小与其自身所处的各个气候带之间没有明显的规律性差异, 代表着高原气候的香格里拉站点的气温增暖趋势最为突出。王晓等(2014)利用 1960—2011 年云南省 31 个气象站点的最低气温和最高气温的日数据, 对云南省极端气温事件的时空分布及趋势进行预测, 并得出云南省极端气温事件总体上呈上升趋势, 各极端指数发生突变的时间和周期都不尽相同。

极端高温天气和极端低温天气对交通、电力、农业、旅游、居民生活等都会造成严重影响, 对其进行研究具有重要的实际意义。研究极端气温变化对揭示其变化特点、趋势、发生规律、原因具有重要科学意义。前人对云南省极端气候变化进行了研究, 但多是对大片区域的统一研究。云南近年来旅游业发展十分迅速, 选取旅游业较为发达的丽江地区, 采用其气象观测站点 1960—2017 年的气象数据进行单独分析并进行相互比较, 能更清晰地了解近 58 年丽江极端气温具体变化的特点、规律、差异原因与趋势, 为减少极端气候变化对经济与社会发展造成的损失提供科学依据。本文是在前人对云南省极端气候研究的基础上, 对云南极端气温进行的更为详细的深入剖析, 可使得对极端气温的变化过程与原因有更深刻的认识。

1 研究区概况

云南省位于中国西南边陲, 总面积约 39 万平方千米, 约占全国陆地面积的 4.11%。研究区域选取云南西北部旅游业较为发达的地区——丽江市。丽江市保存了很好的少数民族古城, 集中了纳西文化的精华, 拥有独特的山水之貌, 十分引人入胜。丽江市区中心位于 100°25'E, 26°86'N。该地区海拔高度为 2418 m, 总面积达 20600 km², 人口达 124.4 万人(2010 年)。丽江地区属于高原性西南季风气候, 气温日较差大, 年较差小, 年平均气温为 12.9℃, 年均降雨量约为 1000 mm。每年的 5—10 月为雨季, 降雨量占全年的 85%。

2 资料来源及研究方法

2.1 资料来源

所采用的气象数据资料均来源于中国气象数据网(<http://cdc.nmic.cn/>), 研究要求需要数据是连续不间断且无缺失年份, 所以经过严格的数据筛选和质量控制之后, 选取了云南丽江气象观测站点 1960—2017 年的气温数据, 其中包括逐日最高气温、日最低气温、日平均气温。

2.2 极端气温指数的定义和分类

极端指数的定义标准是基于全球气候研究计划(WCRP)气候变化和可预测性计划(CLIVAR)气候变化检测、世界气象组织(WMO)气候委员会(CCI)等权威来源, 国内外研究学者以此对世界各地极端气候事件进行了许多研究(You et al, 2011)。对云南丽江地区常年自然气象情况和地理环境进行分析之后, 选择了 8 个极端指数(表 1), 可将其细分为 3 类: 第 1 类为极值指数, 分为极端最高气温(TX_x)和极端最低气温(TN_n), 意指年日最高(最低)气温的最大(最小)值; 第 2 类为绝对指数, 有夏季日数(SU)和霜冻日数(FD), 指每年中气温超过或低于固定阈值的日数; 第 3 类是相对指数, 包含暖昼(TX₉₀)、暖夜(TN₉₀)、冷昼(TX₁₀)、冷夜(TN₁₀), 它们是以一定的百分位阈值来确定的。

选取 1960—2017 年数据, 将其每一年的同一日的最高(最低)气温进行升序排列, 然后选取第 90 个百分点为当天的上阈值, 第 10 个百分点为当天的下阈值。在选取的研究年限中, 通过对比, 把每年相同日期的日最低温小于下阈值的确定为冷夜(TN₁₀), 日最低温大于上阈值确定为

暖夜 (TN90)。同样, 将相同日期的日最高温与
 阈值相比, 如果小于下阈值, 则此日确定为冷昼

(TX10), 如果大于上阈值, 则此日确定为暖昼
 (TX90)。

表 1 极端气温指数的定义
 Tab.1 Definition of extreme temperature index

指标分类 Classification	指标名称 Index name	缩写 Abbreviation	定义 Definition	单位 Unit
极值指数 Extreme Index	极端最高气温 Highest T_{\max}	TXx	日最高气温的每年最高值 Monthly highest TX	℃
	极端最低气温 Lowest T_{\min}	TNn	日最低气温的每年最低值 Monthly lowest TN	℃
绝对指数 Absolute index	霜冻日数 Frost days	FD	每年的日最低气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的天数 Annual count of days when $\text{TN} \leq 0^{\circ}\text{C}$	d
	夏季日数 Summer days	SU	每年的日最高气温 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ 的天数 Annual count when TX (daily maximum) $\geq 25^{\circ}\text{C}$	d
相对指数 Relative index	冷夜日数 Cold nights	TN10	日最低气温小于 1960—2017 年阈值 (10%) 的日数 Count of days when $\text{TN} < 10\text{th percentile of } 1960-2017$	d
	冷昼日数 Cold days	TX10	日最高气温小于 1960—2017 年阈值 (10%) 的天数 Count of days when $\text{TX} < 10\text{th percentile of } 1960-2017$	d
	暖夜日数 Warm nights	TN90	日最低气温大于 1960—2017 年阈值 (90%) 的天数 Count of days when $\text{TN} > 90\text{th percentile of } 1960-2017$	d
	暖昼日数 Warm days	TX90	日最高气温大于 1960—2017 年阈值 (90%) 的天数 Count of days when $\text{TX} > 90\text{th percentile of } 1960-2017$	d

2.3 研究方法

采用线性趋势分析法、累积距平值分析法等方法研究丽江的极端气温变化。同时通过 Mann-Kendall 检验法、Morlet 复数小波分析法、主成分分析法, 对 1960—2017 年云南省丽江市气象站点的数据进行了突变和周期性分析。

累积距平值的计算方法如下:

$$LP_i = \sum_{j=1}^i (R_j - \bar{R}) \quad (1)$$

先计算每年的气温距平值, 然后逐年累加, 得到累积距平值。式中: LP_i 为第 i 年的累积距平值, R_i 为第 i 年的气温值, \bar{R} 为气温的多年平均值。

3 结果与分析

3.1 平均气温的年际、季节变化和年平均最高、最低气温变化

从表 2 中可以看出: 在这 58 年中, 各项指标倾向率都呈正值, 说明丽江年平均气温在全球变暖的大背景之下都在波动上升; 各季节气温也在普遍升高。丽江市的春季气温和年平均最低气温上升速率较高, 为 $0.24^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $0.22^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。

