

引用格式:朱大运,熊康宁,肖华. 贵州省极端气温时空变化特征分析[J]. 资源科学, 2018, 40(8):1672-1683. [Zhu D Y, Xiong K N, Xiao H. Analysis of temporal and spatial variation of extreme temperature in Guizhou Province[J]. *Resources Science*, 2018, 40(8):1672-1683.] DOI :10.18402/resci.2018.08.16

贵州省极端气温时空变化特征分析

朱大运^{1,2}, 熊康宁^{1,2}, 肖 华^{1,2}

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001;

2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要:随着全球变暖趋势加剧,西南地区极端天气事件频发,对国民经济发展和生态环境保护构成了严重威胁。利用1960—2016年33个气象站点的逐日气温数据集,采用线性趋势、滑动平均、空间插值、M-K突变检验等方法,对贵州极端气温时空变化特征及影响因素进行分析。结果表明:贵州极端气温暖系列指数呈上升趋势,夏日日数、暖日日数、热持续指数、热持续发生次数的年际变化倾向率分别为:0.6d/10a、2.7d/10a、0.02d/10a、0.2次/10a;冷系列指数呈下降趋势,霜冻日数、冷夜日数、冷持续指数、冷持续发生次数的年际变化倾向率分别为-1.6d/10a、-8.0d/10a、-0.5d/10a、-1.0次/10a,进入21世纪后升温速度加快。极端气温表现出非对称性现象,冷系列极端气温指数变化幅度大于暖系列指数,其中暖日日数升幅最大,冷夜日数降幅最大,且与海拔关系密切。多数极端气温指数突变发生在19世纪末到21世纪初。厄尔尼诺对暖系列指数影响较大;拉尼娜对冷系列指数影响较大,在次年其影响程度达到最高水平。

关键词:极端气温指数;时空变化特征;ENSO;贵州省

DOI :10.18402/resci.2018.08.16

1 引言

当前,气候变化已经成为影响人类社会可持续发展的重大问题之一^[1]。随着气候变暖不断加剧,极端气候事件发生的频率和强度显著增加,给人们的生活与生态环境造成了巨大损失^[2,3],极端气候由此成为国家社会广泛关注的热点问题^[4,5]。

中国是世界上极端气候危害最严重的国家之一^[6],在全球地表明显增温的大背景下,对极端温度事件的研究显的尤为重要^[7]。以地面气象观测数据为基础,极端温度事件在研究方法与研究内容上都取得了一系列成果,线性回归、趋势分析、突变检验、小波分析、R/S分析、相关性分析、空间分析、数值模拟等方法逐步被应用到极端气候事件研究中,多种方法的综合应用极大的拓展了研究角度和深度^[5,7-11]。在

极端事件研究内容上众学者主要从发展趋势、空间变异特征、模拟预估等多方面,对长江流域^[7]、淮河流域^[8]、珠江流域^[9]、沿海地区^[10]、西北地区^[11]等地极端气温进行了分析,研究成果总体反映出近几十年全国各地极端气候事件增加,气候暖向变化的主体特征。

对西南地区而言,发生在2005—2006年、2009—2010年的2次异常干旱事件更是引起了研究者对该区极端气候的深入关注。贺晋云等^[12]从季风的角度研究了过去50a西南地区极端干旱气候变化特征;蒋兴文等、沈爱华等探析了冬季、春季气温异常变化原因,指出西太平洋副热带高压、厄尔尼诺、热带海温场以及南方涛动与冬春季节气候异常关系密切^[13,14];袁文德等、刘琳等对西南地区极端气温指数研究表明,总体上极端高温事件和极端低温事件

收稿日期:2017-09-24;修订日期:2018-04-03

基金项目:贵州省国内一流学科建设项目(黔科教研发[2017]85号);贵州省科学技术基金(黔科合基础[2016]1101);贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2018]2777)。

作者简介:朱大运,男,河南信阳人,博士,主要研究方向为区域气候变化与喀斯特资源环境。E-mail: zhudayun163@163.com

通讯作者:熊康宁, E-mail: xiongkn@163.com

2018年8月

分别呈上升和下降趋势,但是在空间分布上差异很大,突显出西南山区气温变化的复杂性和特殊性^[15,16]。

贵州地处云贵高原,受南亚季风和东亚季风的双重影响^[17],地形地貌条件特殊,对气候变化的响应敏感而复杂,但是有关极端气温的研究却很少。本文通过极端气候指数分析贵州极端气温变化特征及其影响因素,以期应对气候变化和防灾减灾提供科学参考依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

1960—2016年贵州省33个国家地面标准观测站(站点分布见图1)的逐日平均气温、最高气温、最低气温等数据来源于中国气象科学数据共享服务网^[18]。各站点气象数据均经过严格的质量控制和均一性检验,对个别缺失数据采用相邻站点线性回归方法进行插补,保证经过处理修正后的气象数据具有很好的连续性,然后基于RClimDex软件对数据异常值与错误值进行过滤筛选,以满足分析要求。

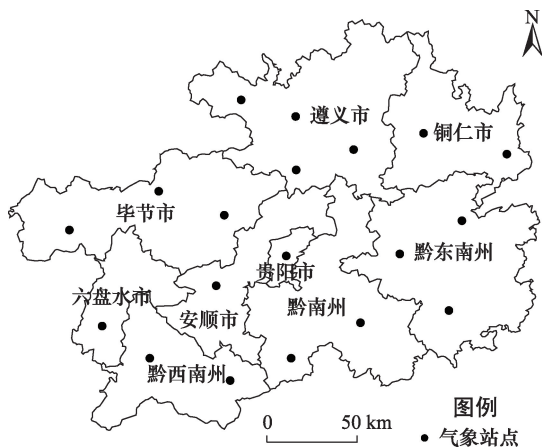


图1 贵州省气象站点分布示意

Figure 1 Location of the meteorological stations in Guizhou Province

2.2 研究方法

关于极端气候,世界气象组织气候(WMO)委员会发布了27个极端气候指数及其定义标准,其中包括16个极端气温指数,这些指数具有较弱的极端性、噪声低、显著性强等优点,在各国极端气候研究中得到广泛使用^[19]。综合目前国际最流行的百分位阈值法和贵州气候变化的实际情况,选取6个极端指数,并自定义增加2个辅助指数,共计8个极端气温指数用作本文极端气温事件分析(表1)。

