

# 地理因子在北疆极端气温趋势变化中的作用

赵 焯<sup>1,2</sup>, 卞 韬<sup>1,2,3\*</sup>, 任国玉<sup>3,4</sup>, 张艳品<sup>1,2</sup>, 韩子霏<sup>5</sup>

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830001; 2. 河北省石家庄市气象局, 石家庄 050081;  
3. 中国地质大学(武汉)环境学院大气科学系, 武汉 430074; 4. 中国气象局气候研究开放实验室,  
国家气候中心, 北京 100081; 5. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

**摘 要:** 论文利用1961—2017年北疆地区37个观测站的逐日气温资料以及高程数据, 选取了3类(冷指数、暖指数和极值指数)15项极端气温指数, 采用相关分析和灰色关联度统计分析方法, 研究了地理因子在北疆极端气温趋势变化中的作用。结果表明: ① 北疆地区气候变暖显著, 极端气温冷指数呈非常显著的下降趋势, 暖指数及极值指数呈显著或非常显著的上升趋势; 气候变暖主要体现为极端冷事件频次降低、夜间温度以及极端低温升高, 具有白天和夜间变化的不对称性以及低温和高温变化的不平衡性特征。② 极端气温指数在北疆中部盆地地区上升(下降)趋势最强, 在北疆北部及南部山区地带, 上升(下降)趋势相对较小。地形分布对气候趋势的影响程度暖指数大于冷指数, 海拔高度对极端气温事件的出现频次有较大影响。③ 极端气温指数趋势的经向分布是其空间分布的主导模态。北疆地区极端气温指数趋势性变化北部大于南部、西部大于东部, 南北趋势性变化差异最大处位于北疆中部地区。极端气温指数趋势性变化的南北差异与海拔高度呈负相关, 在山地地区, 纬度对于极端气温指数的气候趋势影响较小, 而在盆地地区, 纬度为影响极端气温指数气候趋势的重要因子。经向上, 除炎热夜数增加趋势与海拔高度的相关性较低外, 北疆东部极端气温指数的趋势性变化与海拔高度相关性高于北疆西部。④ 地理因子对极端气温指数的趋势变化具有显著的影响(灰色关联度均大于0.6, 为高度关联), 影响程度暖指数大于冷指数。地理因子对冷指数的影响在山地、丘陵地区较强, 而对暖指数的影响主要为地势较为平缓的丘陵和盆地地区。

**关键词:** 北疆; 极端气温指数; 变化趋势; 地理因子

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate, IPCC)第五次评估报告<sup>[1]</sup>指出, 全球平均地表升温速率达0.12 °C/10 a。在全球变暖的背景下, 中国气温呈现明显上升的趋势<sup>[2-3]</sup>, 区域性极端气候事件的频率和强度也发生了明显变化<sup>[4]</sup>, 对人类社会和自然系统产生了重要影响。因此, 极端气候变化研究受到了国内外学者的广泛关注<sup>[5-6]</sup>。

中国地区气温极端冷指数呈下降趋势, 极端暖指数呈上升趋势, 且具有显著的区域性差异<sup>[7-8]</sup>。已有研究认为, 中国地区与最低气温有关的极端气温事件强度和频率变化明显, 与最高气温有关的极端

气温事件强度和频率变化较弱<sup>[9-10]</sup>; 冷事件的减少主要发生在20世纪80年代以后的冬季, 而暖事件的增加主要出现在20世纪90年代以后的夏秋季<sup>[10]</sup>。大气环流的年代际异常与极端气温事件相互作用, 大气环流年代际异常是调控极端气温变化的重要因子, 而极端低温事件的群发性减弱也是年代际气候变暖的主要原因<sup>[6,11]</sup>。有研究表明, 北极涛动(Arctic Oscillation, AO)为负位相时中国北方地区出现极端低温天气的可能性更高<sup>[12]</sup>, 而AO正位相的维持并持续增强导致同期东亚冬季风持续减弱, 造成东亚北部地区冬季显著增暖<sup>[13]</sup>。另外, 西伯利亚高压、东亚大槽及东亚急流的异常偏强也有利于中

收稿日期: 2020-06-05; 修订日期: 2020-11-04。

基金项目: 中国沙漠气象科学研究基金项目(Sqj2018008)。[Foundation: Desert Meteorological Science Research Foundation of China, No. Sqj2018008.]