由此可知, 丽江地区春季气温和年平均最低气温的升高速率最高, 极端气温升高的主导因素为年最低气温的持续升高。

3.2 极端气温指数线性变化趋势

通过线性趋势分析法, 可以看出各指标气温的趋势变化。对丽江市 1960—2017 年的极端指数进行线性趋势分析和显著性检验, 从而得出各极端气温指数的变化趋势以及线性倾向率 (图 1—3)。倾向率即为图中趋势线方程的斜率。从图 1 中可知: 丽江市极端最高气温、极端最低气温的线性倾向率的数值都为正数, 说明整体气温在逐渐上升。夏季日数的线性倾向率数值为正数, 霜冻日数为负数 (图 2), 由此可以说明丽江市夏季高温日数呈现增多趋势, 而霜冻日数呈现衰减趋势。同时暖昼日数和暖夜日数的线性倾向率为正数 (图 3), 冷昼日数和冷夜日数的线性倾向率的数值为负数, 且暖昼、暖夜日数的倾向率远大于冷昼、冷夜的倾向率, 说明昼夜气温升高的日数正在逐渐增多且呈现一直上升的趋势, 而昼夜低温日数逐渐减少。可见丽江市在近 58 年极端高温事件的发生在增加。

表2 丽江市 1960—2017 年间平均气温的年际、季节变化速率
Tab.2 Annual and seasonal average temperature change rate from 1960 to 2017 in Lijiang

指标 Index	倾向率 Tendency rate $/(\text{°C} \cdot (10\text{a})^{-1})$	平均气温 Average temperature/ °C
年平均气温 Annual average temperature	0.21	12.93
年平均最高气温 Annual average maximum temperature	0.18	19.47
年平均最低气温 Average annual minimum temperature	0.22	7.98
春季气温 Spring temperature	0.24	13.70
夏季气温 Summer temperature	0.19	18.02
秋季气温 Autumn temperature	0.14	12.98
冬季气温 Winter temperature	0.14	6.81

春季为 3—5 月; 夏季为 6—8 月; 秋季为 9—11 月; 冬季为 12 月至第二年 2 月。
Spring is from March to May; Summer is from June to August; Autumn is from September to November; Winter is from December to February.

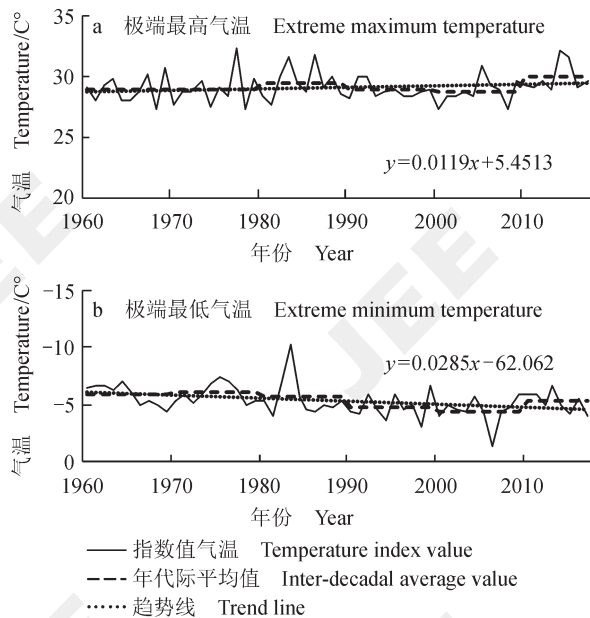


图1 丽江市 1960—2017 年极端最高气温和极端最低气温的变化趋势

Fig.1 Trend of extreme maximum and extreme minimum temperatures from 1960 to 2017 in Lijiang

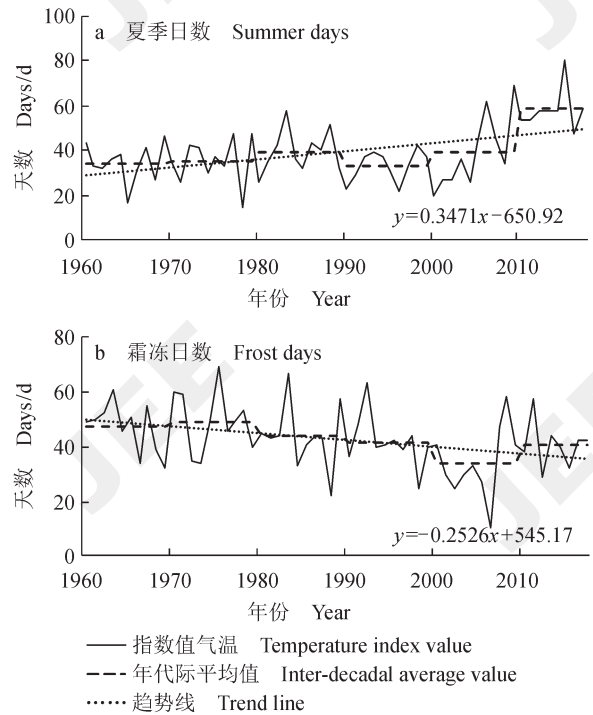


图2 丽江市 1960—2017 年极端气温绝对指数的变化趋势
Fig.2 Trend of extreme temperature absolute index from 1960 to 2017 in Lijiang

从图 1a 可知: 丽江市的极端最高气温线性倾向率为 $0.12\text{°C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 说明年极端最高气温在逐年增加, 呈上升趋势。近 58 年来, 丽江市极端最高气温最大值出现在 1977 年, 为 32.3°C , 最小值出现在 1968 年, 为 28.2°C 。从年代际变化来看, 丽江市极端气温在 1980—1988 年气温较高, 始终保持在 29.5°C 左右, 2010—2017 年达到第 2 个气温较高期, 保持在 29.9°C 左右。丽江市极端气温年际变化在 20 世纪 60 年代到 80 年代出现一段气温较大值, 在 21 世纪初又出现了一个较大幅度的提升。从图 1b 可知: 丽江市的极端最低气温线性倾向率为 $0.29\text{°C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 整体气温呈上升趋势, 且丽江市在 1983 年前后和 2013 年前后均出现一段气温较低值。近 58 年来, 丽江市的极端最低气温最高值出现在 2006 年, 为 -1.3°C , 最低值出现在 1983 年, 为 -10.3°C 。从年代际变化来看, 丽江市于 1990—1999 年、2000—2008 年出现了两个连续气温升高的气温较大值时段, 分别稳定在 -4.7°C 、 -4.4°C 左右。21 世纪初丽江市出现极端最低气温的较大值。

