

气候变暖背景下藏东南极端气温指数变化特征

王 挺¹, 杜 军^{1,2,3*}, 白宇轩⁴, 党雪妮⁴, 索朗旺堆^{2,3}

¹中国气象局墨脱大气水分循环综合观测野外科学试验基地, 西藏 墨脱

²西藏高原大气环境科学研究所, 西藏 拉萨

³西藏高原大气环境研究重点实验室, 西藏 拉萨

⁴西藏自治区林芝市气象局, 西藏 林芝

收稿日期: 2022年4月26日; 录用日期: 2022年5月24日; 发布日期: 2022年5月31日

摘 要

基于1971~2020年藏东南4个气象站逐日最高气温、最低气温数据, 选取世界气象组织气候委员会推荐的14个极端气温指数(ETI), 采用线性趋势、R/S趋势分析、M-K检验等方法, 分析了近50年藏东南ETI的时空变化特征及其与大气环流指数、太阳黑子和海温指数等之间的关系。结果表明: 1) 近50年极端气温极值指数、暖指数和生长季长度(GSL)呈显著升高趋势, 冷指数和气温日较差(DTR)为下降趋势。变化幅度中冷指数大于暖指数, 夜指数大于昼指数, 极高值指数大于极低值指数。2) 在10年际变化尺度上, 极值指数、暖指数和GSL在1970~1990 s为负距平, 2000~2010 s为正距平, 而冷指数相反。3) 除DTR外, ETI表现为较强乃至很强的持续性, 未来将保持过去50年变化趋势。4) M-K检测显示, 除冷持续日数(CSDI)、DTR之外, ETI都发生了气候突变, 其中最高气温极小值(TXn)、暖昼日数(TX90p)、冷昼日数(TX10p)和冷夜日数(TN10p)突变时间较早, 发生在20世纪90年代末, 其他指数主要出现在21世纪前10年。5) 多数ETI与青藏高原A和B指数、亚洲极涡强度指数、西太平洋副高面积和强度指数、印缅槽强度指数都存在显著的相关关系, 以相对指数最为明显。除最高气温极大值(TXx)、CSDI、GSL、DTR外, ETI与太阳黑子具有显著的相关关系, 其中冷指数是正相关。6) 绝大部分ETI不仅与西太平洋暖池面积和强度指数, 还与NINOW区海表温度距平指数具有显著的相关关系, 其中冷指数和DTR为负相关。同时, 除最低气温极小值(TNn)、夏日日数(SU)、CSDI、DTR外, ETI与印度洋暖池面积和强度指数也有着显著的相关关系。

关键词

极端气温指数, 变化趋势, 突变, 大气环流指数, 太阳黑子, 海温指数, 藏东南

Characteristic Changes of Extreme Temperature Index in Southeast Tibet under the Background of Climate Warming

*通讯作者。

文章引用: 王挺, 杜军, 白宇轩, 党雪妮, 索朗旺堆. 气候变暖背景下藏东南极端气温指数变化特征[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(3): 406-418. DOI: 10.12677/ccrl.2022.113041

Ting Wang¹, Jun Du^{1,2,3*}, Yuxuan Bai⁴, Xueni Dang⁴, Sonam Wangdoi^{2,3}

¹Field Science Experiment Base for Comprehensive Observation of Atmospheric Water Cycle in Mêdog County, CMA, Mêdog Tibet

²Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science Research, Lhasa Tibet

³Tibet Key Laboratory of Plateau Atmospheric and Environmental Science Research, Lhasa Tibet

⁴Meteorological Service of Nyingchi City, Tibet Autonomous Region, Nyingchi Tibet

Received: Apr. 26th, 2022; accepted: May 24th, 2022; published: May 31st, 2022

Abstract

Based on the daily maximum and minimum temperature data from 4 meteorological stations in southeast Tibet from 1971 to 2020, 14 extreme temperature indices (ETI) were calculated by the Climate Committee of WMO. The linear trend, R/S trend analysis, and M-K test were used to analyze the temporal and spatial evolution of ETI in southeast Tibet in the past 50 years, and its relationship with atmospheric circulation index, sunspot and SST index *et al.* The results show that: 1) An upward trend in warm extremes, extremal indices and growing season length (GSL), and a downward trend in cold extremes as well as diurnal temperature range (DTR); the magnitudes of changes in cold extremes were obviously higher than those of warm extremes, which in night extremes were higher than those of day extremes, but the magnitudes of changes in extremes maximum value indices were larger than those of extremes minimum value indices. 2) In terms of decadal variations, the extremal indices, warm index and GSL were negative anomaly in 1970s~1990s and a positive anomaly in 2000s~2010s, while the cold index presented the opposite. (3) Except for DTR, Hurst index of ETI displayed stronger or even very strong persistence, that in future will maintain the trend of variability since the last 50 years. 4) According to the M-K test, except DTR and cold spell duration index (CSDI), ETI has undergone abrupt climate changes, among which annual minima of daily maximum temperature (TXn), warm days (TX90p), cold days (TX10p) and cold nights (TN10p) occurred earlier in the late 1990s, and the other indices mostly appeared in the first decade of the 21st century. 5) Most ETI were significantly correlated with the Tibet Plateau A and B indices, the Asian polar vortex intensity index, the western Pacific subtropical area and intensity index, and the Indo-Burma trough intensity index, especially in relative extremes indices. Except for annual maxima of daily maximum temperature (TXx), CSDI, GSL and DTR, ETI and total sunspot number index existed markedly relationship, among which the cold extremes were positively correlated. 6) The vast majority of ETI had significant correlations with not only the western Pacific warm pool area and intensity index, but also the NINO Z SSTA index, among which the cold extremes and DTR were negatively correlated. Meanwhile, in addition to annual minima of daily minimum temperature (TNn), summer days (SU), CSDI and DTR, ETI also were significantly correlated with the Indian Ocean warm pool area and intensity index.

