

## 北疆地区近 53 年极端气温事件及其影响因素分析

丁之勇<sup>1,2,3</sup>, 葛拥晓<sup>1,3</sup>, 吉力力•阿不都外力<sup>1,3</sup>

1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2. 中国科学院大学,北京 100049

3. 中国科学院中亚生态与环境研究中心,乌鲁木齐 830011

要:根据北疆地区 1960—2012 年 31 个气象站点的逐日最高气温和最低气温资料,采用线性趋势分 摘 析、主成分分析和反距离加权等方法对该地区的年平均最高气温、年平均最低气温和14个极端气温指数 的时空变化特征进行了研究,并探讨了各极端气温指数与北极涛动指数、北大西洋涛动指数和厄尔尼诺-南方涛动之间的关系。研究表明: (1)近53年来,北疆地区年平均最低气温、年平均最高气温分别以 0.49°C·(10a)<sup>-1</sup>、0.22°C·(10a)<sup>-1</sup>的年际倾向率呈显著的上升趋势;气温日较差以0.27°C·(10a)<sup>-1</sup>的年际倾 向率呈显著下降趋势。极端暖指数除暖昼日数、夏日日数和极端最高气温均表现为不显著的上升趋势外, 其他暖指数均呈显著上升趋势;极端冷指数中除极端最低气温、日最高气温的极小值呈上升趋势外,其 他冷指数均呈减小趋势:在空间变化上各极端气温指数均表现为在阿尔泰山东南部地区和伊犁河谷地区 变化幅度较大,其他地区变化较小。(2)冷指数(冷夜、日最高气温的极小值、极端最低气温)的增 温幅度明显大于部分暖指数(暖夜、日最低气温极大值、极端最高气温),这一变化特征在山麓、山谷 等地区表现最为明显,而在这一地区夜指数(暖夜、冷夜)的变暖幅度也明显大于昼指数(暖昼、冷昼)。 (3) 极端气温指数与大气环流指数相关性分析表明,三种大气环流指数中北极涛动指数对北疆地区极 端气温的影响最为明显,其次是北大西洋涛动指数,且这两种大气环流指数对研究区极端气温冷指数的 影响较为显著,而厄尔尼诺-南方涛动对研究区极端气温影响较小。 关键词: 北疆地区; 极端气温指数; 主成分分析; 大气环流指数

# Spatiotemporal variation characteristics of extreme temperature and its influencing factors in recent 53 years in Northern Xinjiang, China

DING Zhiyong<sup>1, 2, 3</sup>, GE Yongxiao<sup>1, 3</sup>, Jilili Abuduwaili<sup>1, 3</sup>

1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. CAS Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Urumqi 830011, China

收稿日期: 2017-10-13; 录用日期: 2018-01-28

Received Date: 2017-10-13; Accepted Date: 2018-01-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41501115);自治区青年科技创新人才培养项目(QN2016BS0052)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41501115); Training Program for Youth Innovative Talents in Science and Technology in Xinjiang Uygur Autonomous Region of China (QN2016BS0052)

通信作者: 吉力力 · 阿不都外力, E-mail: jilil@ms.xjb.ac.cn

Corresponding Author: Jilili Abuduwaili, E-mail: jilil@ms.xjb.ac.cn

**引用格式:**丁之勇,葛拥晓,吉力力•阿不都外力.2018. 北疆地区近53年极端气温事件及其影响因素分析[J]. 地球环境学报,9(2): 159-171.

Citation: Ding Z Y, Ge Y X, Jilili Abuduwaili. 2018. Spatiotemporal variation characteristics of extreme temperature and its influencing factors in recent 53 years in Northern Xinjiang, China [J]. Journal of Earth Environment, 9(2): 159–171.

Abstract: Background, aim, and scope The Northern Xinjiang is one of the most important industrial and agricultural production area in northwest China, which belongs to arid and semi-arid regions. However, as a result of extremely fragile ecological environment and sensitive to climate change, lots of researchers focus on its environment change. The occurrence of extreme weather events showed more frequency and intensity in the background of global climate change, the loss of life and property of people will be greater than before. But the existing researches on extreme climate change in this region mainly focus on the temporal and spatial variation characteristics of extreme weather events, less researches on the influence factors of extreme weather events especially the influence of atmospheric circulation index, that disadvantage to accurately predict the occurrence of extreme weather events. Materials and methods Based on meteorological stations in Northern Xinjiang, 1960 — 2012 calendar year, daily air temperature data downloaded from National Climate Center, China Meteorological Administration, and atmospheric circulation index (including Arctic Oscillation index, North Atlantic Oscillation index, El Niño and the Southern Oscillation) from National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory-Physical Sciences Division (NOAA-ESRL: PSD). using linear regression analysis, moving average, principal component analysis, correlation analysis and Inverse Distance Weighted to analyze the spatiotemporal variation characteristics of extreme temperature changes in Northern Xinjiang and investigate the relationship between the extreme temperature index and atmospheric circulation index. *Results* The results showed that annual mean minimum temperature and annual mean maximum temperature displayed significant positive trend at rate of  $0.49 \,^{\circ}\text{C} \cdot (10a)^{-1}$ ,  $0.22 \,^{\circ}\text{C} \cdot (10a)^{-1}$ , respectively, while diurnal temperature range displayed negative trend at rates of  $0.27 \,^{\circ}\text{C} \cdot (10a)^{-1}$ ; indices of warm temperature extremes growing season length, warm nights, highest of the daily minimum temperature and tropical nights displayed significant positive trend at rate of 2.52 d  $\cdot$  (10a)<sup>-1</sup>.  $3.18 \,^{\circ}\mathrm{C} \cdot (10a)^{-1}$ ,  $0.45 \,^{\circ}\mathrm{C} \cdot (10a)^{-1}$  and  $1.14 \,^{\circ}\mathrm{d} \cdot (10a)^{-1}$ , respectively; while warm days, summer days and highest of the daily maximum temperature showed non-significant positive trend at rate of  $1.24 \text{ d} \cdot (10a)^{-1}$ ,  $1.58 \text{ d} \cdot (10a)^{-1}$  and  $0.09 \,^{\circ}\text{C} \cdot (10a)^{-1}$ . respectively. The cold temperature extremes frost days, ice days, cold nights and cold days displayed negative trend at rate of  $-3.70 \text{ d} \cdot (10a)^{-1}$ ,  $-1.46 \text{ d} \cdot (10a)^{-1}$ ,  $-3.41 \text{ d} \cdot (10a)^{-1}$  and  $-1.26 \text{ d} \cdot (10a)^{-1}$ , while lowest temperature of the daily minimum and lowest temperature of the daily maximum showed non-significant positive trend at rate of  $0.57 \,^{\circ}\mathrm{C} \cdot (10a)^{-1}$ and  $0.26 \, \text{C} \cdot (10a)^{-1}$ . The results of Inverse Distance Weighted method showed, the indices of diurnal temperature range, all the cold extremes and mostly warm extremes have larger trend magnitudes in regional of southeastern of Altai Mountains and Yili Valley area. Discussion The trend magnitudes in cold extremes (cold nights, lowest temperature of the daily maximum, lowest temperature of the daily minimum) are obviously larger than those of warm extremes (warm nights, highest temperature of the daily maximum and highest temperature of the daily minimum), and this characteristic are most obviously in regional of piedmont and valley area. Arctic Oscillation index (AO) has the strongest correlated with temperature extreme, in particular, the correlated with cold temperature extremes are obviously. North Atlantic Oscillation index (NAO) has significant positive correlated with lowest temperature of the daily minimum and highest temperature of the daily minimum while displayed non-significant correlated with warm temperature extremes. El Niño and the Southern Oscillation (ENSO) has non-significant correlated with each extreme temperature. Conclusions The occurrence of extreme cold indices have a more magnitude trend than warm indices, indicated the daily low temperature have a trend of increasing, and the occurrence of warm winter will be more frequency. Correlation analysis indicated the occurrence of extreme weather events especially extreme cold indices are mainly affected by Arctic Oscillation index, followed by North Atlantic Oscillation index, while the El Niño and the Southern Oscillation has little effect to the extreme weather events in Northern Xinjiang. Recommendations and perspectives Analysis on the variation characteristics of extreme weather events in Northern Xinjiang, not only provide reference for development of industries and agriculture in this region, can contribute to have a deep understanding the forecast of the future occurrence of extreme weather events and its response to atmospheric circulation index in Northern Xinjiang.