表1 极端气温指数定义

名称/单位	缩写	定义
霜冻日数/d	FD0	一年中日最低温<0℃的日数
冷夜日数/d	TN10P	日最低气温<10%分位值的日数
冷持续指数/d	CSDI	连续6日最低温在10%分位值日数
冷持续发生次数/次	CSDIN	冷持续指数发生次数
夏日日数/d	SU25	日最高气温>25℃的日数
暖日日数/d	TX90P	日最高温>90%分位值的日数
热持续指数/d	WSDI	连续6日最高温在90%分位值日数
热持续发生次数/次	WSDIN	热持续指数发生次数

采用一元线性回归法和反距离加权插值法分析极端气候时空变化特征,运用Mann-Kendall(M-K)法进行突变性检验。

线性回归是一种非常实用有效的表征序列变化趋势和变化倾向性的分析方法,在气候变化研究中运用广泛。公式如下:

$$y_i = a + bx_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中 y_i 为样本量为 n 的某一极端气候要素变量; x_i 为 y_i 所对应的年代; a 为常数; b 为回归系数; n 为样本数量。

反距离加权插值法是一种常用而简便的空间插值方法,它以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点赋予的权重越大。公式如下:

$$Z = \sum_{i=1}^n (Z_i \cdot W_i) / \sum_{i=1}^n W_i \quad (2)$$

式中 n 为气象观测站点的数目; Z 为估计站点的气象数据值; Z_i 为气象数据在第 i 个站点的实测值; W_i 为第 i 个站点的权重系数。

Mann-Kendall(M-K)突变检验是世界气象组织推荐的一种非参数的突变检验法,具有人为干扰性少、校验范围宽的优点,通过正序列和反序列曲线交叉点来确定突变时间节点。

首先设原始时间序列为 t_1, t_2, \dots, t_n ; r_i 表示第 i 个样本 t_i 大于 t_j ($1 \leq j \leq i$)的累积数,则统计量计算公式为:

$$d_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (2 \leq k \leq n) \quad (3)$$

k 为样本数量; d_k 为样本累积数之和。在原序列随机独立等假设下, d_k 的均值 $E(d_k)$ 和 d_k 的方差 $Var(d_k)$ 计算公式分别为:

$$E(d_k) = k(k-1)/4 \quad (4)$$

$$Var(d_k) = k(k-1)(2k+5)/12 \quad (2 \leq k \leq n) \quad (5)$$

将式中的 d_k 标准化:

$$UF_k = (d_k - E(d_k)) / \sqrt{\text{Var}(d_k)} \quad (k=1, \dots, n) \quad (6)$$