Keywords

Extreme Temperature Index, Change Trend, Abrupt, Atmospheric Circulation Indices, Sunspot, SST Index, Southeastern Tibet

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

根据世界气象组织(WMO)发布的《2020 年全球气候状况声明》，2020 年全球地表平均温度较工业化前水平(1850~1900 年平均值)高出 1.2°C ，为有完整气象观测记录以来最暖的 3 个年份之一。有完整气象观测记录以来的 6 个最暖年份，均出现在 2015 年以来；2011~2020 年是 1850 年以来最暖的十年[1]。长序列观测资料和再分析数据集综合分析表明：全球变暖趋势进一步持续[1]。而温度的升高直接影响极端天气事件的发生，自然灾害的频率和强度明显增加[2]，从而对生态环境、社会经济发展和人民生活造成不利影响。因此，极端气温变化的研究备受关注。张盼峰[3]研究指出，1951~2018 年全球陆地年和季节平均极端气温均表现出了显著的变暖趋势，即冷阈值指数发生的频率在逐渐减少，而暖阈值指数发生的频率在逐渐增多。尹红等[4]研究得出，中国 1961~2017 年 TXx 、 TNx 、 TXn 和 TNn 都呈明显增加趋势； TN10p 、 TX10p 发生频率显著减少， TN90p 和 TX90p 发生频率显著增加； FD 、 ID 、 CSDI 呈明显下降趋势，而 SU 、 TR 和 WSDI 呈明显上升趋势。焦文慧等[5]分析认为，1960~2017 年我国北方地区极端气温暖指数和极值指数呈上升趋势，冷指数和气温日较差呈下降趋势；变化幅度中冷指数大于暖指数，夜指数大于昼指数。齐庆华等[6]指出 1960~2017 我国东部年霜冻日数、冰冻日数和寒潮持续期的长期变化趋势以减少为主，高温热浪的持续期则以增加为主。李占杰等[7]认为 1961~2010 年黑河流域极端气温总体上呈上升趋势，且极端最低气温的变化幅度明显大于极端最高气温的变化幅度。

尽管已经有许多学者对青藏高原的极端气温指数变化进行了大量研究，都发现冷事件减少，暖事件增多，且存在区域差异[8]~[14]。而针对藏东南极端气温指数的分析却鲜有报道。为此，本文基于 1971~2020 年藏东南 4 个气象站逐日最高气温、最低气温资料，选取适合当地的 14 个极端气温指数，采用线性趋势、R/S 趋势分析、Mann-Kendall 非参数检验等方法，分析了近 50 年藏东南极端气温指数的变化趋势、气候突变等特征，以及与大气环流指数、太阳黑子和海温指数等之间的关系，这不仅对当地生态文明建设、应对极端气候事件和次生灾害有现实的意义，也可为区域极端气候事件发生规律和预测性提供基础性研究。

2. 资料与研究方法

2.1. 数据资料

本文利用 1971~2020 年藏东南林区 4 个站(图 1)逐日最高气温和最低气温数据，资料来源于西藏自治区气象信息中心，数据均进行了质量控制。采用国家气候中心提供的 88 项大气环流指数(1981~2020 年)中的亚洲极涡、西太平洋副热带高压、印缅槽以及青藏高原等指数；26 项海温指数中的 NINO W 区海表温度距平指数、印度洋暖池面积和强度指数、西太平洋暖池面积和强度指数、暖池型和冷舌型 ENSO 指数；16 项其他指数中的太阳黑子指数和南方涛动指数。

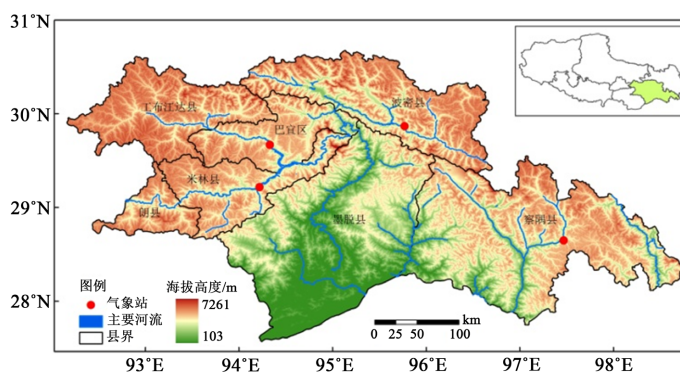


Figure 1. Geographical location and distribution of meteorological stations in southeastern Tibet
图 1. 藏东南地理位置及气象站点分布图

2.2. 研究方法

2.2.1. 极端气温指数

极端气温指数指标从世界气象组织(WMO)气候委员会(CCL)及气候变率和可预报性研究计划(CLIVAR)推荐的 27 个极端气候指数[15]中, 结合藏东南气候特点选取 14 个(表 1)。藏东南各站极端气温指数利用 RClimDex 软件[16]计算, 区域平均值为 4 个站的平均值。多年平均为基准期(1981~2010 年)的平均值。

极端气温指数可分为 4 种类型[17] [18] [19], 第 1 类为极值指数, 包括 TXx、TNx、TXn 和 TNn; 第 2 类为相对指数, 包括 TX90p、TX10p、TN90p、TN10p; 第 3 类是绝对指数, 含 SU、FD; 第 4 类为其他指数, 包括持续指数和范围指数, 其中 WSDI、CSDI 和 GSL 属于持续指数, 而范围指数只有 DTR。

Table 1. Definitions of extreme temperature indices (ETI)

表 1. 极端气温指数定义

指数类型	名称	代码	单位
极值指数	极端最高气温	TXx	℃
	最高气温极小值	TXn	℃
	最低气温极大值	TNx	℃
	极端最低气温	TNn	℃
相对指数	暖昼日数	TX90p	%
	冷昼日数	TX10p	%
	暖夜日数	TN90p	%
	冷夜日数	TN10p	%
绝对指数	霜冻日数	FD	d
	夏日日数	SU	d
其他指数	持续指数	WSDI	d
	冷持续日数	CSDI	d
	生长季长度	GSL	d
	范围指数	DTR	℃

2.2.2. 线性变化趋势估计

线性变化趋势[20]采用公式(1)进行计算:

$$Y = a_0 + a_1 t \quad (1)$$

式中: Y 为极端气温指数; t 为时间; a_0 为常数项; a_1 为线性趋势项, 把 $a_1 \times 10$ 年称为极端气温指数每 10 年的变化趋势。对于变化趋势的显著性, 采用时间 t 与原序列变量 y 之间的相关系数进行不同程度的显著性检验($p < 0.05$, $p < 0.01$ 和 $p < 0.001$)。