Key words: Northern Xinjiang; indices of temperature extremes; principal component analysis; index of atmospheric circulation

众多基于环境代用指标和器测资料的分析、 观测结果表明, 自第一次工业革命以来, 全球气 候系统正经历着明显的暖过程(Mann et al, 1998; Alexander et al, 2006); 尤其是近 60 年以来, 气候 系统的变暖幅度是近千年以来最大的,而北半球在 1983-2012年变暖幅度又是近1400年以来升温最 为明显的30年(沈永平和王国亚, 2013; IPCC, 2013)。随着气候系统的暖化,旱涝、高温、严寒等 极端气候事件发生的频率和强度表现出不断加剧的 趋势: IPCC 第五次评估报告指出(IPCC, 2013), 在全球变暖的大背景下,不同空间尺度的极端气候 事件也呈现出不断加强的趋势(Fang et al, 2015; Guan et al, 2015)。极端气候事件的频发和强度的 加深. 给区域生态环境和人类生产生活造成巨大的 破坏和损失,因此对区域极端气候的研究也越来越 受到世界各国学者的广泛关注(秦大河和 Stocker, 2014; Fioravanti et al, 2016; Zhou et al, 2016) 。

近几十年来,国内外学者开展了大量针对不 同尺度极端气候事件变化趋势及其影响因素的研 究。在全球尺度上研究发现(Alexander et al, 2006),全球超过70%的地区经历着冷夜显著减少, 而暖夜明显增加的趋势; Choi et al (2009) 对亚太 地区的研究也表明, 该区域极端气候变化趋势与 全球的趋势相同,但一些冷指数(如冷夜)的变 化幅度比全球平均趋势要大,而一些暖指数则比 全球平均趋势小。对整个印度-太平洋地区(Caesar et al, 2011)的研究也表明,该区极端气候变化趋 势与全球具有一致性,且其冷夜等极端冷指数的变 化幅度比全球尺度的变化更大;同时,对极端气 候影响因素的研究表明,大尺度环流因素对极端 气候事件的发生具有重要作用,如研究发现印度-太平洋地区极端气候的变化明显受到 ENSO 等现 象的影响(Caesar et al, 2011);而对我国以及欧 洲其他一些地区的研究也表明(Yan et al, 2002) 大气环流指数如北极涛动(AO)、北大西洋涛动 (NAO)和厄尔尼若-南方涛动指数(ENSO)均 对不同区域的极端气温具有不同的影响特征(Mann et al, 2000; Visbeck et al, 2003) . Li et al (2012) 研究发现,大气环流指数 AO 的正、负相位对北半 球的气温具有不同的影响,而对冬季气温的影响尤 其明显,在极端气温方面则表现为其对极端冷指数 的影响: AO 为负相位时我国北方地区出现极端低 温天气的可能性更高(左金清, 2011), NAO 指 数的正负相位和 ENSO 的冷暖相位对我国不同区 域的极端气温变化也具有不同的影响特征。从已 有的研究来看,许多学者对近 60 年来我国不同区 域、不同尺度的极端气温变化及其对大气环流指数 的响应进行了研究,但主要集中在我国南方地区 (李娟等,2012;黄强和陈子燊,2014; Tian and Yang,2016)和我国北方地区(Liu et al,2013; Wang et al,2013a)。近年来,已有较多学者开展 了我国西北包括新疆地区极端气候事件的研究, 但多数研究主要聚焦于极端气候事件的时空变化 特征(Wang et al,2013b; Chen et al,2014; 张延 伟等,2016),而对新疆北部(北疆)极端气温 与不同大气环流指数的相关性研究较为匮乏。