通过公式(6)得到 UF 正序列曲线,同样的方法应用到反序列中,得到 UB 反序列曲线,如果统计量曲线 UF 、 UB 出现交点,且交点在临界线之间,那么

交点所对应的时间即为突变开始的时间。

3 结果及分析

3.1 极端气温指数时间变化趋势分析

从图2可以看出,1960—2016年,表征高温的极端温度事件线性倾向率均呈现出上升趋势;表征低

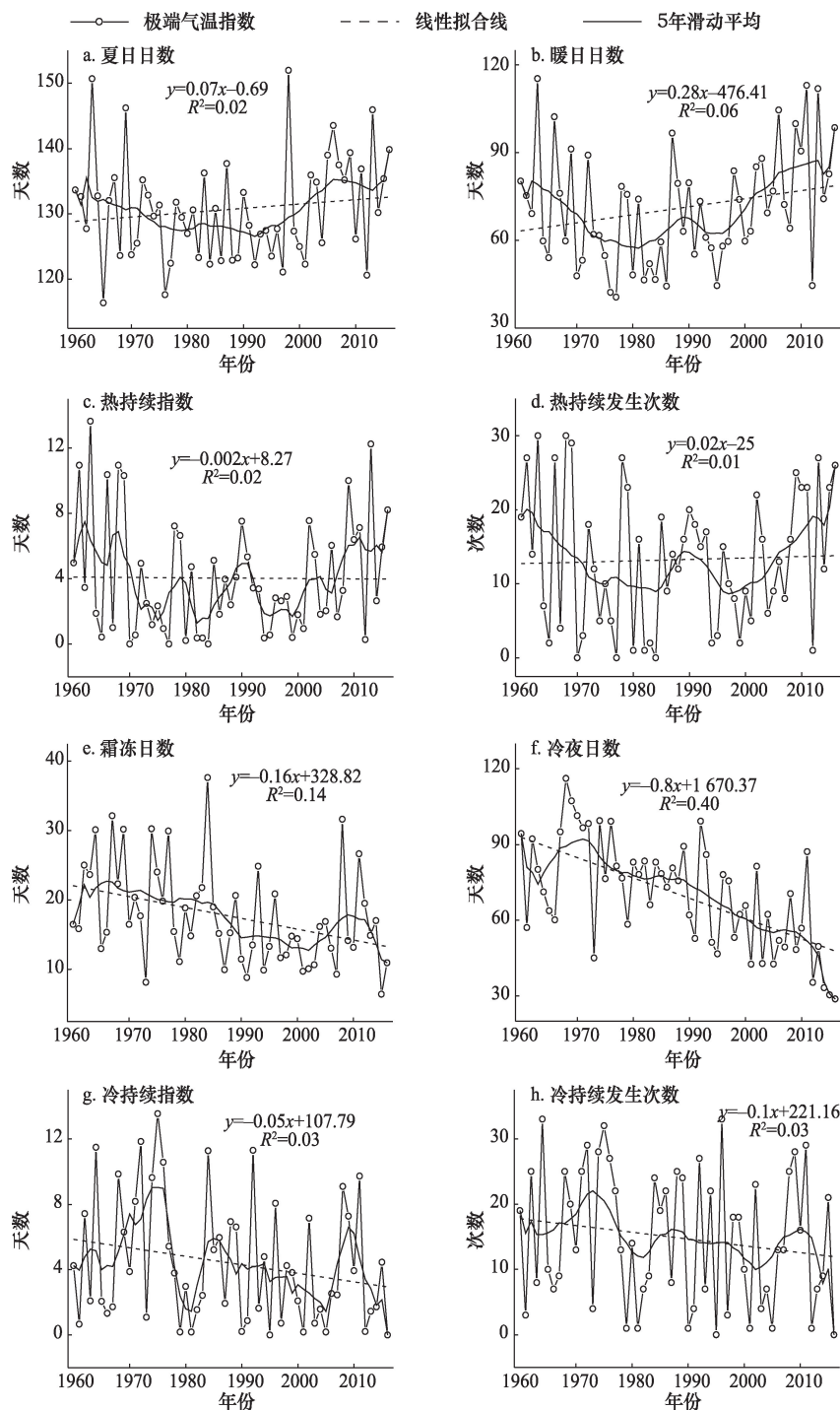


图2 1960—2016年贵州省极端气温指数变化趋势

Figure 2 Trend of extreme temperature indices in Guizhou from 1960 to 2016

2018年8月

温的极端温度事件线性倾向率均呈现出下降趋势,说明过去 57a 贵州气温以变暖趋势为主。夏日日数、暖日日数、热持续指数、热持续发生次数的年际变化倾向率分别为 $0.6\text{d}/10\text{a}$ 、 $2.7\text{d}/10\text{a}$ 、 $0.02\text{d}/10\text{a}$ 、 $0.2\text{次}/10\text{a}$ 。对比 5a 滑动平均曲线可以发现,四者在变化趋势上具有很好的一致性,波动中上升且呈现出“两高一低”的变化形态,1960—1970 年、2000 年—2016 年是两个高值区间,极端高温事件指数值偏大;1970—2000 年是低值区间,滑动平均值均位于线性趋势线下方,极端高温指数值相对偏小。在跨度近 30a 的低值区间内部嵌套着多个小的滑动曲线波动,暖日日数和热持续发生次数存在一个明显的波动小高峰,峰值发生在 1990 年前后,反映出这一时期极端高温事件偏多,而同时期的夏日日数滑动曲线波动较小,处在一个相对低值的阶段。

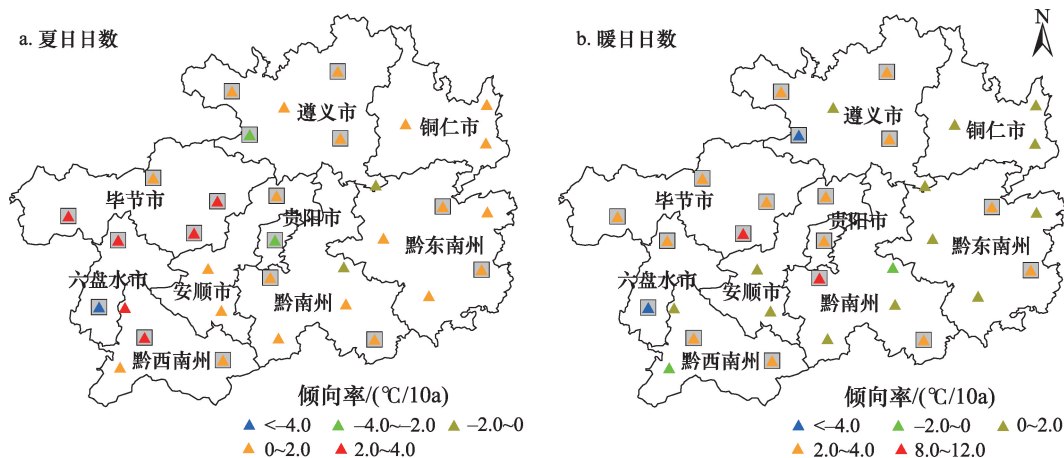
霜冻日数、冷夜日数、冷持续指数、冷持续发生次数的年际变化倾向率分别为 $-1.6\text{d}/10\text{a}$ 、 $-8.0\text{d}/10\text{a}$ 、 $-0.5\text{d}/10\text{a}$ 、 $-1.0\text{次}/10\text{a}$,显然表征低温的 4 个极端温度指数在变化幅度上高于极端高温系列指数,反映出二者在时间变化特征上的非对称性。虽然线性倾向率都呈减少态势,但是从 5a 滑动平均曲线来看,霜冻日数、冷夜日数与冷持续发生次数的变化趋势差异较大,在曲线走向上未见明显的同向性趋势,霜冻日数与冷夜日数在 20 世纪 60 年代初曲线走向甚至相反。冷持续发生次数曲线波动明显,1975 年和 2010 年前后分别出现两个小高峰。在不考虑变化幅度的情况下,贵州极端气温变暖特征显著,与当前全球变暖的大背景相符。

3.2 极端气温指数空间变化特征分析

由图 3 可知,不同类型极端气温指数值在变化

幅度上表现出明显的差异,夏日日数、暖日日数、热持续指数、热持续发生次数、霜冻日数、冷夜日数、冷持续指数、冷持续发生次数的变幅分别介于: $(-8.0\sim 3.9)\text{d}/10\text{a}$ 、 $(-12.7\sim 8.8)\text{d}/10\text{a}$ 、 $(-2.5\sim 0.9)\text{d}/10\text{a}$ 、 $(-0.42\sim 0.16)\text{次}/10\text{a}$ 、 $(-4.3\sim 0.4)\text{d}/10\text{a}$ 、 $(-15.7\sim 1.9)\text{d}/10\text{a}$ 、 $(-2.5\sim 1.0)\text{d}/10\text{a}$ 、 $(-0.41\sim 0.17)\text{次}/10\text{a}$ 之间。暖日日数、冷夜日数变动幅度大于其他极端指数,说明区位对这两个极端气温指数的影响更大。

空间上,夏日日数变化显著的站点主要分布在贵州西部和中部地区,毕节地区站点整体上升趋势最为显著,贵阳、盘县和仁怀呈下降趋势且幅度较大。暖日日数通过 $P<0.05$ 显著性检验的站点占比 55%,集中分布在除东部以外的其他地区,且大部分站点表现出较大幅度的正向变化态势。热持续指数变化不显著,除了盘县和仁怀两站点指数值显著下降外,其他站点均未通过显著性检验。所有极端指数中霜冻日数变化显著性最为突出,空间变化格局表现出与其他极端指数截然不同的分布特征,呈对角线走向,连接毕节至黔东南州的“西北-东南”走向沿线站点下降幅度明显较大,连接铜仁至黔西南州的“东北-西南”走向沿线站点下降幅度则相对较小。冷夜日数呈显著下降趋势,85% 的站点通过显著性检验,下降幅度大且分布范围广,区域差异不明显,基本涵盖整个区域范围。与热持续指数一致,该区冷持续指数通过显著性检验的比例并不高,除了少数几个站点呈显著下降外,其他站点均呈不显著的上升或下降趋势。热持续发生次数与冷持续发生次数年际变化幅度小,且变化趋势通过 0.05 显著性水平检验的站点比例不高。