2.2.3. Mann-Kendall 方法

采用 Mann-Kendall 法[20] (简称 M-K 法)对极端气温指数进行突变检验。M-K 法是一种气候诊断与预测技术, 是世界气象组织推荐并已广泛应用的非参数统计方法。该方法可以判断气候序列中是否存在气候突变, 如果存在, 可确定出突变发生的时间。

2.2.4. R/S 分析法

R/S 分析法[21]可通过计算获取 Hurst 指数(简称, H 指数)来判断极端气温指数时间序列变化趋势的持续性,用以预测未来极端气温指数变化。 H 指数的分类等级见表 2。由表 2 可知: 1) 当 $0 < H < 0.5$ 时, 表征未来极端气温变化趋势与过去相反,越接近 0, 反持续性越强; 2) 当 $H = 0.5$ 时, 表征未来各项指数变化趋势与过去完全独立, 无相关性; 3) 当 $0.5 < H < 1.0$ 时, 表征未来的趋势与过去一致, 即极端气温变化具有持续性, H 越接近 1, 持续性越强[22] [23]。

Table 2. Hurst index grading table
表 2. H 指数分级表

等级	H 指数	反持续性强度	等级	H 指数	持续性强度
-I	$0.45 \leq H < 0.50$	很弱	I	$0.50 < H \leq 0.55$	很弱
-II	$0.35 \leq H < 0.45$	较弱	II	$0.55 < H \leq 0.65$	较弱
-III	$0.25 \leq H < 0.35$	较强	III	$0.65 < H \leq 0.75$	较强
-IV	$0.20 \leq H < 0.25$	强	IV	$0.75 < H \leq 0.80$	强
-V	$0.00 \leq H < 0.20$	很强	V	$0.80 < H \leq 1.00$	很强

2.2.5. 数据处理

数据处理、分析、绘图均利用 Excel 2007 软件完成,并利用数据处理系统[24] (Data Processing System) 提供的 M-K 检验法、Hurst 指数计算方法进行分析。

3. 结果分析

3.1. 藏东南极端气温指数的时间变化

3.1.1. 年际变化

近 50 年(1971~2020 年)藏东南 TX_x 、 TN_x 、 TX_n 和 TN_n 等 4 个极值指数均表现为升高趋势(图 2(a)、图 2(b)), 升温率分别为 0.28 、 0.33 、 0.33 、 $0.20^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.001$), 夜晚的极端气温变幅小于白天, TX_x 的升温率大于 TN_n , 这与全国[25]、全球[26]表现的不同。近 30 年(1991~2020 年)极值指数升幅更明显, 这表明最强的暖事件增强, 最强的冷事件减弱。

近 50 年藏东南极端气温相对指数变化显示(图 2(c)、图 2(d)), 暖昼/夜指数(TX_{90p} 、 TN_{90p})发生频率显著增加, 增率分别为 $1.98\% \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $4.63\% \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.001$); 冷昼/夜指数(TX_{10p} 、 TN_{10p})出现频率显著降低, 降低率平均每 10 年分别为 1.14% 和 1.94% ($p < 0.001$)。

如图 2(e)所示, 1971 年以来藏东南 SU 表现为显著的增加趋势, 为 $2.56 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.001$); FD 倾向于减少(图 2(e)), 为 $-5.28 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.001$)。 $WSDI$ 呈现明显的偏多趋势(图 2(f)), 增速为 $1.99 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.001$), 而 $CSDI$ 趋于减少(图 2(e)), 减速为 $0.70 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.05$)。

近 50 年藏东南 GSL 明显增加(图 2(g)), 增速为 $3.76 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.01$), 尤其是近 30 年增速达到 $6.97 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.05$)。 1971 年以来 DTR 表现为降低趋势(图 2(h)), 为 $-0.09^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.05$), 特别是 1991 年以来下降趋势更明显, 为 $-0.19^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.05$)。

总体来看, 近 50 年藏东南极端气温夜指数(TN_{90p} 、 TN_{10p})大于昼指数(TX_{90p} 、 TX_{10p}), 极高值指数(TX_x 、 TN_x)大于极低值指数(TX_n 、 TN_n), 冷指数(TX_{10p} 、 TN_{10p} 、 FD)大于暖指数(TX_{90p} 、 TN_{90p} 、 SU)。近 30 年极端气温指数变化幅度均有不同程度的变大, 暖事件更强, 冷事件更弱。