北疆地区是我国新疆重要的工农业生产区域, 相比新疆南部地区较为湿润,属于干旱半干旱地 区,生态环境极其脆弱;在全球气侯变暖的背景 下,极端气候事件的频发对该区域生态环境和人 民生产生活造成的破坏将更为严重。加强对北疆 地区极端气候研究显得尤为重要。本文拟采用线 性回归分析、反距离加权插值法和主成分分析法 等方法对北疆的极端气温时空变化特征进行研究, 并比较分析各极端气温指数的变化对 AO 指数、 NAO 指数和 ENSO 指数的响应,为全面认识该区 域极端气温变化提供科学依据。

## 1 研究区概况

本文研究的北疆地区指的是以我国天山山脊为 界的新疆北部地区,地理位置为 79.87°—91.54°E, 42.26°—49.18°N;该区的地形地势表现为中间低四 周高,北部为阿尔泰山,南部为天山,西部为阿拉 套山、玛依勒山等,其中部为我国第二大内陆盆地 准噶尔盆地。北疆地区为干旱半干旱区,多年平均 气温约 8℃,多年平均降水量为 100—200 mm。

## 2 数据来源与方法

### 2.1 数据来源

本文采用的气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn),经均值检验和时间一致性检验等选取了北疆地区 31 个气象站点 1960—2012 年的逐日气温最高值和日最低值进行分析。大气环流指数 AO 指数、NAO 指数和 ENSO 指数的逐日、逐月数据均来源于美国国家气候预测中心网站(http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/),其中 ENSO 指数采用 Nino3.4 区(5°S—5°N, 170°W—120°W)的海温

距平(SSTA)来表示。



图 1 北疆地区气象站点分布图 Fig.1 Distribution of meteorological stations in Northern Xinjiang

## 2.2 极端指数的选取及其定义

极端气温指数的定义采用世界气象组织"气候变化检测和指标"(http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI)推荐使用的极端气候指标(Keggenhoff et al, 2014),选取其中14个广泛使用的极端气温指数和年平均最高、最低气温指数,各气温指数及其定义如表1所示。16个气温指数在计算前均通过RClimDex(Wang et al, 2013b)软件进行严格的质量控制,并通过人工检验同相邻站点的记录进行比对,将合理的保留,不合理的按缺测处理,随后采用RClimDex软件进行极端气温指数的计算。

## 2.3 研究方法

采用一元线性方程(y=st+b, s 表示极端气温 变量的倾向率, s>0 表示上升趋势, s<0 表示下降 趋势)对各极端气温指数的时间变化趋势进行线性 拟合(Tian et al, 2016),其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检验(魏 凤英, 1999)。在 Arcgis 10.3 软件平台中采用反距 离加权插值法对各极端气温指数倾向率的空间分布 图进行插值(Li et al, 2010)。主成分分析是一种 将多个指标化为少数互相无关的综合指标的统计分 析方法,能有效处理指标选取较多的复杂问题,并 根据实际需要从中选取几个综合指标来尽可能多地 反映原来指标的信息(于秀林和任雪松, 1998)。

## 3 结果与分析

## 3.1 年平均最高、最低气温和 DTR 的时空变化

北疆地区年平均最高气温(TXam)、年平

均最低气温(TNam)和日较差(DTR)的时间 变化序列和空间分布如图2a—c所示。可以看出, TNam、TXam均呈显著的上升趋势(P < 0.001), TXam除了个别年份变化较大外,总体波动较小; TNam的变化趋势整体上与TXam相似,但波动 范围比TXam大;TNam的上升速率是TXam的 2.2倍,年际上升倾向率分别为 $0.49 \ (10a)^{-1}$ 和 $0.22 \ (10a)^{-1}$ 。近53年来,DTR的变化趋 势与TXam、TNam明显不同,以 $0.27 \ (10a)^{-1}$ 的年际倾向率呈显著下降趋势(P < 0.001),从 1960年至1978年变化较小,1978年之后迅速 下降。

在空间尺度上,TXam和TNam的空间变化 趋势一致,所有气象站点均为上升趋势(图2d、 图2e),且变化幅度空间分布差异较小。其中, TXam有42%的气象站点通过了0.05显著性检验, 主要位于北疆东北部、西北部和伊犁河谷地区。 而TNam有96%的气象站点通过了0.01显著性检 验,上升趋势较为明显,上升速率较大的站点主 要位于东北和西北部地区,两个指数上升幅度较 小的站点均位于南部地区。DTR虽然整体呈显著 下降趋势(图2f),但依然有8%的站点呈不显 著上升趋势,主要位于阿尔泰山东北部和北疆东 南部地区;DTR下降趋势较大的地区与TXam和 TNam变化趋势较大地区在空间分布上较为一致。

## 3.2 极端气温暖指数

### 3.2.1 暖指数的时间变化

近53年来北疆地区极端暖指数(GSL、 TN90p、TX90p、SU、TNx、TXx、TR)的时间 变化序列如图 3a-g 所示。可以看出,极端暖指 数GSL、TN90p、TNx和TR均呈显著上升趋势 (P<0.001), 年际倾向率分别为 2.52 d·(10a)<sup>-1</sup>、 3.18 d·(10a)<sup>-1</sup>、0.45°C·(10a)<sup>-1</sup>和1.14 d·(10a)<sup>-1</sup>; 而 TX90p、SU和TXx均表现为不显著上升趋势,年 际倾向率分别为 1.24 d·(10a)<sup>-1</sup>、1.58 d·(10a)<sup>-1</sup>和 0.09℃·(10a)<sup>-1</sup>。 其中, GSL、TN90p、TX90p 和 SU变化趋势相似, 均呈"W"型波动变化; TNx 虽总体呈显著的上升趋势,但年波动较大; TXx 在 20 世纪 90 年代之前先上升后下降, 波动较大, 20世纪90年代之后呈缓慢的波动上升趋势;TR 在 1960—1980 年间经历了两次上升—下降的趋 势变化,20世纪80年代至90年代中变化较小, 20世纪90年代之后迅速上升,且波动较大。