续图3

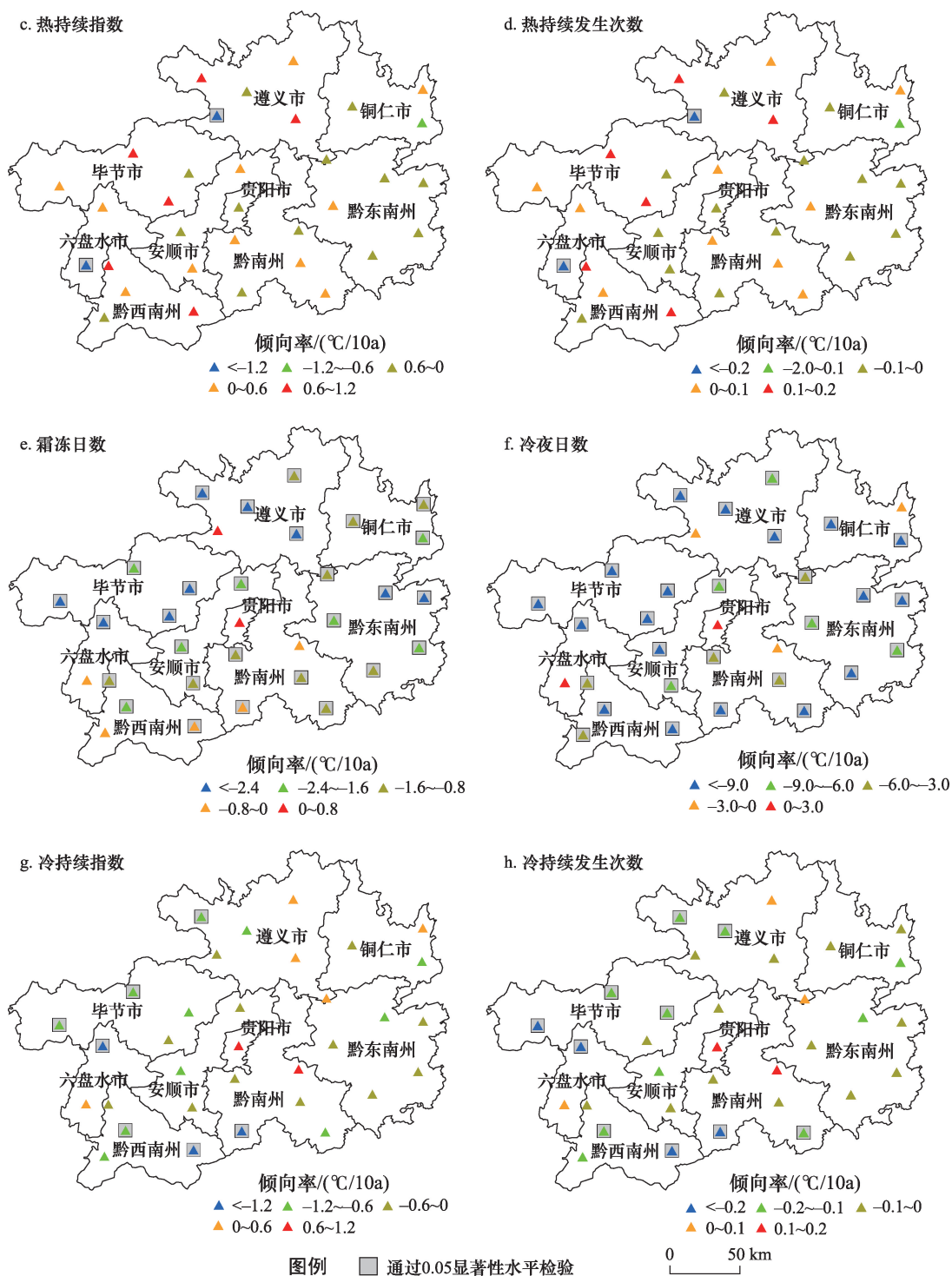


图3 1960—2016年贵州极端气温指数变化倾向率空间分布

Figure 3 Spatial distribution of inter-annual variation of extreme temperature indices in Guizhou from 1960 to 2016

结合贵州西高东低地势特征可知,极端气温指数空间分布反映的另一个明显特点就是西部高海拔地区在变化幅度与显著性方面明显高于其它地

区,为进一步验证海拔与极端气温指数的关系,采用自然断点分级法将不同站点的海拔分为5类,分别统计分析极端气温指数均值变化及其相关性(表2)。

表2 1960—2016年贵州不同海拔极端气温指数均值变化

Table 2 Mean trends of extreme temperature in categorized latitude ranks in Guizhou from 1960 to 2016

海拔范围 /m	夏日日数 /d	暖日日数 /d	热持续指数 /d	热持续发生 次数/次	霜冻日数 /d	冷夜日数 /d	冷持续指数 /d	冷持续发生 次数/次
282~440	4	71	70	13	10	163	4	15
440~792	4	71	70	13	14	162	4	15
792~1 038	4	71	70	13	15	129	4	15
1 038~1 511	4	71	70	13	17	114	5	15
1 511~2 238	3	71	71	13	32	79	5	15

从海拔梯度来看,冷夜日数随着海拔的升高而逐渐下降,这可能是受地形和地面长波辐射的影响,山地高海拔地区气温温差相对较小的原因引起的;霜冻日数随着海拔的升高而逐渐增加。其它几个极端气温指数海拔梯度变化特征不明显。

3.3 极端气温事件突变分析

气候突变表现为气候在时空上统计特性的急剧变化,通过突变点来体现^[20]。图4给出了1960—2016年贵州各极端气温指数变化的突变曲线,暖日日数、冷夜日数、霜冻日数的突变分别发生在2006年、2000年、1987年,夏日日数UF与UB曲线自从2005年产生第一次相交之后,在随后的12a时间内产生了多个交点,表明突变点受到干扰点的影响,因此分别运用滑动T检验(子序列长度5)和Yamamoto指数对突变点进行交互验证,排除虚假突变点,最终确认2005年为夏日日数突变点。同样的方法分别对其他指数进行了验证,除了1990年为冷持续指数的真实突变点外,其他均为虚假突变点。

由UF统计量曲线可知,表征高温系列的夏日日数、暖日日数和热持续指数均呈曲折上升趋势,进入21世纪以后上升速度加快。1975—1990年间暖日日数UF曲线基本都超过了显著性水平临界线,表明贵州暖日日数在此区间内的上升趋势是非常显著的。对应的霜冻日数、冷夜日数和冷持续指数在过去57a的时间序列内整体表现出波动下降趋势,并且霜冻日数与冷夜日数UF统计量曲线在2000年以后都达到了 $\alpha=0.05$ 显著性水平,说明近20a极端气温冷事件发生频率是显著降低的,而冷持续指数的变化则较为复杂且未达到显著性水平。