从图 2 得知: 近 58 年来, 丽江市夏季日数线性倾向率的数值为正数, 霜冻日数线性倾向率的

数值为负数,说明年夏季日数在逐年增加,霜冻日数在逐年递减。丽江市的夏季日数线性趋势分

析(图 2a)中得知倾向率为 $3.47 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 升高趋势较为明显。

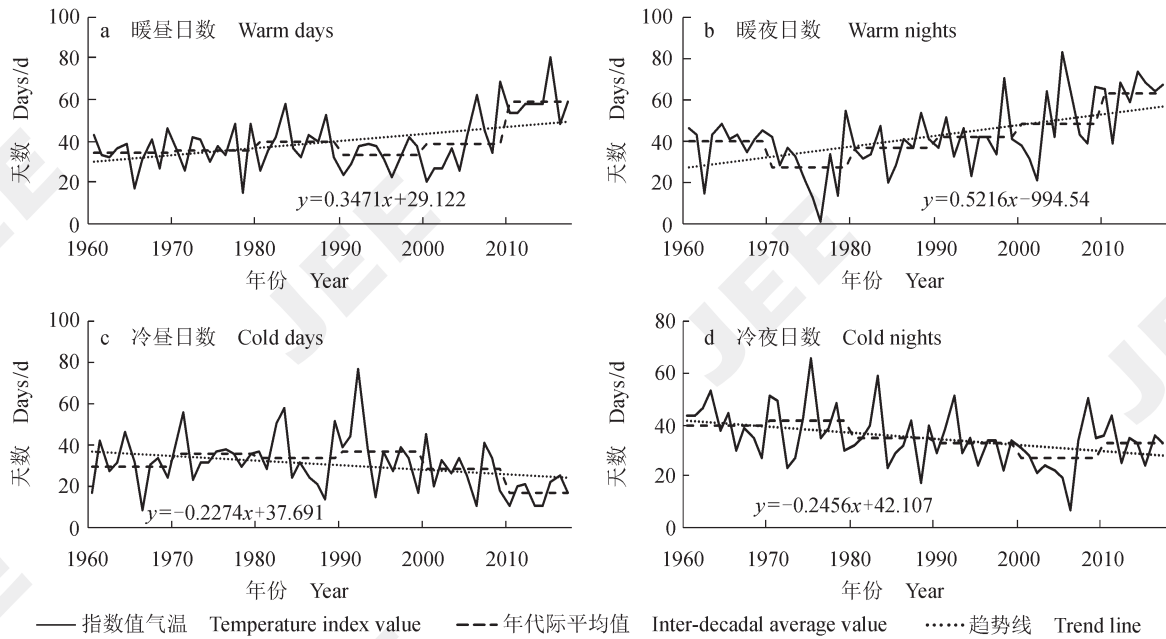


图 3 丽江市 1960—2017 年极端气温相对指数的变化趋势

Fig.3 Variation trend of the relative index of extreme temperature from 1960 to 2017 in Lijiang

由丽江市夏季日数线性趋势(图 2a)可知:夏季日数最大值出现在 2015 年,达到 80 天,最小值出现在 1978 年,只有 15 天。从年代际变化来看,丽江市夏季日数都呈阶段性上升,在 1990—1999 年、2000—2009 年出现一段回落时期,其夏季日数分别为 33 天、39 天左右,而 2010—2017 年达到夏季日数最多时期,稳定在 59 天左右。

从丽江市霜冻日数线性趋势(图 2b)来看:霜冻日数最大值出现在 1975 年,为 75 天,最小值为 2006 年,只有 10 天。从年代际变化来看,丽江市霜冻日数是从 1960—1999 年递减,而在 2000—2017 年有了较小幅度的回升,稳定在 41 天左右。可以明显看出,丽江市常年霜冻日数呈逐年递减趋势。

从图 3 可知:丽江市 58 年来的暖昼日数、暖夜日数的线性趋势倾向率的数值都为正数,表明暖昼、暖夜日数呈现上升趋势。而冷昼、冷夜日数的线性趋势倾向率数值都为负数,说明其冷昼、冷夜日数在逐年减少。丽江市暖昼日数的线性趋势为波动上升,倾向率为 $3.47 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,说明丽江市暖昼日数呈现逐年增加趋势。暖昼日数最大值出现在 2015 年,为 80 天,最小值出现在 1978

年,为 15 天。从年代际变化来看,丽江市暖昼日数总体呈现波动上升趋势,但在 1990—1999 年、2000—2009 年出现两段回落时段,分别为 33 天、39 天左右。丽江市暖昼日数在 2010—2017 年最多,稳定在 59 天左右,是近年来的暖昼日数最多时期。丽江市暖夜日数线性趋势也呈现波动上升特点,且倾向率的数值也为正数。丽江市暖夜日数最大值出现 2005 年,为 83 天,最小值出现在 1976 年,仅为 1 天。从年代际变化来看,暖夜日数最少时期出现在 1970—1979 年,为 28 天左右,而暖夜日数最多时期也出现在 2010—2017 年,为 63 天左右。

由图 3c 可知:丽江市冷昼日数线性趋势倾向率为 $-2.28 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,表明冷昼日数呈现递减趋势。丽江市冷昼日数最高值出现在 1992 年,为 77 天,最低值出现在 1966,为 9 天。从年代际变化来看,丽江市于 2010—2017 年出现冷昼日数最少时期,稳定在 17 天左右。由图 3d 得知:丽江市冷夜日数线性趋势倾向率为 $-2.46 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,表明丽江市冷夜日数呈现递减趋势。丽江市冷夜日数最大值出现在 1975 年,为 66 天,最小值出现在 2006 年,为 7 天。从年代际变化来看,丽江市冷夜日数持

续递减, 在 2010—2017 年出现了一段较小幅度的回升, 稳定在 33 天左右。

3.3 极端指数的累积距平分析

采用累积距平值分析的方法对 1960—2017 年丽江市各数据进行处理, 得到各极端指数的累积距平值图(图 4)。由图 4a 可知: 丽江市极端最高气温累积距平在 1960—1975 年期间呈大幅度下降趋势, 1975—1992 年期间呈波动上升趋势, 1992—2008 年又为下降趋势, 2008—2017 呈大幅度上升趋势。极端最低气温累积距平以 1983 年为界, 1983 年以前呈现大幅度波动下降趋势, 1983 年后呈现大幅度波动上升趋势。丽江市极端最高气温、最低气温累积距平值在 1960—2017 年以来基本呈负值。

图 4b 中绝对指数的累积距平值显示: 丽江市夏季日数累积距平值为负值, 霜冻日数的累积距平值为正值。夏季日数累积距平大约以 2003 年为界, 2003 年以前呈大幅度波动下降趋势, 2003