第一作者简介: 赵焯(1989—), 女, 河北石家庄人, 工程师, 主要从事气候变化及气象灾害研究。E-mail: zhaoxuanlx@163.com

\*通信作者简介: 卞韬(1977—), 女, 河北石家庄人, 正研级高工, 主要从事气候变化研究。E-mail: biantao0107@163.com

引用格式: 赵焯, 卞韬, 任国玉, 等. 地理因子在北疆极端气温趋势变化中的作用[J]. 地理科学进展, 2021, 40(4): 681-692. [Zhao Xuan, Bian Tao, Ren Guoyu, et al. Possible impacts of geographical factors on long-term trends of extreme temperature indices over northern Xinjiang, China. Progress in Geography, 2021, 40(4): 681-692.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.04.012

国南方低温的出现<sup>[14]</sup>。

新疆位于中国的西北地区,幅员辽阔、地形复杂,生态环境脆弱,对气候变化较为敏感。新疆农牧业发展及生产生活安全受极端气候事件的显著影响。徐贵青等<sup>[15]</sup>研究表明,新疆气温线性增温率显著高于全国平均增温率,其中北疆增温率最大<sup>[16]</sup>,可能说明北疆地区对全球变暖的响应更为明显。冬季风强度减弱所导致极端冷事件减少和气温升高,可能为冬季新疆显著变暖的重要原因<sup>[17]</sup>。丁之勇等<sup>[18]</sup>发现,AO对北疆地区极端气温冷指数变化有明显作用,北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)对极端气温的变化也有一定的作用。慈晖等<sup>[19]</sup>研究表明,新疆变暖幅度盆地大于山区,北疆地区冷指数的增温幅度明显大于部分暖指数,夜指数的增温幅度大于昼指数,这一特征在山麓、山谷等地区表现最为明显<sup>[18]</sup>,说明地理因子在极端气温变化中可能起着重要作用。

北疆作为新疆地区的一个特殊单元,降水较为丰沛,经济较为发达。北疆地区农业生产主要以种植粮食、棉花、油料、蔬菜等作物为主<sup>[20]</sup>,气候变化对当地自然灾害和农业生产影响较大<sup>[21-23]</sup>。虽然许多学者对北疆地区极端气候事件变化进行了系列研究,但多着眼于极端气候事件变化时空特征及其与大气环流之间的联系,而关于地理因子对极端气温作用的研究尚未引起广泛关注。因此,本文利用1961—2017年北疆地区37个观测站(图1)的逐日气温资料及高程数据,采用多种统计分析方法,分析地理因子在北疆极端气温趋势变化中的作用,为深入了解北疆地区极端气候变化、保护生态环境和促进农业生产提供科学依据。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究数据

(1) 气温数据。本文采用新疆气候中心提供的北疆地区资料完整的37个观测站1961—2017年的逐日最高气温、最低气温、平均气温以及测站的海拔高度。所用资料经过了严格的质量控制,订正了由于各种人为因素造成的错误值,并进行了均一化检验和订正。所用资料中的异常值也是温度极值的一种表现,因其出现为小概率事件,对冷指数、暖指数等反映极端冷暖事件频次的指数来说影响不大,因此本文对其不做处理。

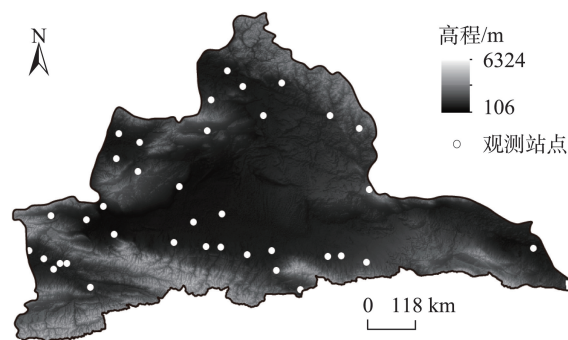


图1 北疆地形及观测站点分布

Fig.1 Topography and station distribution of northern Xinjiang

(2) 高程(海拔高度)数据。来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)北疆地区 ASTER GDEM数据,空间分辨率为30 m×30 m。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 极端气温指数