第2期

				石 1 极端 Tab.1 The definitions of	て温行奴的定义     f extreme temperature indices						
		编号 NO.	指数 Indices	指数名称 Indices name	指数定义 Definition	单位 Unit					
		1	TXam	年平均最高气温 Annual mean TX	年内 TX 的平均值 Arithmetic mean of monthly mean value of TX	°C					
		2	TNam	年平均最低气温 Annual mean TN	年内 TN 的平均值 Arithmetic mean of monthly mean value of TN	°C					
		3	DTR	气温日较差 Diurnal temperature range	年内日最高气温与最低气温的差值 Mean difference between TX and TN	°C					
		4	GSL	生物生长季 Growing season length	日平均气温 >5℃ 的日数 Annual count between first span of at least 6 days with TG>5℃ and first span in second half of the year of at least 6 days with TG<5℃	d					
		5	SU	夏日日数 Summer days	日最高气温(TX) > 25℃的日数 Annual count when TX (daily maximum)>25℃	d					
	极端气温暖指数 Indices of warm temperature extremes	6	TR	热夜日数 Tropical nights	年内日最低气温(TN) > 20℃的日数 Annual count when TN (daily minimum)>20℃	d					
		7	TNx	日最低气温极大值 Highest T <sub>min</sub>	年内日最低气温(TN)的极大值 Monthly highest TN						
		8	TXx	极端最高气温 Highest T <sub>max</sub>	年内日最高气温(TX)的极大值 Monthly highest TX	°C					
		9	TN90p	暖夜日数 Warm nights	日最低气温(TN)大于 1960—2012 的第 90 个百分位 数值的日数 Count of days when TN > 90th percentile of 1960—2012	d					
		10	TX90P	暖昼日数 Warm days	日最高气温(TX)大于 1960—2012 的第 90 个百分位 数值的日数 Count of days when TX > 90th percentile of 1960—2012	d					
		11	FD	霜冻日数 Frost days	年内日最低气温(TN)<0°C的日数 Annual count of days when TN<0°C	d					
		12	ID	冰冻日数 Ice days	年内日最高气温(TX)<0°C的日数 Annual count of days when TX<0°C	d					
	极端气温冷指数	13	TNn	极端最低气温 Lowest Tmin	每个月日最低气温(TN)的极小值 Monthly lowest TN	°C					
	Indices of cold temperature	14	TXn	日最高气温的极小值 Lowest Tmax	每个月日最高气温(TX)的极小值 Monthly lowest TX	°C					
6	extremes	15	TN10p	冷夜日数 Cold nights	日最低气温(TN)小于 1960—2012 的第 10 个百分位 数值的日数 Count of days when TN < 10th percentile of 1960—2012	d					
		16	TX10p	冷昼日数 Cold days	日最高气温(TX)小于 1960—2012 的第 10 个百分位 数值的日数 Count of days when TX < 10th percentile of 1960—2012	d					

注: TX: 日最高气温, TN: 日最低气温。

Note: TX: daily maximum temperature, TN: daily minimum temperature.

## 3.2.2 暖指数的空间分布

从各极端暖指数空间分布趋势来看(图4a—g),GSL和TX90p空间变化趋势一致,变化幅度较大的区域主要位于东北阿尔泰山地区和巴音

布鲁克草原以北的山地,较小的区域均位于西部 温泉等地区,但 GSL 变化幅度的空间分布差异较 大,年际倾向率最大的站点达 4.71 d·(10a)<sup>-1</sup>,最 小的仅为 0.26 d·(10a)<sup>-1</sup>,而 TX90p 变幅的空间分

163

布差异较小;尽管 GSL 在北疆地区总体呈显著上 升趋势,但在西部的温泉等地依然有 4% 的站点年 际倾向率为下降的趋势,而 TX90p 有 12% 的站点 呈下降趋势。



图中黑色线条表示各指数时间变化序列,绿色线条表示 5 a 滑动平均线,红色虚线表示线性趋势,下同。 Black line represent regional annual average, green line is five-year-moving average, red line is line tendency. The same as below.



TN90p和TNx的空间变化趋势相似,总体上与GSL等一致,但这两者均有4%的站点年际倾向率为下降趋势,均分布在阿尔泰山南麓地区;TN90p变化幅度的空间分布差异较大,年际倾向率绝对值最小的仅0.15 d·(10a)<sup>-1</sup>,最大达5.00 d·(10a)<sup>-1</sup> 是最小变化倾向率的33 倍。SU和TXx的空间变化趋势相同,总体上表现为东北部地区变化趋势较大,南部和西部地区变化趋势较小或为下降趋势;其中,SU有8%的站点呈显著下降趋势(P<0.001),而TXx有33%的站点呈明显下降趋势。TR的空间变化趋势与其他暖指数表现出明显的差异性,其变化幅度较大的地区均位于阿拉山口附近,而其他地区的差异较小;TR有12%的站点年际倾向率呈下降趋势,主要分布在阿尔泰山的东北地区和东南部地区。

## 3.3 极端气温冷指数

## 3.3.1 冷指数的时间变化

近 53 年 北 疆 地 区 极 端 冷 指 数 (FD、ID、 TN10p、TX10p、TNn 和 TXn)的时间变化序列如 图 5a—f 所示。可以看出,极端冷指数 FD、ID、 TN10p 和 TX10p 均呈下降趋势,其年际倾向率分别 为  $-3.70 \text{ d} \cdot (10a)^{-1}$ 、 $-1.46 \text{ d} \cdot (10a)^{-1}$ 、 $-3.41 \text{ d} \cdot (10a)^{-1}$ 和  $-1.26 \text{ d} \cdot (10a)^{-1}$ ,其中 FD 和 TN10p 呈显著下降 趋势 (*P*<0.001)。而 TNn 和 TXn 均表现为不显著 的上升趋势,其年际倾向率分别为 0.57 ℃ · (10a)^{-1} 和 0.26℃ · (10a)^{-1}。