年后呈大幅度上升趋势。霜冻日数累积距平趋势线大约以 1987 年为界, 1987 年以前波动上升, 1987 年后呈下降趋势。丽江市相对指数中暖昼、暖夜的累积距平值都为负数(图 4c), 冷昼、冷夜的累积距平值基本都为正数(图 4d), 说明累积距平值的正负与各日数的增多与减少呈负相关关系。从图 4c 中可见丽江市的暖夜日数、暖昼日数累积距平趋势线都十分接近, 且大概以 2002 年为分界点, 2002 年以前暖夜、暖昼日数累积距平趋势线都呈大幅度波动下降, 而 2002 年以后又大幅度上升。冷昼日数累积距平线性趋势线以 1993 年为分界点, 1993 年以前呈现波动上升趋势, 1993 年以后则波动下降。而冷夜日数累积距平趋势线在 1960—1983 年处于波动上升趋势, 1983—1992 年则呈现波动变化, 升降趋势不明显, 1992—2006 年冷夜日数累积距平快速减少为 0, 而 2006—2017 年则有一小段回升, 但最终还是下降为 0。

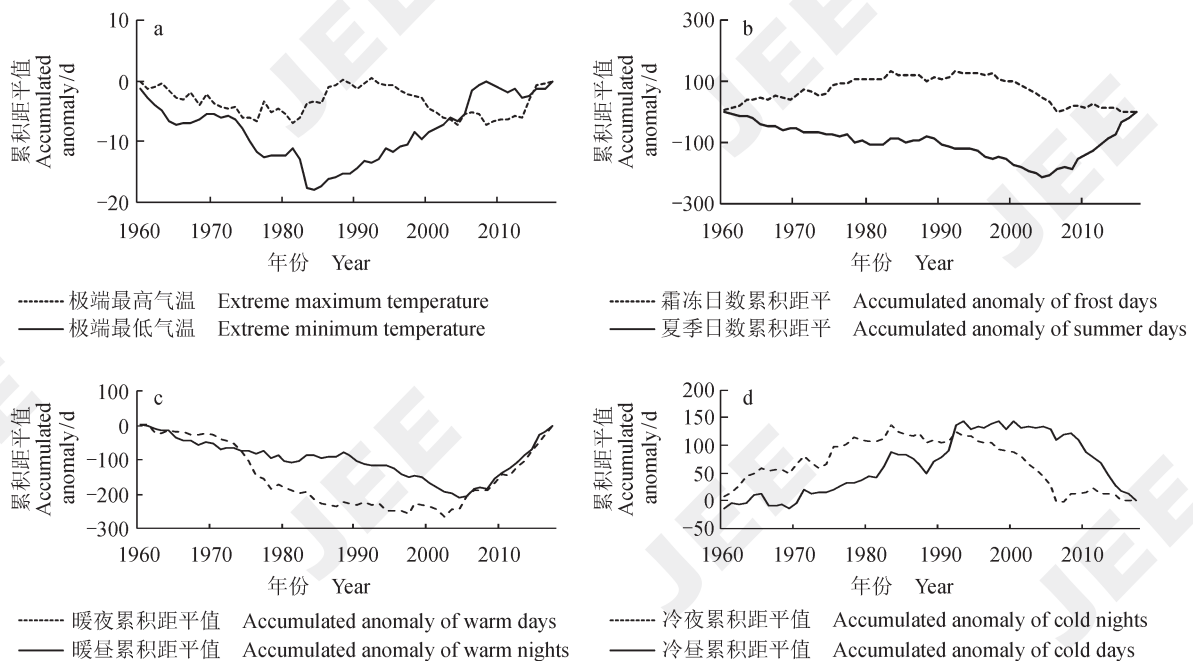


图 4 丽江市 1960—2017 年极端气温指数的累积距平值变化

Fig.4 Cumulative anomaly map of the extreme temperature index from 1960 to 2017 in Lijiang