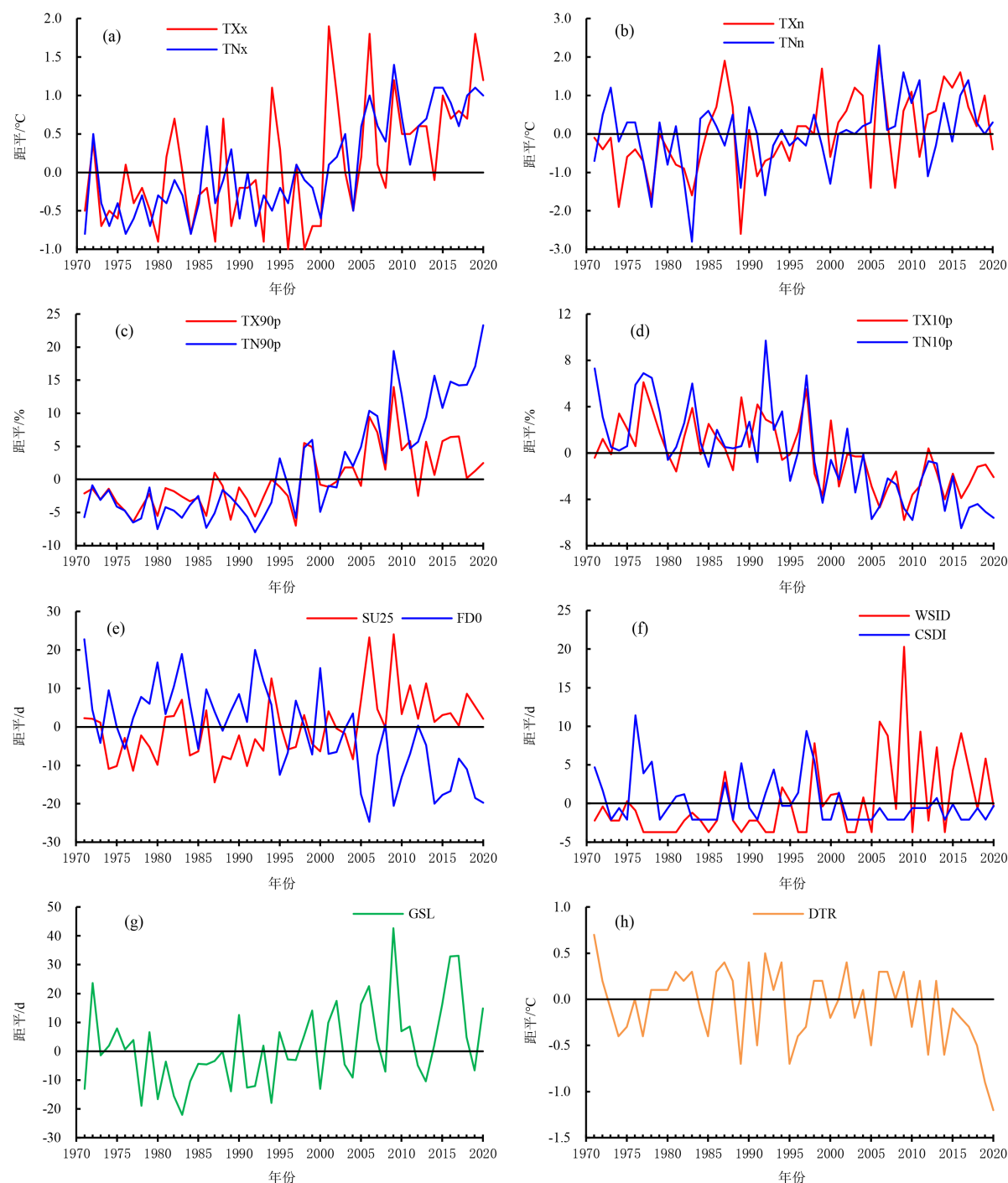


Figure 2. Linear change of ETI in southeastern Tibet from 1971 to 2020

图 2. 1971~2020 年藏东南各项极端气温指数变化趋势

3.1.2. 年代际变化

从藏东南各项极端气温指数距平的年代际变化来看(表 3), 在 10 年际尺度上, 极值指数、暖指数和 GSL 在 1970~1990 s 为负距平, 2000~2010 s 为正距平; 冷指数相反, 1970~1990 s 为正距平, 2000~2010 s 为负距平。DTR 在 1970~2000 s 期间基本无变化, 进入 2010 s 为负距平, 较常年值偏低 0.4℃。

Table 3. Interdecadal variation change of extreme temperature index (ETI) anomaly in southeast Tibet from 1971 to 2020
表 3. 1971~2020 年藏东南极端气温指数(ETI)距平的年代际变化

ETI \ 年代	1970 s (1971~1980)	1980 s (1981~1990)	1990 s (1991~2000)	2000 s (2001~2010)	2010 s (2010~2020)
TXx (°C)	-0.4	-0.1	-0.3	0.6	0.8
TXn (°C)	-0.6	-0.3	-0.2	0.5	0.6
TNx (°C)	-0.4	-0.2	-0.3	0.5	0.8
TNn (°C)	-0.2	-0.3	-0.4	0.6	0.4
TX90p (%)	-3.4	-2.5	-1.2	3.8	3.2
TX10p (%)	1.8	1.2	1.4	-2.5	-2.1
TN90p (%)	-4.1	-4.2	-2.0	6.4	13.0
TN10p (%)	3.4	1.5	1.3	-2.9	-3.7
FD (d)	6.0	5.8	3.5	-9.3	-12.3
SU (d)	-4.7	-3.0	-2.5	5.6	4.9
WSDI (d)	-2.2	-1.9	-0.6	2.6	3.3
CSDI (d)	2.0	0.1	1.5	-1.4	-1.0
GSL (d)	-0.5	-6.5	-3.4	9.9	9.1
DTR (°C)	0.0	0.1	-0.1	0.0	-0.4

3.1.3. 极端气温指数的趋势分析

根据 R/S 分析方法计算了 1971~2020 年藏东南各极端气温指数的 H 指数(表 4), 如表 4 所示, 除 DTR 的 H 指数小于 0.45, 为很弱的反持续性外; 其他极端气温指数的 H 值均在 0.65 以上, 表现为较强及以上的持续性, 而很强的达到 10 个, 其中 TNx、相对指数、FD 的 H 值大于 0.94, 甚至 TNx 和 TN90p 的 $H = 1$, 说明未来这些极端气温指数保持与历史变化趋势的可能性非常高。结合近 50a 藏东南各极端气温指数的变化趋势, 可预测其未来变化趋势, 除 4 个冷指数(TX10p、TN10p、FD、CSDI)仍趋于减少, 其他指数继续保持增加的趋势。

Table 4. Hurst index and abrupt year of ETI in southeastern Tibet from 1971 to 2020
表 4. 1971~2020 年藏东南极端气温指数的 H 指数和突变年份

ETI	H 指数				突变年份
	H 值	等级	强度	未来趋势	
TXx	0.87	V	很强	↑	2012
TXn	0.78	IV	强	↑	1998
TNx	1.00	V	很强	↑	2005
TNn	0.76	IV	强	↑	2005
TX90p	0.99	V	很强	↑	1998
TX10p	0.97	V	很强	↓	1998
TN90p	1.00	V	很强	↑	2006