## 3.3.2 冷指数的空间分布

从空间尺度来看(图 6a—f),FD、ID 和 TN10p 所有气象站点均为下降趋势,其中,FD 和 TN10p 各有 92% 和 75% 的站点呈显著下降 趋势(P<0.001),ID 有 8% 的气象站点通过了 0.05 的显著性检验。FD 和 TN10p 的空间变化趋 势一致,变化幅度较大的均位于阿尔泰山的东南 部、北疆的西北部和西部的伊犁河谷地区,而变 化幅度较小的地区均分布在北疆的东南部地区; 且 FD 和 TN10p 变化幅度的空间差异较大,FD 年际倾向率最小的仅为-1.35 d·(10a)<sup>-1</sup>,而最大 的达-6.35 d·(10a)<sup>-1</sup>,是最小值的 4.7 倍,TN10p 年际倾向率最小的为-0.64 d·(10a)<sup>-1</sup>,最大的达 -5.68 d·(10a)<sup>-1</sup> 是最小幅度的 8.9 倍。ID 变化幅度 较大的地区也位于西北部和伊犁河谷地区,但在 阿尔泰山的东南部地区为低值区。

164







Fig.4 Spatial distribution pattern of warm temperature extremes



图 5 极端气温冷指数的时间变化序列 Fig.5 Temporal variation of indices of cold temperature extremes



图 6 极端气温冷指数的空间分布 Fig.6 Spatial distribution pattern of cold temperature extremes

TX10p的年际倾向率的空间分布与FD、 TN10p一致,但TX10p有8%的站点表现为上升 趋势,主要为西部的温泉地区和乌鲁木齐等地区。 TNn和TXn变化幅度的空间分布相似,总体来 看两者的空间分布与FD、ID、TN10p等类似, 变化幅度较大的主要分布在阿尔泰山的东南部、 西部的伊犁河谷和北疆的西北部等地区,而变化 幅度较小或为下降趋势的站点主要位于东南部地 区;虽然两个指数总体上呈上升趋势,但TNn有 8%的站点呈下降趋势,而TXn有17%的站点呈 下降趋势,且TNn和TXn变化幅度的空间差异 较小。

第<u>9</u>卷

## 4 讨论

第2期

## 4.1 极端气温冷暖指数变化幅度对比

为研究北疆地区日最高温和最低温的相对变化 情况,将极端暖指数和冷指数的变化幅度进行对比 分析(表2)。分析结果表明:FD有92%的站点 变化幅度大于TR,且FD的变化幅度是TR的13.7 倍;ID和SU的变化幅度差异较小,但ID有25% 的站点变化幅度大于 SU; TN10p 有 96% 的站点变 化幅度大于 TX10p,有 50% 的站点变化幅度大于 TN90p,且 TN10p 的变化幅度是 TX10p 的 2.7 倍, 但和 TN90p 差别较小;约 92% 的站点 TN90p 变化 幅度大于 TX90p,且 TN90p 的变化幅度比 TX90p 大 2.6 倍;同时,TX10p 有 54% 的站点变化幅度大 于 TX90p,但其变化幅度仅相差 0.02 d·(10a)<sup>-1</sup>。

Tab.2 Number and	l proportion of i	表 2 ndividual st	2 极端冷暖指数 ations where the	效变化幅度对比分析 trend magnitudes betw	veen warm and	cold temperature extremes
气温指数对比 Indices comparison	站点比例 Percentage	比 Compa	较依据 arison basis	气温指数对比 Indices comparison	站点比例 Percentage	比较依据 Comparison basis
FD>TR	92%	绝对值	Absolute value	TNn>TNx	54%	绝对值 Absolute value
ID>SU	25%	绝对值	Absolute value	TXn>TXx	45%	绝对值 Absolute value
TN10p>TX10p	96%	绝对值	Absolute value	TNn>TNx	50%	真实值 Real value
TN90p>TX90p	92%	绝对值	Absolute value	TNn>TXn	92%	真实值 Real value
TN10p>TN90p	50%	绝对值	Absolute value	TNx>TXx	96%	真实值 Real value
TX10p>TX90p	54%	绝对值	Absolute value	TXx>TXn	29%	真实值 Real value

从变化幅度的绝对值来看,有54%的站点 TNn 大于 TNx, 目 TNn 的 变 化 幅 度 比 TNx 高 0.12 ℃·(10a)<sup>-1</sup>; 而 TXn 仅 有 45% 的 站 点 大 于 TXx,且TXn的变化幅度约为TXx的3.0倍。从 变化幅度的真实值来看, TXn 有 29% 的站点小于 TXx; TNn 有 50% 的站点其真实值大于 TNx, 有 92% 的站点大于 TXn, 且 TNn 的变化幅度是 TXn 的 2.2 倍; 从 TNx 和 TXx 对比来看, 有 96% 的 站点 TNx 大于 TXx, 且 TNx 的变化幅度是 TXx 的 5.0 倍。结合各极端指数变化幅度的空间分布 来看,大部分指数变幅较大的区域均位于山地、 河谷地区,如阿尔泰山山区、伊犁河谷以及巴音 布鲁克等地区。北疆地区的山地是我国西北地区 冰川储量最为丰富的地区之一,极端低温的不断 暖化将使该区域冰川萎缩速率更加迅速。从上述 冷暖指数变化幅度的对比分析来看,一些冷指数 (TN10p、TXn、TNn)的增温幅度明显大于部分 暖指数(TN90p、TXx、TNx), IPCC(2013)、 Aguilar et al (2009)研究表明,这种变化的原因 主要是由于冬季比夏季较大的变暖幅度造成的, 其物理机制是冬季空气中的水汽含量小于夏季, 因此冬季温室气体的辐射强迫效应增强进而引 起更大幅度的升温。极端气温夜指数(TN90p、 TN10p)的变暖幅度也明显大于昼指数(TX90p、

TX10p), Peterson et al (2002)、Choi et al (2009)、Wang et al (2013b)也证实了极端最低气温的变暖幅度大于极端最高气温,而且夜指数的变暖幅度大于昼指数;而极端最低气温的不断暖化将使"暖冬"事件发生的频率不断增多,加速西北地区冰川积雪融化速度,一定程度上减少夏季和秋季积雪融水,不利于北疆地区工农业生产对水文水资源的合理利用,影响区域农牧业生产。