3.4 极端气温指数的变化周期

利用 Matlab 软件对丽江各极端气温指数进行周期分析, 得出各指数的 Morlet 复小波变换系数分析图和小波方差图(图 5、图 6), 由此可以研

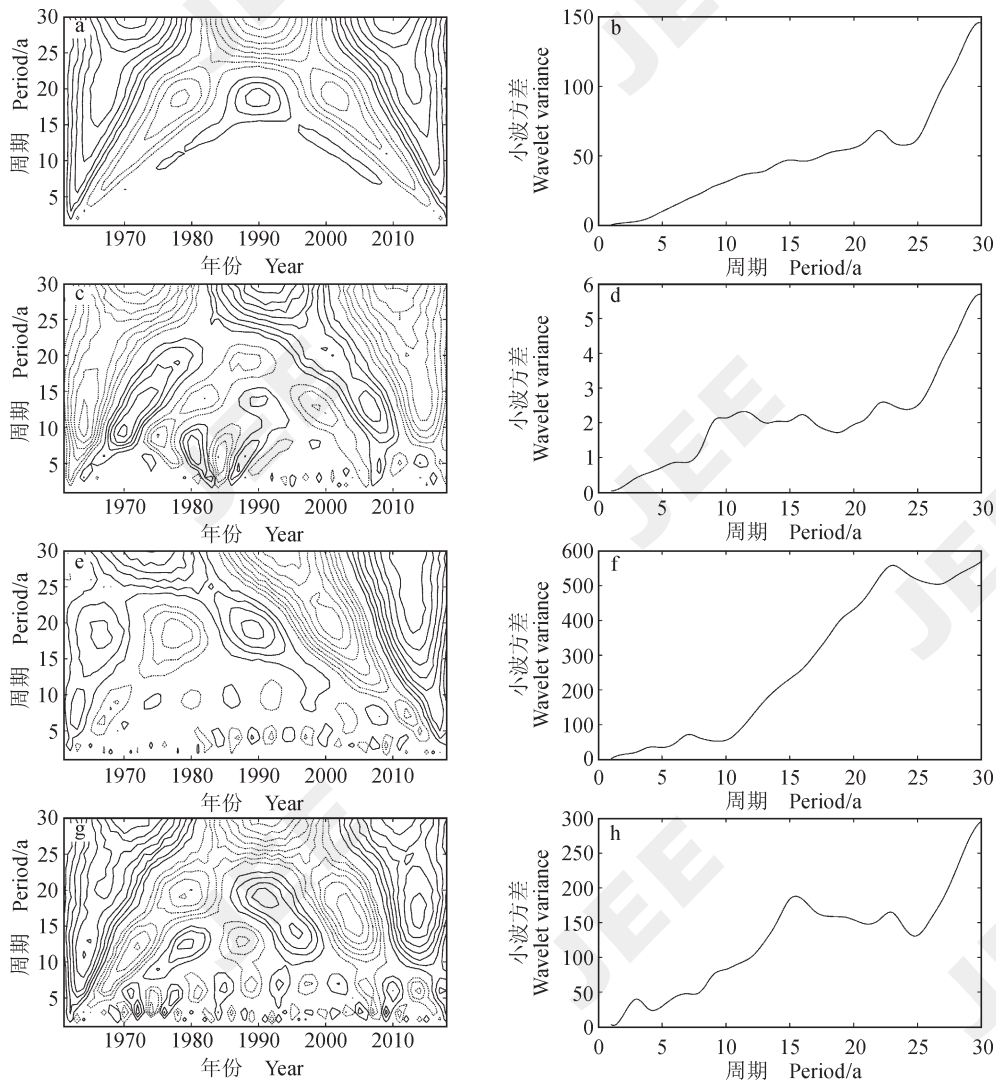
究丽江市近 58 年极端气温变化的周期。

通过丽江极端最高气温小波变换系数(图 5a)和小波方差(图 5b)可知: 丽江市年极端最高气温的振荡周期为 12 年、18 年、30 年, 其中 30 年

为主周期，贯穿了整个研究时期，其次为18年周期，经历了4个周期的高一低循环，12年周期不太明显。丽江市极端最低气温出现了7年、9年、12年、18年、22年和30年的周期规律（图5c、d）。由此可知，丽江地区极端气温极值指数大多数存在12年、18年、30年左右的明显周期变化，周期性较为显著的是18年。

由图5e、f可得：丽江夏季日数存在3年、6年、7年、18年、24年、30年的周期，其中18年

与30年的振荡周期在整个研究时段都非常明显，表明周期性较强，4年周期在1980年后较为连续。丽江市的霜冻日数的振荡周期分别为3年、8年、12年、18年、23年、30年（图5g、h），18年和30年的周期性较为显著，18年为主要周期，8年周期经历了多个高一低的循环，23年周期不太明显。总体而言，丽江市的夏季日数和霜冻日数的振荡周期为8年、18年、30年，且每个绝对指数在18年周期都较为显著，可以认为是第1主周期。



a、b: 极端最高气温; c、d: 极端最低气温; e、f: 夏季日数; g、h: 霜冻日数。

a, b: extreme maximum temperature; c, d: extreme minimum temperature; e, f: summer days; g, h: frost days.

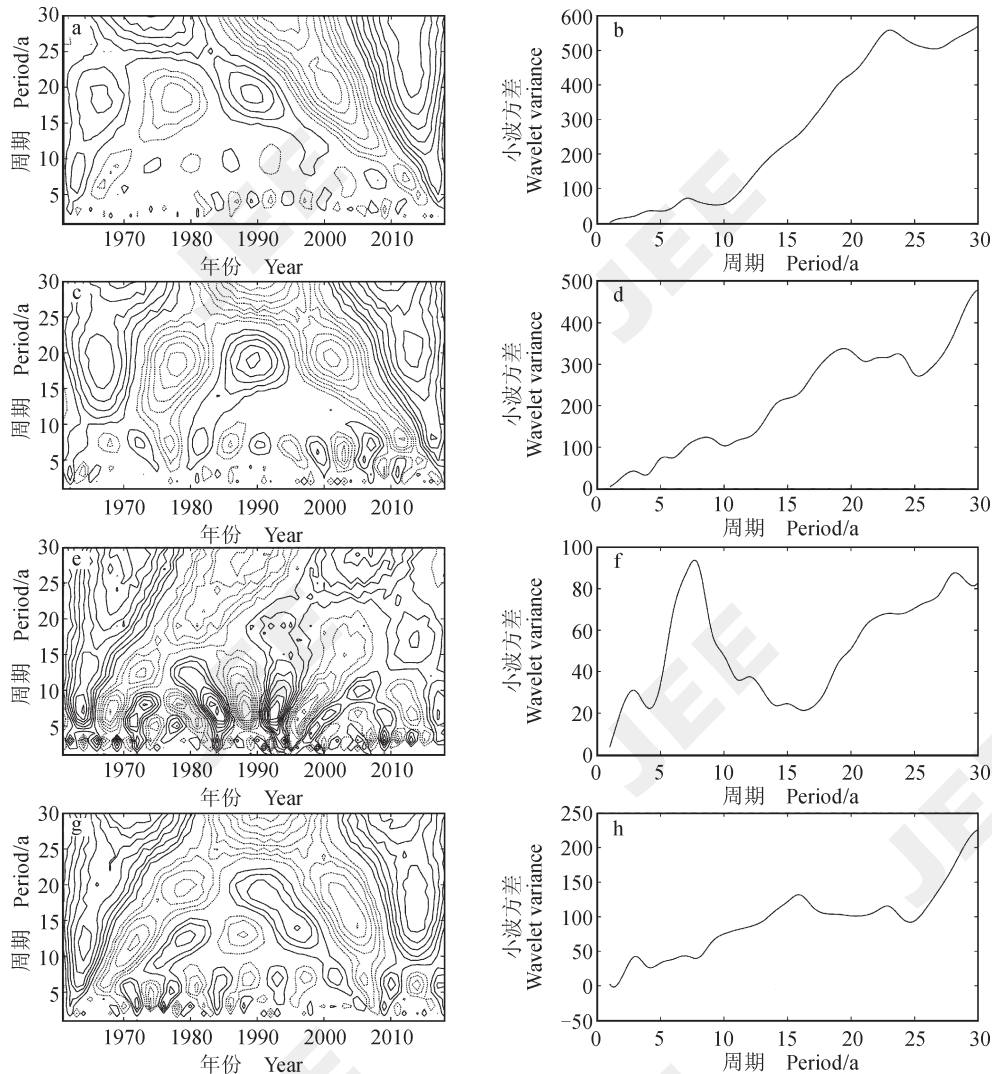
图5 丽江市1960—2017年极端气温极值指数和绝对指数的小波变换系数与方差图
Fig.5 Wavelet transform coefficients and variogram of extreme temperature extremes and absolute temperature index from 1960 to 2017 in Lijiang

由图6a、b可知：丽江市暖昼日数的振荡周期分别出现在4年、7年、8年、18年、30年，其

中4年、8年、18年的周期较为显著，4年周期在1980年以后较为明显，18年周期性几乎贯穿了整

个研究时段。丽江市暖夜日数有 3 年、8 年和 18 年这 3 个准周期 (图 6c、d), 其中 3 年周期不太明显, 8 年和 18 年的周期性较为显著。根据丽江

市暖夜小波分析 (图 6c) 推测, 还有一个振荡周期为 32 年。综上可知, 丽江市暖指数的周期以 8 年和 18 年较为显著。



a、b: 暖昼日数; c、d: 暖夜日数; e、f: 冷昼日数; g、h: 冷夜日数。
a, b: warm days; c, d: warm nights; e, f: cold days; g, h: cold nights.