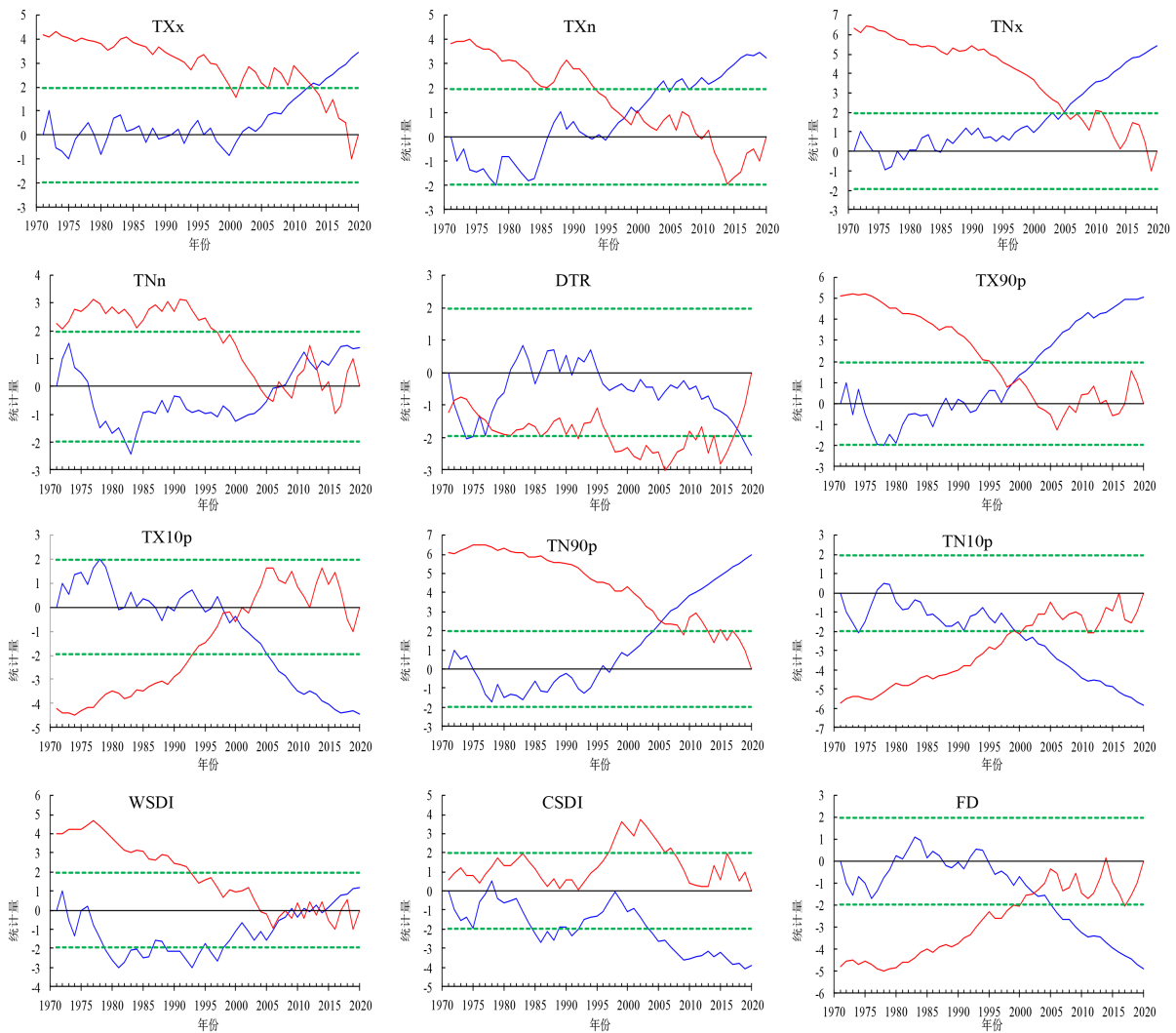
Continued

TN10p	0.95	V	很强	↓	1999
FD	0.94	V	很强	↓	2002
SU	0.86	V	很强	↑	2001
WSDI	0.83	V	很强	↑	2007
CSDI	0.73	III	较强	↓	/
GSL	0.84	V	很强	↑	2001
DTR	0.42	-I	很弱	↑	/

注：“↑”，“↓”分别表示增加和减少；“/”表示无突变年。

3.1.4. 极端气温指数的突变分析

从极端气温指数 M-K 检测结果可知，1971~2020 年除 DTR、CSDI 没有突变外，其他指数都发生了突变(图 3、表 4)。TXn、TX90p、TX10p 和 TN10p 突变时间较早，发生在 20 世纪 90 年代末；TXx 突变时间较晚，在 21 世纪 10 年代初；其他指数均出现在 21 世纪前 10 年，以中后期居多。极值指数、暖昼/夜指数、



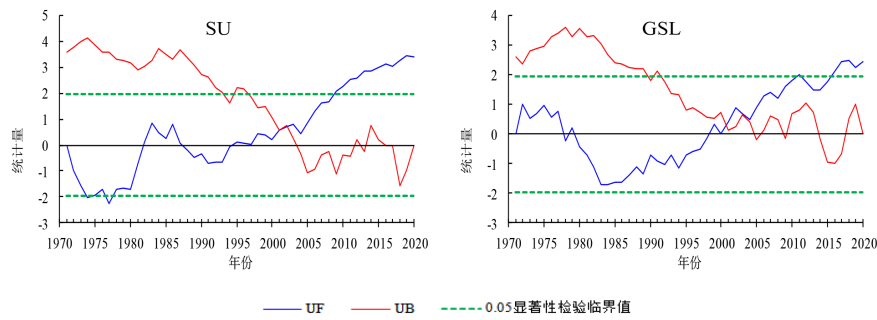


Figure 3. Abrupt changes of ETI in southeastern Tibet from 1971 to 2020

图 3. 1971~2020 年藏东南极端气温指数的突变

SU、WSDI 和 GSL 由偏低(少)期跃变为偏高(多)期, 突变后较突变前分别偏高(多) 0.80℃~1.08℃、6.47 d、15.01 d、8.59 d 和 12.97 d, 而冷昼/夜指数、FD 突变后分别减少 3.83 d、5.65 d 和 15.74 d。

3.2. 极端气温指数趋势的空间分布

如表 5 所示, 1971~2020 年藏东南极端气温指数变化趋势的空间分布显示: 1) 极端气温极值指数除 TNn 在林芝站上为降低趋势($-0.12^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$)外, 其他各站为升高趋势, 平均每 10 年升高了 $0.02^{\circ}\text{C}\sim 0.51^{\circ}\text{C}$ 。2) 相对指数在所有站上都表现为一致的趋势, 暖昼/夜指数趋于增加, 为 $1.23\%\sim 5.80\%\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.001$); 冷昼/夜指数倾向于减少, 为 $-0.53\%\sim -2.41\%\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.05$)。3) 各站 FD 明显减少, 平均每 10 年减少 1.74~3.09 d ($p < 0.001$); SU 显著增加, 增幅为 $2.67\sim 7.46\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。4) WSDI 在所有站上皆趋于增加, 增速为 $0.30\sim 2.36\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ (除察隅外, $p < 0.01$); 而 CSDI 仅在察隅站上呈不显著增加趋势($0.11\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$), 其他 3 个站趋于减少, 降幅为 $0.82\sim 1.06\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。5) 各站 GSL 表现为延长趋势, 平均 10 年延长 1.50~6.15 d。DTR 只在察隅站上基本无变化, 其他 3 个站倾向于减小。