## 4.2 极端气温冷暖指数的影响因素分析

4.2.1 极端气温指数主成分分析

主成分分析结果表明,KMO检验指数为0.732, 3个主成分累积贡献率达到79.4%,特征值也都 大于1,符合分析要求(表3)。由表3可看出, 第一主成分占方差贡献率的36.1%,除了DTR、 ID、TN10p、TX10p、TNn、TXn之外,各极端 气温指数的载荷值都比较高,其中暖指数GSL、 SU、TN90p、TNx、TR、TX90p、TXx的载荷值 均在0.60以上,而冷指数FD、ID等均为负载荷, 相关性分析表明(表4),各暖指数间均呈显著 正相关(P<0.01),同时与冷指数(FD、ID、 TN10p等)均呈负相关。第二主成分因子中载荷 较高的有 FD、ID、TN10p、TNn、TX10p、TXn, 占方差贡献率的28.9%;其中,FD、ID、TN10p、

#### 168

#### 地球环境学报

TX10p 均为负载荷, TNn 和 TXn 均为正载荷, 载荷值分别为 0.91 和 0.92。由表 3 可知, GSL 在 第二主成分中载荷值高达 0.53, 在第一主成分中 载荷值为 0.66; 相关性分析显示 GSL 与暖指数 (SU、TN90p、TNx、TR、TX90p)呈显著正相 关(P<0.01), 与冷指数(FD、ID、TN10p、 TX10p)呈显著负相关(P<0.01),结合研究区 近53年的冷暖指数变化趋势分析,表明在北疆地 区GSL主要受到最低气温变化的影响,研究区最 低气温的上升是GSL增加的主要原因。

	表 3 北疆地区极端气温指数主成分分析结果 Tab.3 Results of factor loadings perceptual explained variance in temperature extremes																
指数 Indices		DTR	FD	GSL	ID	SU	TN10p	TN90p	TNn	TNx	TR	TX10p	TX90p	TXn	TXx	特征值 Eigenvalue	方差 Variance
	1	0.01	-0.68	0.66	-0.34	0.88	-0.43	0.69	-0.09	0.73	0.88	-0.48	0.74	-0.16	0.69	7.2	36.1%
主成分 Component	2	-0.05	-0.46	0.53	-0.72	0.03	-0.62	0.42	0.91	0.11	0.01	-0.74	0.49	0.92	-0.05	2.5	28.9%
component	3	0.98	0.31	0.00	0.11	0.12	0.55	-0.48	-0.18	-0.52	-0.27	0.01	0.01	-0.01	-0.03	1.5	14.4%

	表 4 极端气温指数相关性分析														
	Tab.4    The Pearson correlation matrix of temperature extremes														
指数 Indices	TXam	TNam	DTR	FD	GSL	ID	SU	TN10p	TN90p	TNn	TNx	TR	TX10p	TX90p	TXn
TNam	0.86**														
DTR	-0.04	-0.55**													
FD	-0.78**	-0.83**	0.35*												
GSL	$0.78^{**}$	0.68**	-0.06	$-0.87^{**}$											
ID	-0.79**	-0.73**	0.13	0.52**	-0.54**										
SU	0.59**	0.44**	0.10	-0.59**	$0.57^{**}$	-0.15									
TN10p	-0.75**	-0.92**	$0.58^{**}$	0.74**	-0.59**	0.62**	-0.41**								
TN90p	$0.78^{**}$	0.92**	-0.50**	-0.83**	0.68**	-0.61**	0.54**	-0.75**							
TNn	$0.57^{**}$	$0.58^{**}$	-0.20	-0.34*	0.35*	-0.55**	-0.05	-0.58**	0.39**						
TNx	0.55**	0.69**	-0.45**	* -0.60**	0.43**	-0.43**	0.51**	-0.63**	0.74**	0.22					
TR	0.58**	0.61**	-0.24	-0.61**	0.53**	-0.26	$0.79^{**}$	-0.54**	0.71**	0.04	$0.80^{**}$				
TX10p	-0.88**	-0.76**	0.05	0.66**	-0.67**	$0.70^{**}$	-0.51**	0.81**	-0.56**	-0.56**	-0.38*	-0.44**	I.		
TX90p	$0.87^{**}$	0.73**	0.00	$-0.70^{**}$	$0.70^{**}$	-0.65**	0.61**	-0.53**	0.83**	0.41**	0.60**	0.63**	-0.58**		
TXn	0.52**	0.46**	-0.04	-0.26	0.31*	-0.49**	-0.08	-0.47**	0.27	$0.95^{**}$	0.06	-0.07	-0.54**	0.36**	
TXx	0.42**	0.34*	0.02	-0.30*	0.26	-0.33*	0.44**	-0.25	0.42**	-0.01	$0.70^{**}$	0.56**	-0.27	0.49**	-0.07
注:*为	1在0.05	水平(双	尾检验	) 上显著相	相关; **	为在 0.0	1 水平 (	双尾检验	2) 显著林	目关。					
Note: * i	s 0.05 coi	nfidence le	evel, ** i	is 0.01 con	fidence l	evel.									

第三主成分占方差贡献率的 14.4%, DTR 在 第三主成分中为高载荷,载荷值高达 0.98,该指 数反映了最高气温与最低气温变化的关系。前文 分析表明,北疆地区年平均最高气温(TXam)以 0.22 ℃·(10a)<sup>-1</sup>趋势上升,而最低气温(TNam) 以 0.49 ℃·(10a)<sup>-1</sup>的年际倾向率显著上升,两者的 变化趋势具有明显的不对称性;因此,北疆地区 DTR 的变化由两者共同影响,其变化随着最高气 温和最低气温的变化有缩小迹象(图 2c)。

进一步分析各极端冷暖指数与 TXam 和 TNam 的相关关系可以看出(表4),各暖指数(GSL、SU、TN90p、TNx、TR、TX90p、TXx)与 TXam 和 TNam 均呈显著正相关关系(P<0.01),而冷指数(FD、ID、TN10p、TX10p)均与 TXam、TNam 呈显著负相关关系(P<0.01),表明在全球气候系统变暖的大背景下,北疆地区的极端气