图 6 丽江市 1960—2017 年极端气温相对指数的小波变换系数与方差图
Fig.6 Wavelet transform coefficients and variance diagrams of the relative air temperature index from 1960 to 2017 in Lijiang

丽江市冷昼日数的振荡周期分别为 2 年、5 年、8 年、12 年、18 年、22 年, 无明显贯穿整个研究时段的周期, 8 年周期比其他周期连续 (图 6e、f)。丽江市 5 年周期在 1970—1990 年较为规律, 18 年周期较不明显。丽江市冷夜日数存在 3 年、5 年、12 年、18 年周期, 图 6g 显示 5 年周期较为连续, 而 12 年的周期性较为显著, 从图中推测 32 年也是丽江冷昼的一个振荡周期。综上可知, 丽

江市 12 年、18 年左右为较强的周期。

4 讨论

4.1 对气温升高起主要作用的气温指数

利用主成分分析, 可以确定不同气温指数对气温升高贡献的大小。利用软件 IBM SPSS Statistics 20 对 1960—2017 年以来丽江气象站点的各极端气温指数进行主成分分析, 得到主成分与因子之

间的相关系数载荷矩阵(表 3、表 4), 主成分为各极端气候指数指标。丽江市 6 个主成分的方差贡献率总和达到 99.44%, 几乎涵盖了几乎所有信

息。据表 3 可知: 丽江市前 2 个主成分之和的方差贡献率可达到 74.86%, 已经符合分析要求, 可以对这 2 个主成分进行因子分析。

表 3 丽江市 1960—2017 年极端气温指数的因子分析、相关系数
Tab.3 Factor analysis of the extreme temperature index from 1960 to 2017 in Lijiang

指数	丽江主成分载荷 Main component load of Lijiang					
	1	2	3	4	5	6
极端最高气温 TXx	0.57	0.58	0.24	-0.37	0.25	-0.29
极端最低气温 TNn	0.46	-0.66	0.33	0.20	0.44	0.14
霜冻日数 FD	-0.70	0.64	0.03	0.20	0.19	0.01
夏季日数 SU	0.79	0.55	-0.06	0.01	-0.02	0.24
暖昼日数 TN10	0.79	0.55	-0.06	0.01	-0.02	0.24
冷昼日数 TX10	-0.63	0.21	0.69	-0.11	-0.20	0.17
暖夜日数 TN90	0.77	0.14	0.27	0.45	-0.23	-0.25
冷夜日数 TX90	-0.68	0.64	-0.09	0.25	0.19	-0.03
方差贡献率 Variance contribution rate	46.68%	28.18%	9.09%	6.22%	5.30%	3.97%

表 4 丽江市 1960—2017 年极端气温指数的相关系数
Tab.4 Correlation coefficient of extreme temperature index from 1960 to 2017 in of Lijiang

指数 Indices	极端最高气温 TXx	极端最低气温 TNn	霜冻日数 FD	夏季日数 SU	暖昼 TX90	冷昼 TN10	暖夜 TN90
极端最低气温 TNn	-0.044						
霜冻日数 FD	-0.054	-0.603**					
夏季日数 SU	0.676**	0.005	-0.206				
暖昼 TX90	0.676**	0.005	-0.206	1.000**			
冷昼 TX10	-0.129	-0.287*	0.534**	-0.384**	-0.384**		
暖夜 TN90	0.430**	0.298*	-0.398**	0.616**	0.616**	-0.322*	
冷夜 TN10	-0.075	-0.628**	0.947**	-0.191	-0.191	0.436**	-0.377**

** 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。

** indicates a significant correlation at the 0.01 level (both sides) and * indicates a significant correlation at the 0.05 level (both sides).

丽江市第 1 成分的方差贡献率达到了 46.68%, 夏季日数、暖昼日数、暖夜日数的载荷值都较高, 绝对值均大于 0.75, 三者之间又呈现互相极显著正相关(表 4), 从而表明这 3 个指数对丽江市气温升高起到了主要作用。从丽江市各极端气温指数的主成分分析中可以得出, 夏季日数和暖昼日数增加是引起气温升高的主要因素, 暖夜增加对气温升高也起了一定作用。总体上看, 暖指数与冷指数之间负相关, 各冷指数之间互为正相关, 各暖指数互为正相关, 与图 1—3 所表现出的各指数线性趋势分析结果具有一致性。

4.2 极端气温指数的突变分析

气温突变是气温在一个临界点发生不连接的大转变。利用 Matlab 软件中的 Mann-Kendall 突变

分析对丽江市近 58 年连续时间序列中的各极端指数进行分析, 从而找出时间序列内的标志性突变年份, 这对研究极端气温有着极其重要的作用。本文 Mann-Kendall 突变分析图的临界线均通过极显著相关($p < 0.01$)。

由图 7a 可知: 丽江市极端最高气温的气温随着时间变化发生波动上升—下降—上升, 与图 4 中累积距平值变化曲线的变化趋势呈现一致性, 且丽江市年极端最高气温正、反序列线(UF、UB)的交点分别为 2013 年和 2016 年, 由累积距平值(图 4)可知在 2010—2017 年丽江气温发生了大幅度的升高, 所以两交点为丽江的升温突变年。观察丽江市极端最低气温的正反时间序列曲线(图 7b)可知, 气温随时间变化发生上升—下

降—上升—小幅度下降, 与其累计距平值(图4)的变化趋势一致。由图7b可知: 正、反序列曲线的交点为1967年、1972年、1978年、1983年, 由丽江市极端最低气温线性趋势(图1)可知, 1983年为58年来的气温最低值, 所以可以明确1983年为丽江的气温降低突变年。