3.4 极端气温与厄尔尼诺和拉尼娜关系

通过查阅相关资料和前人研究成果^[21-23],整理

得出1960—2016年发生的ENSO(代指厄尔尼诺与拉尼娜)事件共38次,其中有20个年份发生了El Nino事件,18个年份发生了La Nina事件,其余19年为正常年份;El Nino/La Nina强度按低、中、高三等级进行划分,El Nino强度用正值表达,La Nina强度用负值表达,绝对值越大强度越高。由ENSO事件与极端气温指数距平关系可知(图5,见第1679页),极端气温指数的增减幅度与ENSO事件强度并无明显的正向或反向对应关系,仅在极个别年份存在这种对应现象,如1998年ENSO强度与SU25距平,2003年ENSO强度与CSDI距平等。统计数据表明多数厄尔尼诺年表征高温系列的极端气温指数值在增加,表征低温的极端气温指数值在减少,拉尼娜年情况则恰好相反;这种特征在正常年份没有体现,整体来看正常年份内各极端温度指数发生负距平现象的几率更高(表3,见第1680页)。对贵州而言,无论厄尔尼诺年还是拉尼娜年,正负距平发生的几率差别很小甚至相等。厄尔尼诺年霜冻日数正负距平比例差异最大,正负几率比为30%:70%;拉尼娜年则暖持续日数正负距平比例差异最大,正负几率比为28%:72%。

为了进一步探讨ENSO事件的滞后效应,分别统计了厄尔尼诺年、拉尼娜年及其滞后一年极端气温指数值(表4,见第1680页)。分析可知,在厄尔尼诺年和厄尔尼诺滞后的1a,极端气温暖系列指数(SU25、TX90P、WSDI)基本都大于正常年,极端气温冷系列指数(FD0、TN10P、CSDI)几乎都小于正常年,表明El Nino现象加剧了该区极端暖序列指数的上升和极端冷序列指数的下降。在拉尼娜年,大部分极端气温指数都小于正常年,反映出贵州对La Nina现象的响应较为明显。但是在拉尼娜滞后1a,

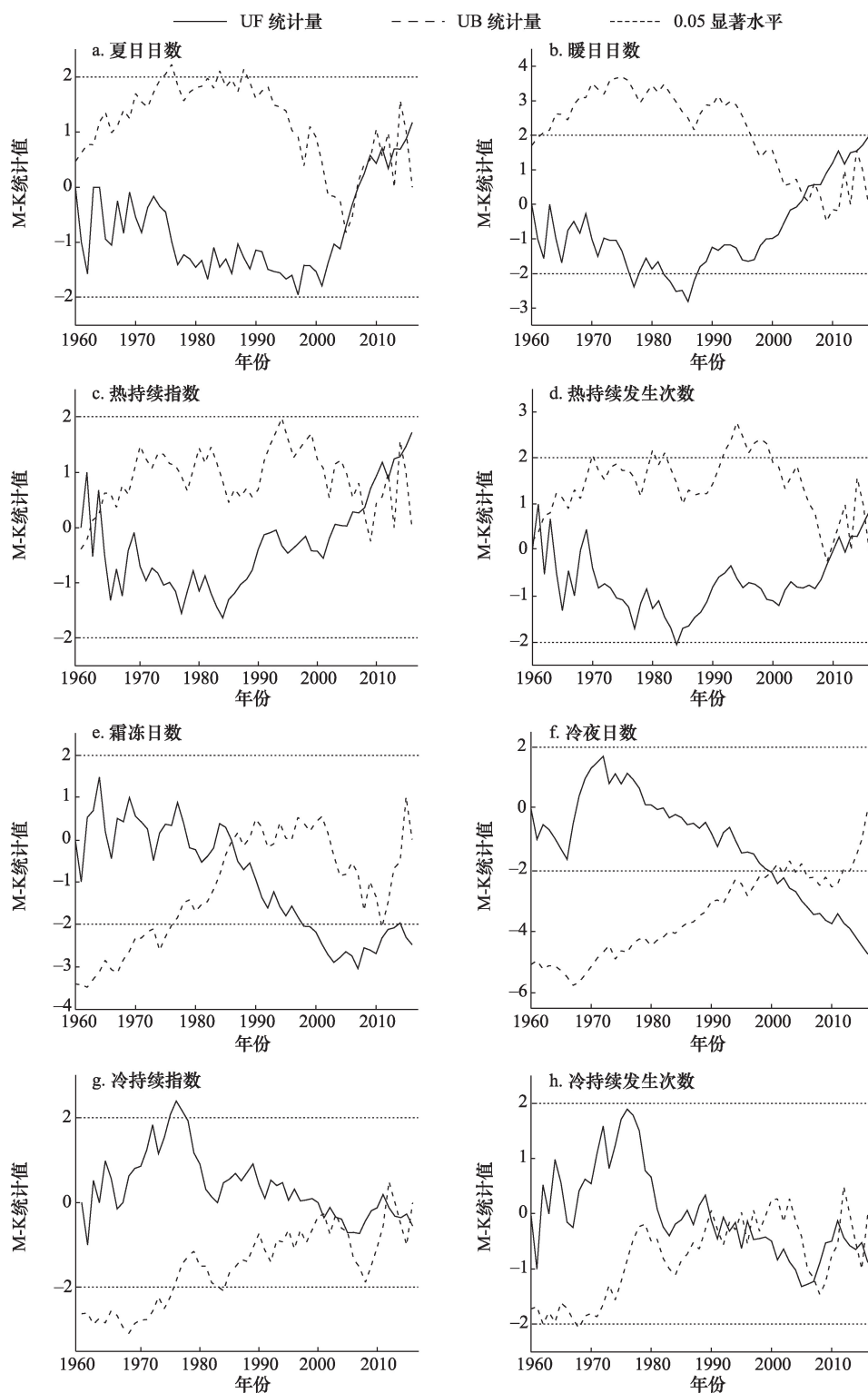


图4 1960—2016年贵州极端气温指数突变分析

Figure 4 Mann-Kendall test of extreme temperature indices in Guizhou from 1960 to 2016