温事件主要受日最高、最低气温升高的影响,而 日最低气温的升高对各极端指数的影响更为明显, 北疆地区的这一变化特征与美洲的加勒比海地区 (Peterson et al, 2002)和亚太等地区(Choi et al, 2009)极端气温指数的变化特征基本一致。

4.2.2 大气环流指数和 ENSO 对北疆极端气温的 影响分析

气温的变化与大气环流密切相关,极端气温 事件的发生通常都是由异常的天气波动造成,而 大气环流的异常对极端气温事件的发生提供了基 本的气候背景(李娟等,2012)。姚遥和罗德海 (2014)发现,不同的大气环流对不同区域极端 气温的影响不同。为进一步分析北疆地区极端气 温事件与不同大气环流指数之间的关系,本文选 取了 AO、NAO 指数和 ENSO 指数与北疆极端气 温事件进行 Perason 相关性分析,分析结果如表 5 所示。

可看出,AO指数与北疆地区各极端气温指数的相关性最强,尤其是与极端冷指数的相关性最强,尤其是与极端冷指数的相关性最为明显;NAO指数与暖指数相关性均不显著,但与极端冷指数(TNn、TXn)呈显著正相关;而ENSO与各极端指数的相关性均不显著。Ma et al (2016)基于湖泊沉积物粒度指标分析发现,我国北疆地区的艾比湖流域气候系统受AO影响较为显著;其次是NAO指数,而大多数极端冷指数受这两种大气环流指数(AO、NAO)的影响尤其明显;但ENSO对北疆地区极端气温的影响较小,其原因可能是在长时间序列的研究中,由于ENSO事件的滞后性等特征,其对区域年际气温变化的影响程度不显著(徐静,2013)。

		表5 大檔	气环流指数	<b></b> 数与极端气	温指数相关	性分析		
Tab. 5	The Pearson	correlation	matrix of	atmospher	ic circulation	versus	temperature	extremes

								1			1					
指数 Indices	TXam	TNam	DTR	FD	GSL	ID	SU	TN10p	TN90p	TNn	TNx	TR	TX10p	TX90p	TXn	TXx
AO	0.37**	$0.40^{**}$	-0.17	$-0.31^{*}$	0.23	$-0.28^{*}$	0.15	-0.42**	$0.27^{*}$	0.34*	0.06	0.09	-0.41**	0.17	0.33*	0.11
NAO	0.22	0.19	-0.03	-0.14	0.13	-0.11	0.08	-0.23	0.09	0.36**	-0.01	-0.04	-0.25	0.06	0.35**	0.10
ENSO	0.14	0.23	-0.20	-0.23	0.11	-0.17	-0.06	-0.19	0.22	0.19	0.11	-0.09	-0.05	0.21	0.11	0.01
<ol> <li>a. M</li> </ol>	1.000	1. 77 ( -		) I D +	E 1 H 37	deale M deale	0.01 1.7			He LH M						

注:\*为在 0.05 水平(双尾检验)上显著相关;\*\*为在 0.01 水平(双尾检验)显著相关。

Note: \* is 0.05 confidence level, \*\* is 0.01 confidence level.

## 5 结论

本文主要运用了年均最高气温、年均最低气 温和 14 个极端气温指数来研究北疆地区极端气温 事件的时空变化特征及其对大气环流指数 AO、 NAO、ENSO 的响应。得出以下结论:

(1)时间变化上,近53年北疆地区年平均 最高、最低气温均呈显著升高趋势,尤其是年平 均最低气温在近40年的升温最为明显,DTR表现 为显著的下降趋势。暖指数GSL、TN90p、TNx 和TR均表现为显著的上升趋势,而TX90p、SU 和TXx则表现为不显著的上升趋势。冷指数FD、 ID、TN10p和TX10p均呈下降趋势,其中FD和 TN10p呈显著下降趋势;而TNn和TXn均表现为 不显著的上升趋势。

(2)空间尺度上,各指数空间分布差异明显,如 TXam、TNam 和 DTR 变化趋势较大地区均位于 阿尔泰山和塔城地区;极端暖指数 GSL 和 TX90p

变化幅度较大区域主要位于阿尔泰山的东北地区和 巴音布鲁克草原以北的山地,较小区域均位于西部 温泉等地区,而其他指数变化差异较大的区域也主 要位于以上山地以及伊犁河谷等地区。

(3)从各极端指数的变化幅度来看,冷指数
 (TN10p、TXn、TNn)的增温幅度明显大于部分
 暖指数(TN90p、TXx、TNx);夜指数(TN90p、
 TN10p)的变暖幅度也明显大于昼指数(TX90p、
 TX10p)。

(4) 主成分分析的结果可将 14 个极端气温 指数划分为三个主成分,累积解释了 79.4% 的 方差变率; Perason 相关性分析表明除了 DTR 和 GSL,各指数之间均具有较好的相关性,其中各暖 指数之间、各冷指数呈显著的正相关关系,而冷 指数与暖指数之间则呈显著的负相关关系。