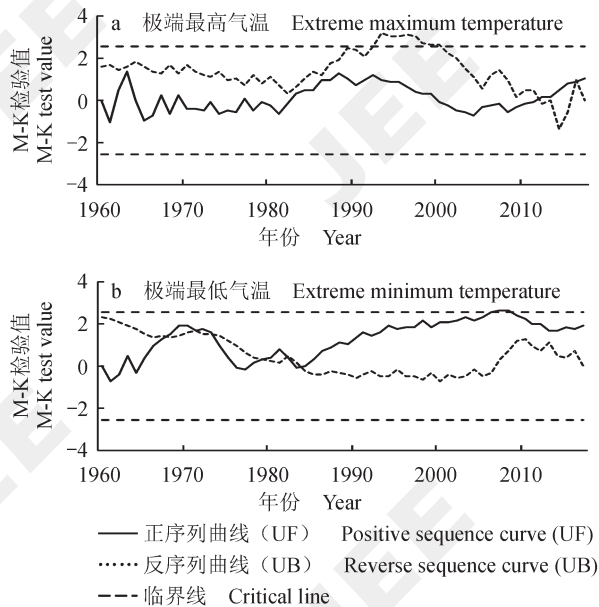


图7 丽江市 1960—2017 年极端气温极值指数的 Mann-Kendall 检验

Fig.7 Mann-Kendall test of extreme temperature extreme value index from 1960 to 2017 in Lijiang

由图8a可知: 丽江夏季日数的变化趋势为波动上升—下降—上升, 与其累积距平值(图4)一致。正、反时间序列曲线的交点为2011年, 从线性趋势分析图2可知: 丽江市夏季日数在2010—2017年达到最大值, 所以2011年是夏季日数增加的突变年。丽江市霜冻日数的变化趋势(图8b)为波动下降—小幅度上升, 与累积距平值图趋势一致, 且正、反时间序列曲线的交点为1981年、1982年、1983年。由丽江市霜冻日数线性趋势变化(图2)可知: 1983年丽江出现霜冻日数极大值, 因此可以认为1983年为霜冻日数增多突变年。

在丽江市的相对指数(图9)中, 暖昼日数、暖夜日数的变化呈波动下降—波动上升, 这与它们各自的累积距平值图(图4)一致。图9中丽江市的暖昼日数突变年出现在2012年, 暖夜日数的突变年出现在2009年。

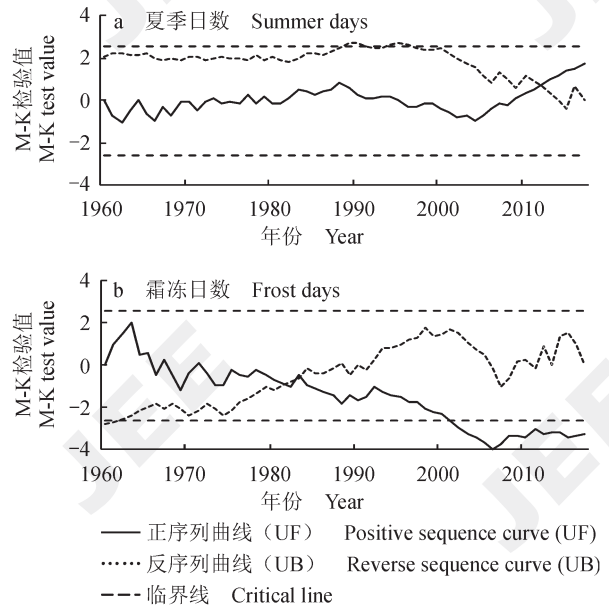


图8 丽江市 1960—2017 年极端气温绝对指数的 Mann-Kendall 检验

Fig.8 Mann-Kendall test of absolute temperature absolute index from 1960 to 2017 in Lijiang

丽江市冷昼、冷夜日数的变化趋势(图9c、d)都大致为波动下降, 与其线性趋势分析图(图3)中的变化趋势呈现一致性。丽江市冷昼日数的正、反时间序列曲线相交于2005年、2007年, 在其累积距平值(图4)中2005年出现一个较小值, 而在线性趋势(图3)中2005年出现冷昼日数极小值, 2007年出现极大值, 可知2005年为丽江市冷昼日数减少的突变年, 2007年为冷昼日数增多突变年。丽江市冷夜日数的正反序列线的交点为1967年、1969年、1972年、1973年、1976年、1978年, 从其线性趋势分析(图3)得知1972—1975年冷夜日数发生巨大改变, 所以推测1973年是较为显著的突变年。

前人在气候变暖方面的研究已有许多不同的见解(方修琦, 2011), 普遍认为除了太阳辐射、大气环流和地表状况等自然因素造成的影响之外, 人类活动因素也是不容忽视的因素。近百年来人类生活生产与经济建设飞速发展, 土地利用、人口暴增、植被破坏和生活中温室气体大量排放促进甚至决定了气候变暖, 从而使气温发生极端变化的几率大为增加。

4.3 极端气温变化可能造成的气象灾害与预测

研究分析得出: 丽江各暖指数日数的增加, 各冷指数日数的减少, 使得气候变暖十分明显,

极端高温事件发生频率升高。极端高温事件的发生影响了降水的发生以及降水量的多少,带来干

旱、洪涝灾害(王绍武, 1993)。气温高引起蒸发与蒸腾加强,促使干旱发生。

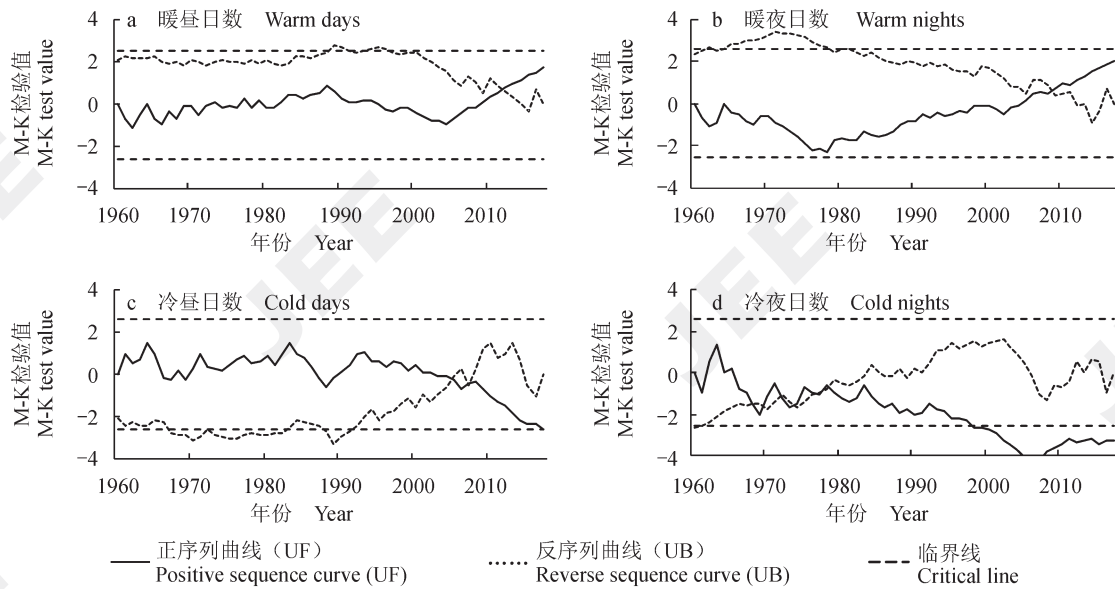


图9 丽江市1960—2017年极端气温相对指数Mann-Kendall检验

Fig.9 Mann-Kendall test of relative index of extreme temperature from 1960 to 2017 in Lijiang