近 30 年藏东南各站绝大部分极端气温指数的增减幅度更为明显, 都有不同程度的变大(表 5), 特别是 TN90p 增幅显著, 平均每 10 年增加 4.91~10.58 d ($p < 0.001$); 而 FD 明显减少, 为 $-4.95\sim -12.64\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.05$)。

Table 5. Linear trend of ETI at various stations in southeastern Tibet from 1971 to 2020

表 5. 1971~2020 年藏东南各站极端气温指数的变化趋势

ETI	波密	林芝	米林	察隅
TXx ($^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$)	0.43 ^{***} /0.48 [*]	0.31 ^{**} /0.54 [*]	0.23 [*] /0.64 ^{**}	0.16 [*] /0.23
TXn ($^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$)	0.27 ^{**} /0.47 [*]	0.51 ^{***} /0.37	0.26 [*] /0.37	0.27/0.46
TNx ($^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$)	0.36 ^{***} /0.63 ^{***}	0.38 ^{***} /0.47 ^{***}	0.40 ^{***} /0.69 ^{***}	0.17 ^{**} /0.41 ^{***}
TNn ($^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$)	0.43 ^{***} /1.02 ^{***}	-0.12/-0.38	0.44 ^{***} /0.82 ^{**}	0.05/0.06
TX90p ($\%\cdot 10\text{a}^{-1}$)	2.26 ^{***} /2.37 [*]	2.50 ^{***} /3.55 ^{**}	1.92 ^{***} /2.53 ^{**}	1.23 ^{**} /1.93 [*]
TX10p ($\%\cdot 10\text{a}^{-1}$)	-1.24 ^{***} /-1.34 [*]	-1.51 ^{***} /-2.09 ^{**}	-1.28 ^{***} /-2.45 ^{***}	-0.53 [*] /-1.27 [*]
TN90p ($\%\cdot 10\text{a}^{-1}$)	5.63 ^{***} /10.58 ^{***}	4.86 ^{***} /7.26 ^{***}	5.80 ^{***} /10.33 ^{***}	2.25 ^{***} /4.91 ^{***}
TN10p ($\%\cdot 10\text{a}^{-1}$)	-2.27 ^{***} /-3.57 ^{***}	-1.55 ^{***} /-1.19	-2.41 ^{***} /-3.69 ^{***}	-1.51 ^{***} /-2.91 ^{***}
FD ($\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$)	-5.48 ^{***} /-7.78 ^{***}	-5.51 ^{***} /-4.95 [*]	-7.46 ^{***} /-12.64 ^{***}	-2.67 [*] /-7.63 ^{***}

Continued

SU ($\text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$)	3.09**/2.99	2.99***/5.66**	1.74**/2.69	2.41/3.19
WSDI ($\text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$)	1.97**/2.28	2.36**/4.86**	1.75**/1.48	0.30/0.34
CSDI ($\text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$)	-1.01*/-2.04***	-1.06/-0.76	-0.82*/-1.24	0.11/-0.61
GSL ($\text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$)	6.15***/5.70	2.91/6.85	4.46*/11.98**	1.50/3.36
DTR ($^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$)	-0.11*/-0.35**	-0.06/0.03	-0.19***/-0.37***	-0.01/-0.05

注：*，**，***分别表示 $p < 0.05$ ， $p < 0.01$ 和 $p < 0.001$ ；“/”前后分别表示 1971~2020 年和 1991~2020 年的趋势值。

3.3. 极端气温指数与年、季平均气温的相关性

为了解藏东南极端气温指数变化与年、季平均气温的关系，采用 Pearson 相关系数方法计算了年、季平均气温与各项极端气温指数的相关系数(表 6)，从表中可知，DTR 只与秋季平均气温存在显著的负相关关系，其他极端气温指数与年、季平均气温相关性都很高，相关系数大于 0.30 ($p < 0.05$)，其中相对指数的相关系数较高，绝对值大于 0.61 ($p < 0.001$)；大部分指数与冬季平均气温的相关系数最大。这也表明极端气温对气候变暖具有很好的响应。

Table 6. Correlation coefficients between ETI and annual, seasonal mean air temperature in southeastern Tibet from 1971 to 2020

表 6. 1971~2020 年藏东南极端气温指数与年、季平均气温的相关系数

ETI	年	春季	夏季	秋季	冬季
TXx	0.55***	0.19	0.64***	0.36***	0.54***
TXn	0.57***	0.50***	0.34*	0.25	0.64***
TNx	0.75***	0.43**	0.82***	0.51***	0.63***
TNn	0.62***	0.43**	0.36*	0.36*	0.79***
TX90p	0.87***	0.71***	0.67***	0.65***	0.72***
TX10p	-0.88***	-0.67***	-0.70***	-0.62***	-0.81***
TN90p	0.91***	0.65***	0.78***	0.76***	0.71***
TN10p	-0.87***	-0.62***	-0.69***	-0.71***	-0.75***
FD	-0.84***	-0.52***	-0.62***	-0.65***	-0.82***
SU	0.60***	0.30	0.78***	0.36*	0.49***
WSDI	0.64***	0.49***	0.53***	0.47***	0.52***
CSDI	-0.44**	-0.41**	-0.40**	-0.30	-0.34*
GSL	0.64***	0.35*	0.42**	0.46***	0.72***
DTR	-0.20	-0.02	-0.15	-0.36*	-0.11

3.4. 极端气温指数与大气环流指数、太阳黑子等的相关性

高原地处中纬度地区，冬季受西风急流影响显著，而夏季高原西南季风、太平洋副高以及伊朗副高对高原影响也十分明显[13]。利用 Pearson 相关系数计算了 1981~2020 年藏东南各项极端气温指数与大气环流指数、太阳黑子、南方涛动指数等的相关系数(表 7)，结果发现，除 SU、DTR 外，极端气温指数与