(5) 北疆地区极端气温事件受 AO 指数的影响最大,其次是 NAO 指数,而大多数极端冷指数

受这两种大气环流指数(AO、NAO)的影响尤其 明显;但 ENSO 对北疆地区极端气温的影响较小。

#### 参考文献

- 黄 强,陈子燊. 2014. 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*, 29(8): 956–967. [Huang Q, Chen Z S. 2014. Regional study on the trends of extreme temperature and precipitation events in the Pearl River Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 29(8): 956–967.]
- 李娟,董文杰,严中伟.2012.中国东部 1960-2008年 夏季极端温度与极端降水的变化及其环流背景 [J]. 科学通报,57(8):641-646. [Li J, Dong W J, Yan Z W. 2012. Changes of climate extremes of temperature and precipitation in summer in eastern China associated with changes in atmospheric circulation in East Asia during 1960-2008 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(8): 641-646.]
- 秦大河, Stocker T. 2014. IPCC 第五次评估报告第一工 作组报告的亮点结论 [J]. *气候变化研究进展*, 10(1): 1-6. [Qin D H, Stocker T. 2014. Highlights of the IPCC Working Group I Fifth Assessment Report [J]. Advances Climate Change Research, 10(1): 1-6.]
- 沈永平, 王国亚. 2013. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点 [J]. 冰川冻土, 35(5): 1068-1076. [Shen Y P, Wang G Y. 2013. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report [J]. Journal of Glaciology Geocryology, 35(5): 1068-1076. ]
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社. [Wei F Y. 1999. Diagnose and forecast technology of modern climate statistics [M]. Beijing: China Meteorological Press.]
- 徐 静. 2013. ENSO 事件对青海省旱涝灾害影响研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学. [Xu J. 2013. The impact of ENSO events to droughts and floods in Qinghai Provice [D]. Yang Ling: Northwest Agriculture and Forestry University.]
- 姚 遥,罗德海.2014.北大西洋涛动的纬向位置与大西洋-欧洲阻塞活动的关系以及对欧洲天气的可能影响[J]. 中国科学:地球科学,44(11):2565-2575.[Yao Y, Luo D H. 2014. Relationship between zonal position of the North Atlantic Oscillation and Euro-Atlantic blocking events and its possible effect on the weather over Europe [J]. Science China: Earth Sciences, 57: 2628-2636.]

- 于秀林,任雪松.1998.多元统计分析 [M].北京:中国统计 出版社.[Yu X L, Ren X S. 1998. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: China Statistics Press.]
- 张延伟, 葛全胜, 姜逢清, 等. 2016. 北疆地区 1961—2010 年极端气温事件变化特征 [J]. 地理科学, 36(2): 296-302. [Zhang Y W, Ge Q S, Jiang F Q, et al. 2016. Evolution characteristics of the extreme high and low temperature event in North Xinjiang in 1961—2010 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 36(2): 296-302.]
- 左金清. 2011. AO/NAO 与 ENSO 的联系及其对中国气候异常的影响 [D]. 兰州: 兰州大学. [Zuo J Q. 2011. Relationship between AO/NAO and ENSO and their impact on climate anomalies in China [D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- Aguilar E, Aziz Barry A, Brunet M, et al. 2009. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955 – 2006 [J]. Journal of Geophysical Research, 114, D02115. DOI: 10.1029/2008JD011010.
- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 111, D05109. DOI: 10.1029/2005JD006290.
- Caesar J, Alexander L V, Trewin B, et al. 2011. Changes in temperature and precipitation extremes over the Indo-Pacific region from 1971 to 2005 [J]. *International Journal of Climatology*, 31(6): 791–801.
- Chen Y N, Deng H J, Li B, et al. 2014. Abrupt change of temperature and precipitation extremes in the arid region of Northwest China [J]. *Quaternary International*, 336: 35–43.
- Choi G, Collins D, Ren G, et al. 2009. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955—2007 [J]. *International Journal of Climatology*, 29(13): 1906–1925.
- Fang S, Qi Y, Han G, et al. 2015. Changing trends and abrupt features of extreme temperature in mainland China during 1960 to 2010 [J]. *Earth System Dynamics Discussions*, 6(1): 979–1000.
- Fioravanti G, Piervitali E, Desiato F. 2016. Recent changes of temperature extremes over Italy: an index-based analysis [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 123(3/4): 473–486.
- Guan Y, Zhang X, Zheng F, et al. 2015. Trends and variability of daily temperature extremes during 1960-2012 in the

Yangtze River Basin, China [J]. *Global and Planetary Change*, 124: 79–94.

- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2013.
- Keggenhoff I, Elizbarashvili M, Amiri-Farahani A, et al. 2014. Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971-2010 [J]. Weather and Climate Extremes, 4: 75-85.
- Li L, Li C Y, Song J. 2012. Arctic Oscillation anomaly in winter 2009/2010 and its impacts on weather and climate [J]. *Science China: Earth Sciences*, 55(4): 567–579.
- Li Z, Zheng F L, Liu W Z, et al. 2010. Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961—2007 [J]. *Quaternary International*, 226(1/2): 92–100.
- Liu W, Zhang M, Wang S, et al. 2013. Changes in precipitation extremes over Shaanxi Province, northwestern China, during 1960-2011 [J]. *Quaternary International*, 313: 118-129.
- Ma L, Wu J L, Jilili Abuduwaili. 2016. Variation in aeolian environments recorded by the particle size distribution of lacustrine sediments in Ebinur Lake, northwest China [J]. *SpringerPlus*, 5: 481. DOI: 10.1186/s40064-016-2146-0.
- Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries [J]. *Nature*, 392(6678): 779–787.
- Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. 2000. El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale variability and its

impacts on natural ecosystems and society [M]//Díaz H F, Markgraf V. New York: Cambridge University.

- Peterson T C, Taylor M A, Demeritte R, et al. 2002. Recent changes in climate extremes in the Caribbean region [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D21). DOI: 10.1029/2002JD002251.
- Tian Q, Yang S. 2016. Regional climatic response to global warming: Trends in temperature and precipitation in the Yellow, Yangtze and Pearl River basins since the 1950s [J]. *Quaternary International*, 440: 1–11.
- Visbeck M, Chassignet E P, Curry R G, et al. 2003. The ocean's response to North Atlantic Oscillation variability [M]// Hurrell J W, Kushnir Y, Ottersen G, et al. The North Atlantic Oscillation: climatic significance and environmental impact. Geophysical Monograph 134. Washington, DC: American Geophysical Union: 113–146.
- Wang B, Zhang M, Wei J, et al, 2013a. Changes in extreme precipitation over Northeast China, 1960—2011[J]. *Quaternary International*, 298: 177–186.
- Wang B, Zhang M, Wei J, et al, 2013b. Changes in extreme events of temperature and precipitation over Xinjiang, northwest China, during 1960-2009 [J]. *Quaternary International*, 298: 141-151.
- Yan Z, Jones P D, Davies T D, et al. 2002. Trends of extreme temperatures in Europe and China based on daily observations [J]. *Climatic Change*, 53(1/2/3): 355-392.
- 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 [J]. *International Journal of Climatology*, 36(3): 1051–1066.

171