由各极端指数线性趋势(图1—3)年代际变化可知:在2010—2017年丽江市各暖指数日数都呈现上升趋势且年代际平均气温达到近58年来最大值,各冷指数日数呈现日益减少的趋势。综合各极端指数的年代际变化可以预测丽江市未来2—3年的气温仍会呈现上升趋势,且极端高温事件的发生频率会有一定升高。丽江是云南称为旅游大省的标志性旅游区,随着极端气温事件的增多,会严重影响到游客的直观旅游感受,对当地主打气候温和的旅游宣传带来了不利影响,所以加强预防极端气温事件的发生成为发展云南旅游经济的重要手段。

5 结论

通过对云南省丽江气象站点1960—2017年近58年中的8个极端气温指数的研究,可得出以下几点结论:

(1) 近58年来,丽江的极端最高气温、极端最低气温、夏季日数、暖昼日数、暖夜日数都呈现上升趋势,冷昼日数、冷夜日数、霜冻日数呈现下降趋势,且暖指数上升趋势较为明显,倾向率普遍大于冷指数倾向率绝对值,说明近58年云南省丽江地区发生极端高温事件的概率在增大。

(2) 主成分分析可知,夏季日数和暖昼日数

的增加对丽江地区气温升高起到了主要作用,暖夜日数增加对气温升高也起到了一定作用。

(3) 突变分析表明,丽江地区暖指数的突变年主要出现在21世纪初,而冷指数的突变年主要出现在1983年与2003年前后。可以确定,云南丽江地区的极端气温变化主要表现为冷指数值突变减小与暖指数值突变升高。

(4) Morlet小波分析可知,丽江地区各指数的明显主振荡周期普遍为18年,具有较好的对称性,极端最高气温与夏季日数也存在较显著12年、30年的周期。

(5) 极端气温事件的增多使该区旱灾增多,高温天气增多,预测丽江市未来3—4年的气温仍会呈现上升趋势,且极端高温事件的发生频率呈现上升趋势。此外,极端气温事件的增多会影响到游客的直观旅游感受,对该地区旅游业有不利影响,应当加强对极端气温事件的预报和预防。

参考文献

- 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 2011. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社. [Committee of "The Second National Assessment Report on Climate Change". 2011. The Second National Assessment Report on Climate Change [M]. Beijing: Science Press.]

- 《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 [M]. 北京: 科学出版社. [Committee of "China's National Assessment Report on Climate Change". 2007. China's national assessment report on climate change [M]. Beijing: Science Press.]
- 陈艳, 段旭, 董文杰, 等. 2013. 云南不同气候带极端气温变化趋势 [J]. 气象科技, 41(1): 126–130. [Chen Y, Duan X, Dong W J, et al. 2013. Trends of extreme temperature under different climate backgrounds in Yunnan Province [J]. *Meteorological Science and Technology*, 41(1): 126–130.]
- 方琦修. 2011. 全球变暖的多角度透视 [J]. 地理教育, (9): 4–6. [Fang X Q. 2011. Multi-angle perspective of global warming [J]. *Education of Geography*, (9): 4–6.]
- 高志伟, 严华生. 2009. 云南近 46 年气温突变特征分析 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 31(S1): 260–264. [Gao Z W, Yan H S. 2009. Analysis on catastrophe feature of Yunnan temperature in recent 46 years [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 31(S1): 260–264.]
- 王绍武. 1993. 全球气候变暖的检测及成因分析 [J]. 应用气象学报, 4(2): 226–236. [Wang S W. 1993. The detection of global climate warming and its causes [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 4(2): 226–236.]
- 王晓, 李佳秀, 石红彦, 等. 2014. 1960—2011 年云南省极端气温事件的时空分布及趋势预测 [J]. 资源科学, 36(9): 1816–1824. [Wang X, Li J X, Shi H Y, et al. 2014. The temporal-spatial distribution and prediction of extreme temperature events in Yunnan Province from 1960 to 2011 [J]. *Resources Science*, 36(9): 1816–1824.]
- 解明恩, 程建刚, 范波, 等. 2005. 2003 年云南夏季罕见高温干旱的诊断研究 [J]. 气象, 31(7): 32–37. [Xie M E, Cheng J G, Fan B, et al. 2005. Diagnosis of high temperature and drought event in summer 2003 in Yunnan [J]. *Meteorological Monthly*, 31(7): 32–37.]
- 袁晓玉, 马德贞. 2005. 2003 年江南干旱的成因分析 [J]. 气象, 31(7): 37–41. [Yuan X Y, Ma D Z. 2005. Analysis of drought cause in south of Yangtze River in summer 2003 [J]. *Meteorological Monthly*, 31(7): 37–41.]
- 张宁, 孙照渤, 曾刚. 2008. 1955—2005 年中国极端气温的变化 [J]. 南京气象学院学报, 31(1): 123–128. [Zhang N, Sun Z B, Zeng G. 2008. Change of extreme temperatures in China during 1955—2005 [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 31(1): 123–128.]
- 张万诚, 郑建萌, 马涛, 等. 2015. 1961—2012 年云南省极端气温时空演变规律研究 [J]. 资源科学, 37(4): 710–722. [Zhang W C, Zheng J M, Ma T, et al. 2015. Temporal and spatial distribution and variation of extreme temperatures in Yunnan Province from 1961 to 2012 [J]. *Resources Science*, 37(4): 710–722.]
- 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]. 气候与环境研究, 15(4): 405–417. [Zhou Y Q, Ren G Y. 2010. Variation characteristics of extreme temperature indices in Mainland of China during 1956—2008 [J]. *Climate and Environment Research*, 15(4): 405–417.]
- Kim K Y, Kim J W, Kim M K, et al. 2013. Future trend of extreme value distributions of wintertime surface air temperatures over Korea and the associated physical changes [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(5): 675–685.
- Lee W V. 2014. Historical global analysis of occurrences and human casualty of extreme temperature events (ETEs) [J]. *Natural Hazards*, 70(2): 1453–1505.
- Poumadère M, Mays C, Le Mer S, et al. 2005. The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now [J]. *Risk Analysis*, 25(6): 1483–1494.
- You Q L, Kang S C, 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(11/12): 2399–2417.