青藏高原 A、B 指数具有显著的相关关系,其中冷指数呈负相关($p < 0.001$),其他指数为正相关($p < 0.05$),以暖昼/夜指数相关系数最高;各极端气温指数与西太平洋副高脊线位置指数的关系不显著;仅有昼指数、FD 和 GSL 与西太平洋副高西伸脊点指数有着显著的相关关系($p < 0.05$);TNx、相对指数、FD 与亚洲极涡面积指数有显著相关关系(冷昼/夜指数为正相关),其他指数相关性不显著;除 TXn、TNn 和 WSDI 外,极端气温指数与亚洲极涡强度指数呈显著的相关关系($p < 0.05$);除 TNn、SU 和 CSDI 之外,极端气温指数不仅与西太平洋副高面积、强度指数具有显著的关系($p < 0.05$),还与印缅槽强度指数之间存在显著的相关关系($p < 0.05$),其中冷昼/夜指数、FD、DTR 是负相关。

除 Txx、CSDI、GSL 和 DTR 外,极端气温指数与太阳黑子具有显著的相关关系($p < 0.05$),其中冷昼(夜)指数、FD 是正相关,其他为负相关,以 TN90p 相关系数最大。仅有冷昼(夜)指数与南方涛动指数之间有显著的负相关关系。

Table 7. Correlation coefficients between ETI and annual mean circulation indices, sunspot index and southern oscillation index in southeastern Tibet from 1981 to 2020

表 7. 1981~2020 年藏东南极端气温指数与年平均环流特征指数、太阳黑子指数、南方涛动指数的相关系数

ETI	环流指数	亚洲极 涡面积 指数	亚洲极 涡强度 指数	西太平洋 副高面积 指数	西太平洋 副高强度 指数	西太平洋 副高脊 线位置 指数	西太平洋 副高西伸 脊点指数	印缅槽 强度指 数	西藏高 原 A 指 数	西藏高 原 B 指 数	太阳 黑子 指数	南方 涛动 指数
TXx		-0.29	-0.42**	0.34*	0.34*	0.05	0.22	0.41**	0.41**	0.40**	-0.17	-0.06
TXn		-0.19	-0.04	0.32*	0.30	0.02	0.19	0.36*	0.62***	0.63***	-0.32*	-0.07
TNx		-0.50***	-0.54***	0.61***	0.60***	0.28	0.18	0.64***	0.61***	0.55***	-0.41**	0.11
TNn		-0.16	-0.27	0.21	0.24	0.08	0.06	0.25	0.55***	0.53***	-0.37*	0.31
TX90p		-0.32*	-0.39*	0.49**	0.49**	0.26	0.42**	0.44**	0.73***	0.73***	-0.34*	0.26
TX10p		0.40**	0.47**	-0.44**	-0.44**	-0.20	-0.35*	-0.38*	-0.69***	-0.65***	0.32*	-0.34*
TN90p		-0.50**	-0.63***	0.70***	0.71***	0.25	0.23	0.68***	0.75***	0.66***	-0.48**	0.27
TN10p		0.48**	0.61***	-0.50***	-0.53***	-0.30	-0.22	-0.47***	-0.63***	-0.54***	0.35*	-0.46**
FD		0.40*	0.53***	-0.52***	-0.53***	-0.19	-0.17	-0.52***	-0.66***	-0.58***	0.43**	-0.25
SU		-0.16	-0.35*	0.24	0.24	0.25	0.11	0.25	0.32*	0.32*	-0.32*	0.05
WSDI		-0.14	-0.25	0.32*	0.33*	0.22	0.32*	0.34*	0.53***	0.55***	-0.35*	0.09
CSDI		0.06	0.48**	-0.09	-0.10	0.07	-0.16	-0.02	-0.16	-0.11	0.12	-0.23
GSL		-0.24	-0.42**	0.44**	0.47**	0.15	0.36*	0.39*	0.64***	0.62***	-0.28	0.18
DTR		0.28	0.41**	-0.32*	-0.33*	-0.13	0.19	-0.32*	-0.06	0.08	0.21	-0.18

3.5. 极端气温指数与海温指数的相关性

表 8 给出了 1981~2020 年藏东南各项极端气温指数与海温指数的相关系数,从表可知,1) 除 WSDI 外,极端气温指数与 NINO W 区海表温度距平指数呈显著的相关关系,其中冷指数和 DTR 是负相关($p < 0.001$),其他指数为正相关,以 TN90p 相关系数最高,达 0.73 ($p < 0.001$)。2) 与印度洋暖池面积和强度指数相关性方面,除 TNn、CSDI、SU、DTR 外,极端气温指数存在显著的相关关系($p < 0.05$),其中冷指数为负相关($p < 0.001$),其他指数为正相关。3) 所有极端气温指数都与西太平洋暖池面积和强度指数有着显著的相关关系,其中冷指数和 DTR 是负相关($p < 0.001$),其他指数为正相关。4) 仅有 CSDI 与暖

池型 ENSO 指数具有显著的正相关关系($p < 0.01$); 与冷舌型 ENSO 指数存在显著相关关系的极端气温指数只有 TXx、TXn、TNx 和 FD, 其中 FD 是负相关。

Table 8. Correlation coefficients between ETI and annual mean SST indices in southeastern Tibet from 1981 to 2020

表 8. 1981~2020 年藏东南极端气温指数与年平均海温指数的相关系数

ETI	SSTI NINO W 区海表 温度距平指数	印度洋暖池面 积指数	印度洋暖池强 度指数	西太平洋暖池 面积指数	西太平洋暖池 强度指数	暖池型 ENSO 指数	冷舌型 ENSO 指数
TXx	0.58***	0.48**	0.46**	0.43**	0.50**	0.01	0.44**
TXn	0.42**	0.42**	0.43**	0.34*	0.40**	0.05	0.34*
TNx	0.68***	0.68***	0.67***	0.65***	0.71***	0.04	0.33*
TNn	0.45**	0.19	0.24	0.51***	0.46**	-0.29	0.23
TX90p	0.40**	0.57***	0.55***	0.55***	0.56***	-0.07	0.08
TX10p	-0.49**	-0.48**	-0.49	-0.67***	-0.64***	0.29	-0.14
TN90p	0.73***	0.73***	0.74***	0.81***	0.87***	-0.18	0.27
TN10p	-0.59***	-0.49**	-0.52***	-0.78***	-0.76***	0.40	-0.12
FD	-0.71***	-0.57***	-0.58***	-0.76***	-0.77***	0.25	-0.36*
SU	0.36*	0.30	0.28	0.31*	0.34*	0.03	0.17
WSDI	0.27	0.43**	0.39*	0.33*	0.34*	0.08	0.06
CSDI	-0.34*	-0.11	-0.14	-0.38*	-0.35*	0.43**	-0.18
GSL	0.48**	0.45**	0.47**	0.59***	0.59***	-0.07	0.22
DTR	-0.43**	-0.25	-0.28	-0.44**	-0.48**	0.22	-0.14