所有极端气温指数快速回升,全部大于正常年,热持续指数甚至高于厄尔尼诺滞后年,说明拉尼娜滞后效应对该区极端暖序列指数和极端冷序列指数

均有较显著的影响。总体而言,厄尔尼诺对极端暖序列指数影响较大,影响程度持续到次年,拉尼娜与极端冷序列指数关系密切,在拉尼娜发生的次

2018年8月

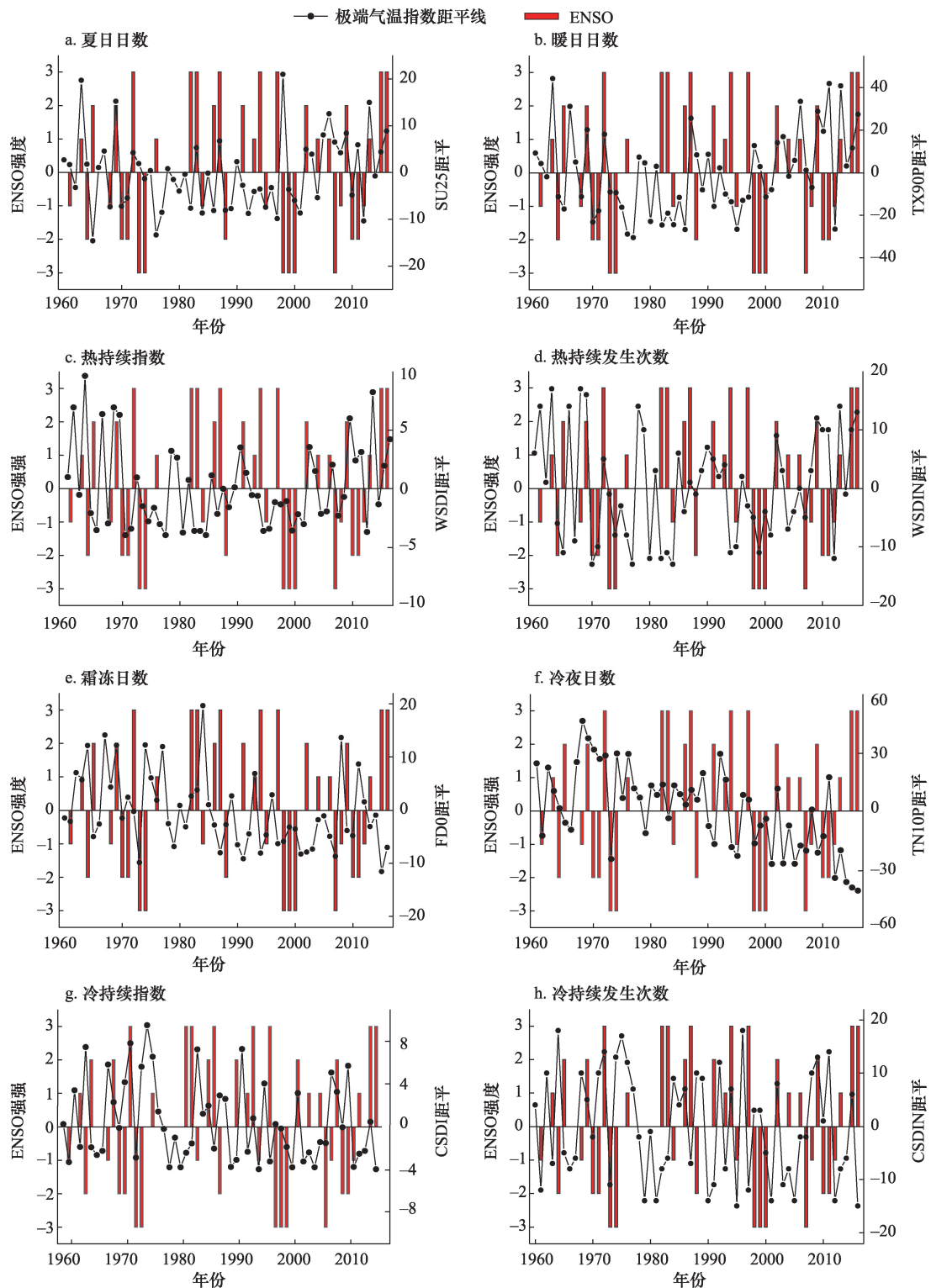


图5 1960—2016年贵州极端气温指数距平与ENSO强度关系

Figure 5 The relationship between ENSO events and extreme temperature indices anomaly in Guizhou from 1960 to 2016

年,其影响程度达到最高水平。

4 讨论

通过典型极端气温指数分析了1960—2016年

贵州省极端气温时空变化特征,整体上极端气温暖系列指数呈上升、冷系列指数呈下降趋势,这与前人^[15]对西南地区极端气温研究结论相一致,是对全球气候

表3 1960—2016年贵州极端气温指数距平与 ENSO 事件年数统计

Table 3 Comparisons of ENSO events and extreme temperature indices anomaly in Guizhou from 1960 to 2016

	夏日日数 /d		暖日日数 /d		热持续 指数/d		热持续发生 次数/次		霜冻日数 /d		冷夜日数 /d		冷持续 指数/d		冷持续发生 次数/次	
	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负
El Nino	11	9	10	10	12	8	12	8	6	14	10	10	8	12	8	12
La Nina	7	11	7	11	5	13	5	13	8	10	9	9	11	7	11	7
正常年	8	11	11	8	12	7	12	7	8	11	12	7	8	11	8	11

表4 1960—2016年贵州 ENSO 年与滞后 1a 极端
气温指数变化Table 4 Comparisons of extreme temperature indices in ENSO and
lag 1 years in Guizhou from 1960 to 2016 (d)

极端指数	El Nino	El Nino+1	La Nina	La Nina+1	正常年
夏日日数	133	131	129	130	130
暖日日数	76	71	66	71	70
热持续指数	165	96	100	131	130
霜冻日数	16	16	20	20	18
冷夜日数	69	62	71	75	72
冷持续指数	127	131	180	207	130

变暖的正面响应,反映了该区气候变暖趋势^[24,25]。然而,袁文德等^[15]研究发现,由于受地形、海拔的影响西南地区部分区域表现相反变化特征,极端高温事件和极端低温事件分别呈下降和上升趋势,在本研究中贵州盘县等区域也出现类似现象,这主要是区位与局地小气候的影响,反映出高原山地地区气候变化的特殊性。

此外,国内外大量研究^[26-28]证实的“气温非对称性变化”现象在本研究也得到清晰的反映,极端低温系列指数变化幅度明显高于极端高温系列指数,其中 TN10P 平均变化幅度是 TX90P 的 2 倍多。张雷等、周雅清等^[26,27]研究表明,城市化对极端低温系列指数的影响比极端高温系列更显著,而本研究中大部分气象观测点距离城市较近,由此推断这一现象可能也是来自城市化的影响,具体原因有待进一步深入分析。

ENSO(指厄尔尼诺与拉尼娜)对全球气候影响最显著的区域是低纬度地区^[29],贵州地处西南低纬高原,长江上游地区,是东亚季风和南亚季风的交汇区^[17],对 ENSO 循环过程中不同位相、发展阶段的响应复杂而敏感。在 El Nino 年贵州地区多数极端高温系列指数增加,极端低温系列指数减少,La Ni-

na 年则基本相反,这与前人对长江下游三角洲地区研究结果类似^[22],从某种程度上来讲 El Nino 增加了极端高温气候事件发生的频率,La Nina 增加了极端低温气候事件发生的频率。张冲等^[30]研究表明,El Nino 年气候灾害事件发生概率大于 La Nina 年,这种现象在长江流域洞庭湖与鄱阳湖水系表现最为明显,而贵州所处的乌江水系并不显著,这可能与地形和季风差异有关。有研究指出西南地区气温主要受西伯利亚高压和东亚冬季风的影响^[13],并且东亚季风同南亚季风在轨道尺度上存在反相位关系^[31],在 ENSO 的作用下两支季风的强度变化都会对气温产生直接影响,但是可能由于贵州高原山地特征典型、植被盖度高,区域小气候自我调节能力较强,在一定程度上抵消了 El Nino/La Nina 对气候的影响,气象灾害发生概率较低,具体原因还有待进一步的研究。

5 结论

伴随全球气候变暖趋势加剧,极端气候事件对区域发展的影响作用引起了广泛重视。本文利用 8 个极端气温指标对贵州省 1960—2016 年极端气温时空变化特征进行了研究,进一步分析了其时空变异特征与影响因素。为该区极端温度事件预防和气候变化区域适应对策的制定提供了参考。主要结论如下:

(1) 1960—2016 年贵州地区极端气温暖系列指数整体上呈上升趋势,极端气温冷系列指数呈下降趋势,气候变暖特征明显。不同类型极端气温指数在变化幅度上表现出较强的差异,暖日日数、冷夜日数变动幅度大于其他极端指数。空间上贵州中西部等高海拔地区极端气温指数表现出较高的显著性水平。相关性分析表明夏日日数、霜冻日数、冷持续指数与海拔关系密切。

(3)多数厄尔尼诺年表征高温系列的极端气温指数在增加,表征低温系列的极端气温指数在减少;拉尼娜年则相反。此外,厄尔尼诺对极端高温系列指数影响较大,影响程度持续到次年,拉尼娜与极端低温系列指数变化关系密切,在拉尼娜发生的次年,其影响程度达到最高水平。

- [1] 马齐云, 张继权, 来全, 等. 1960—2014 年松嫩草地极端气候事件的时空变化[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1769—1778. [Ma Q Y, Zhang J Q, Lai Q, *et al.* Temporal and spatial variations of extreme climatic events in Songnen Grassland, Northeast China during 1960—2014[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1769—1778.]
- [2] Min S K, Son S W, Seo K H, *et al.* Changes in weather and climate extremes over Korea and possible causes: a review [J]. *Asia Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 51(2): 103—121.
- [3] Jr R R H. An overview of weather and climate extremes—products and trends [J]. *Weather & Climate Extremes*, 2015, 10: 1—9.
- [4] 秦大河. 应对全球气候变化防御极端气候灾害[J]. 求是, 2007, (17): 51—53. [Qin D H. Tackling global climate change and defense against extreme climate disasters [J]. *Seeking*, 2007, (17): 51—53.]
- [5] 任福民, 高辉, 刘绿柳, 等. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述[J]. 气象, 2014, 40(7): 860—874. [Ren F M, Gao H, Liu L L, *et al.* Research progresses on extreme weather and climate events and their operational applications in climate monitoring and prediction[J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(7): 860—874.]
- [6] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [Qin D H. China's Extreme Weather Events and Disaster Risk Management and National Assessment Report [M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [7] 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962—2011 年长江流域极端气温事件分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 611—625. [Wang Q, Zhang M J, Wang S J, *et al.* Extreme temperature events in Yangtze River Basin during 1962—2011[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 611—625.]
- [8] 谢志祥, 李亚男, 秦耀辰, 等. 1960—2012 年淮河流域极端气温变化特征[J]. 中国农业气象, 2017, 38(7): 407—416. [Xie Z X, Li Y N, Qin Y C, *et al.* Evolution characteristics of the extreme temperature in Huaihe River Basin from 1960 to 2012[J]. *China Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(7): 407—416.]
- [9] 黄强, 陈子桑. 全球变暖背景下珠江流域极端气温与降水事件时空变化的区域研究[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 956—967.

- [10] 黄小燕,王小平,王劲松,等. 1960~2013年中国沿海极端天气事件变化特征[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 612-620. [Huang X Y, Wang X P, Wang J S, et al. Variation of extreme temperature events in coastal region of china in 1960-2013[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 36(4): 612- 620.]
- [11] 汪宝龙,张明军,魏军林,等. 西北地区近50a气温和降水极端事件的变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, (10): 1720-1733. [Wang B L, Zhang M J, Wei J L, et al. The change in extrem events of temperature and precipitation over northwest China in recent 50 years [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, (10): 1720-1733.]
- [12] 贺晋云,张明军,王鹏,等. 近50年西南地区极端干旱气候气候变化特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1179-1190. [He J Y, Zhang M J, Wang P, et al. Climate characteristics of the extreme drought events in southwest China during recent 50 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1179-1190.]
- [13] 蒋兴文,李跃清. 西南地区冬季气候异常的时空变化特征及其影响因子[J]. 地理学报, 2010, 65(11): 1325-1335. [Jiang X W, Li Y Q. The spatio-temporal variation of winter climate anomalies in Southwestern China and the possible influencing factors [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(11): 1325-1335.]
- [14] 沈爱华,任广成,徐明,等. 中国西南地区春季异常冷暖气候的相关分析及统计预测[J]. 高原气象, 2009, 28(2): 425-432. [Shen A H, Ren G C, Xu M, et al. Correlation analysis and statistical prediction of abnormal cold/warm in the southwestern region of China spring[J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(2): 425-432.]
- [15] 袁文德,郑江坤. 1962~2012年西南地区极端温度事件时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1246-1254. [Yuan W D, Zheng J K. Spatial and temporal variations of extreme temperature events in Southwestern China during 1962-2012[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(7): 1246-1254.]
- [16] 刘琳,徐宗学. 西南5省市极端气候指数时空分布规律研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 294-301. [Liu L, Xu Z X. Spatiotemporal distribution of the extreme climate indices in the five southwestern provinces of China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(2): 294-301.]
- [17] 周秀华,肖子牛. 我国西南周边地区夏秋季节降水变化及相应环流特征分析[J]. 大气科学, 2015, 39(4): 653-666. [Zhou X H, Xiao Z N. Analysis on the variation characteristics of summer-autumn precipitation over the surrounding regions of Southwest China and the corresponding circulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1015, 39(4): 653-666.]
- [18] 国家气象科学数据共享服务平台. 中国气象数据网[EB/OL]. (2017-01-19)[2017-09-24]. <http://data.cma.cn>. [National Meteorological Science Data Sharing Service Platform. China Meteorological Science Data Sharing Service Platform. China Meteorological Science Data Sharing Service Platform. China Meteorological Science Data Sharing Service Platform.]