4. 结论

1) 1971~2020 年藏东南极端气温极值指数、暖指数和 GSL 呈显著升高趋势, 冷指数和 DTR 表现为下降趋势。在变化幅度上, 冷指数大于暖指数, 夜指数大于昼指数, 极低值小于极高值。近 30 年极端气温指数变化幅度均有不同程度的变大, 暖事件更强, 冷事件更弱。在 10 年际变化尺度上, 极值指数、暖指数和 GSL 在 1970~1990 s 为负距平, 2000~2010 s 为正距平, 而冷指数相反。

2) 除 DTR 外, 极端气温指数 H 值大于 0.65, 表现为较强乃至很强的持续性, 未来将保持与近 50 年的变化趋势, 其中冷指数仍趋于减少。M-K 检测显示, 除 CSDI、DTR 之外, 极端气温指数都发生了气候突变, 其中 TXn、TX90p、TX10p 和 TN10p 发生在 20 世纪 90 年代末, 其他指数主要出现在 21 世纪前 10 年。

3) 除 DTR 外, 其他各极端气温指数之间都存在显著的相关性, 特别是相对指数之间的相关性极为显著。绝大多数极端气温指数与年、季平均气温相关性都很高, 尤其与冬季平均气温的相关系数更大。

4) 多数极端气温指数与青藏高原 A 和 B 指数、亚洲极涡强度指数、西太平洋副高面积和强度指数、印缅槽强度指数都存在显著的相关关系, 以相对指数最为明显; 与西太平洋副高脊线位置指数的关系不显著。除 TXx、CSDI、GSL 和 DTR 外, 极端气温指数与太阳黑子具有显著的相关关系, 其中冷指数为正相关。

5) 绝大多数极端气温指数不仅与西太平洋暖池面积和强度指数, 还与 NINO W 区海表温度距平指数具有显著的相关关系, 其中冷指数和 DTR 为负相关。同时, 除 TNn、SU、CSDI、DTR 之外, 极端气温指数与印度洋暖池面积和强度指数也有着显著的相关关系, 其中冷指数是负相关。

基金项目

中国气象科学研究院青藏高原与极地气象科学研究所开放课题(ITPP2021K03), 2020 年西藏科技重点研发计划项目(XZ202001ZY0023N)。

参考文献

- [1] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2021) [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [2] 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, 27(10): 1720-1733.
- [3] 张盼峰. 全球陆地极端气温变化趋势: 1951~2018[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [4] 尹红, 孙颖. 基于 ETCCDI 指数 2017 年中国极端温度和降水特征分析[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 363-373.
- [5] 焦文慧, 张勃, 马彬, 等. 近 58a 中国北方地区极端气温时空变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1220-1230.
- [6] 齐庆华, 蔡榕硕, 郭海峡. 中国东部气温极端特性及其气候特征[J]. 地理科学, 2019, 39(8): 1340-1350.
- [7] 李占杰, 李占玲. 1961~2010 年黑河流域极端气温变化特征分析[J]. 水资源研究, 2012, 1(6): 480-485
- [8] 次央, 次仁旺姆, 德吉, 等. 1961~2015 年青藏高原极端气温事件的气候变化特征[J]. 高原山地气象研究, 2021, 41(2): 108-114.
- [9] 赵金鹏. 1961~2016 年青藏高原极端气候事件变化特征研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [10] 陈锐杰, 刘峰贵, 陈琼, 等. 近 60 年青藏高原东北缘极端气温事件与气温日较差分析-以西宁地区为例[J]. 高原气象, 2018, 37(5): 1188-1198.
- [11] 冯晓莉, 多杰卓么, 李万志, 等. 1961~2018 年青海高原极端气温指数时空变化特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(1): 28-37.
- [12] 杜军, 路红亚, 建军. 1961~2010 年西藏极端气温事件的时空变化[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1269-1280.
- [13] 杜军, 路红亚, 袁雷, 等. 近 42a 珠穆朗玛峰地区极端气温事件的时空变化[J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 20-27.
- [14] 杜军, 周刊社, 袁雷, 等. 1961~2010 年藏北牧草生长季极端气温的变化特征[J]. 草业科学, 2014, 31(11): 2026-2033
- [15] Peterson, T.C., Folland, C., Gruza, G., *et al.* (2006) Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs (1998-2001). http://eprints.soton.ac.uk/30144/1/048_wgccd.pdf
- [16] Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., *et al.* (2006) Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation. *Journal of Geophysical Research*, **111**, D05109. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- [17] Choi, G., Collins, D., Ren, G.Y., *et al.* (2009) Changes in Means and Extreme Events of Temperature and Precipitation in the Asia-Pacific Network Region, 1955-2007. *International Journal of Climatology*, **29**, 1906-1925. <https://doi.org/10.1002/joc.1979>
- [18] 周雅清, 任国玉. 中国大陆 1956~2008 极端气温事件变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 405-417.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [22] 时光训, 刘健, 马力, 等. 1970~2014 年长江流域极端降水过程的时空变化研究[J]. 水文, 2017, 37(4): 77-85.
- [23] 刘慧媛, 邹磊, 邢万里. 1961~2018 年海河流域极端降水时空演变特征[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 1-6.
- [24] Tang, Q.Y. and Zhang, C.X. (2013) Data Processing System (DPS) Software with Experimental Design, Statistical Analysis and Data Mining Developed for Use in Entomological Research. *Insect Science*, **20**, 254-260. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7917.2012.01519.x>
- [25] Zhou, B.T., Xu, Y., Wu, J., *et al.* (2016) Changes in Temperature and Precipitation Extreme Indices over China: Analysis of a High-Resolution Grid Dataset. *International Journal of Climatology*, **36**, 1051-1066. <https://doi.org/10.1002/joc.4400>
- [26] Donat, M.G., Alexander, L.V., Yang, H., *et al.* (2013) Global Land-Based Datasets for Monitoring Climatic Extremes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **94**, 997-1006. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00109.1>