- logical Data Network [EB/OL]. (2017-01-19)[2017-09-24]. <http://data.cma.cn.>]
- [19] 王晓, 李佳秀, 石红彦, 等. 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, 2014, 36(9): 1816–1824. [Wang X, Li J X, Shi H Y, *et al.* The temporal spatial distribution and prediction of extreme temperature events in Yunnan Province from 1960–2011[J]. *Resources Science*, 2014, 36(9): 1816–1824.]
- [20] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482–493. [Fu C B, Wang Q. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4): 482–493.]
- [21] 欧延升, 赵景波. 广西北部湾地区1951–2010年间气候变化与ENSO事件影响[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 228–234. [Ou T S, Zhao J B. Effects of ENSO events on climate in Beibu Gulf area of Guangxi during 1951–2010[J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(1): 228–234.]
- [22] 贾艳青, 张勃, 张耀宗, 等. 长江三角洲地区极端气温事件变化特征及其与ENSO的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 1–13. [Jia Y Q, Zhang B, Zhang Y Z, *et al.* Correlation analysis of variation of extreme temperature events and EL Nino southern Oscillation (ENSO) in Yangtze River Delta region during 1960–2014[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 1–13.]
- [23] 董小芳, 杨华玮, 张峦, 等. ENSO事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响[J]. 环境科学, 2017, DOI: 10. 13227/j. hjkx. 201705190. [Dong X F, Yang H W, Zhang L, *et al.* Influence of ENSO events on the hydrogen and oxygen isotopic values of precipitation in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2017, DOI: 10. 13227/j. hjkx. 201705190.]
- [24] 班军梅, 缪启龙, 李雄. 西南地区近50年来气温变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 346–351. [Ban H M, Miu Q L, Li X. Analysis of characteristics of temperature variations in Southwest China in recent 50 years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(3): 346–351.]
- [25] 刘晓冉, 李国平, 范广洲, 等. 西南地区近40a气温变化的时空特征分析[J]. 气象科学, 2008, 28(1): 30–36. [Liu X R, Li G P, Fan G Z, *et al.* Spatial and temporal characteristics of temperature changes in Southwest China during 1961–2000[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2008, 28(1): 30–36.]
- [26] 张雷, 任国玉, 刘江, 等. 城市化对北京气象站极端气温指数趋势变化的影响[J]. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1150–1159. [Zhang L, Ren G Y, Liu J, *et al.* Urban effect on trends of extreme temperature indices at Beijing meteorological station[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(5): 1150–1159.]
- [27] 周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区极端气温事件频率的影响[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1589–1598. [Zhou Y Q, Ren G Y. Urbanization effect on long term trends of extreme temperature events in North China[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(6): 1589–1598.]
- [28] Qian W H, Lin X. Regional trends in recent temperature indices in China [J]. *Climate Research*, 2004, 27(2): 119–134.
- [29] 许武成, 马劲松, 王文. 关于ENSO事件及其对中国气候影响研究的综述[J]. 气象科学, 2005, 25(2): 212–220. [Xu W C, Ma J S, Wang W. A review of study's on the influence of ENSO events on the climate in China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2005, 25(2): 212–220.]
- [30] 张冲, 赵景波. 厄尔尼诺/拉尼娜事件对长江流域气候的影响研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 1–6. [Zhang C, Zhao J B. Effects of EL Nino Southern Oscillation events on climate in Yangtze River Basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(3): 1–6.]
- [31] 石正国, 刘晓东, 程肖侠. 东亚季风和南亚季风的反相位关系及其与ENSO的联系: 年际尺度和轨道尺度[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 83–88. [Shi Z G, Liu X D, Cheng X X. Inverse phase between south Asian and East Asian summer monsoons and its relation with ENSO: from interannual to orbital scale [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(5): 83–88.]

Analysis of temporal and spatial variation of extreme temperature in Guizhou Province

ZHU Dayun^{1,2}, XIONG Kangning^{1,2}, XIAO Hua^{1,2}

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China)

Abstract: With global warming, the extreme weather events in southwest China have become more frequent and the damage is also deepening, posing a serious threat to national economic development and ecological environment protection. Based on daily temperature data sets of 33 stations in Guizhou Province, spatial and temporal changes of extreme temperature and its influence factors were analyzed during the period of 1960-2016, by using the methods of linear regression, Inverse Distance Weighted (IDW) and Mann-Kendall(M-K) test. The results showed that in the last 57 years the climate of Guizhou is getting warmer and accelerating the trend in the 21st century. The extreme high temperature indices, i. e. summer day, the percentile value of warm day, the duration of warmness and the frequency of the duration of warmness have all increased, with the velocity of 0.6d/10a、2.7d/10a、0.02d/10a、and 0.2times/10a, respectively. And the extreme low temperature indices, i. e. frost day, the percentile value of cold day, the duration of coldness and the frequency of the duration of coldness have decreased, with the velocity of -1.6d/10a、-8.0d/10a、-0.5d/10a、and -1.0times/10a, respectively. In addition, the extreme temperatures show asymmetry pattern. For example, the change range of extreme low temperature indices is greater than that of extreme high temperature indices, the tropical days and cold days have the largest variation. There is a close relationship between the extreme temperature indices and altitude. Moreover, most abrupt change of climate occurred in the late 19th and early 2000s. El Niño has a significant impact on the extreme warm series index, and La Nina has a greater influence on the extreme cold series index. The impact of La Nina on the extreme cold series index reached its highest level in the following year.

Key words: extreme temperature indices; spatio-temporal characteristics; ENSO; Guizhou