根据北疆天气气候特点,参考国际气候变化检测和指标专家组的定义,本文选取15项极端气温指数进行研究。以往研究多基于极端气温指数的统计方法来将其分类<sup>[17,24]</sup>,然而这种方法难以反映指数的气候属性。为方便对不同气候属性的指数进行对比,本文将15项极端气温指数分为3类,分别为冷指数、暖指数和极值指数,详见表1。其中冷夜日数、冷昼日数、暖夜日数、暖昼日数的计算分别以某台站1961—2017年中某日的最高(低)气温资料的第90(10)个百分位值作为该站该日统计指数的上(下)阈值。如某日最高气温超过(低于)其上(下)阈值,则认为该日为一个暖(冷)昼事件;如某日最低气温超过(低于)其上(下)阈值,则认为该日为一个暖(冷)夜事件<sup>[24]</sup>。

极端气温指数趋势计算采用最小二乘法,用以定量反映气候序列的气候变化趋势。极端气温指数趋势系数采用57 a极端气温指数序列与自然数列的相关系数来表示,用以消除均方差和单位对线性回归系数数值大小的影响,从而可以在不同的地理位置、不同的极端气温指数之间比较趋势变化的大小。显著性水平达到0.10、0.05、0.01分别表示趋势性为较显著、显著、非常显著<sup>[25]</sup>。

#### 1.2.2 地表糙率 and 坡位定义

为了衡量地理因子对于极端气温指数趋势变化的影响,本文对地表糙率及坡位指数进行了计算,计算公式如下:

表1 本文使用的极端气温指数

Tab.1 Extreme temperature indices used in this study

分类	指数名称	代码	指数定义	单位
冷指数	寒冷日数	CD0	日平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的全部日数	d
	霜冻日数	FD0	日最低气温 $< 0^{\circ}\text{C}$ 的全部日数	d
	结冰日数	ID0	日最高气温 $< 0^{\circ}\text{C}$ 的全部日数	d
	冷夜日数	TN10p	日最低气温 $< 10\%$ 分位值的日数	d
	冷昼日数	TX10p	日最高气温 $< 10\%$ 分位值的日数	d
暖指数	炎热日数	HD35	日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的全部日数	d
	夏季日数	SU	日最高气温 $> 25^{\circ}\text{C}$ 的全部日数	d
	炎热夜数	TR	日最低气温 $> 20^{\circ}\text{C}$ 的全部日数	d
	暖夜日数	TN90p	日最低气温 $> 90\%$ 分位值的日数	d
	暖昼日数	TX90p	日最高气温 $> 90\%$ 分位值的日数	d
极值指数	植物生长季	GSL	年内日平均气温连续 $5\text{ d} > 5^{\circ}\text{C}$ 的总日数	d
	极端最高气温	TXx	年内日最高气温的最大值	$^{\circ}\text{C}$
	极端最低气温	TNx	年内日最低气温的最小值	$^{\circ}\text{C}$
	最高气温极小值	TXn	年内日最高气温的最小值	$^{\circ}\text{C}$
	最低气温极大值	TNx	年内日最低气温的最大值	$^{\circ}\text{C}$

$$M = 1/\cos(S \times \pi/180) \quad (1)$$

$$\text{TPI} = \lg\left[\left(\frac{E}{\bar{E}} + 1\right) \times \left(\frac{S}{\bar{S}} + 1\right)\right] \quad (2)$$

式中:  $M$  为地表糙率,  $S$  为坡度(利用 ArcGIS 软件中坡度计算模块通过输入高程数据计算得出),  $\bar{S}$  为该点所在地区的平均坡度,  $\text{TPI}$  为坡位指数,  $E$  为海拔高度,  $\bar{E}$  为该点所在地区的平均海拔高度<sup>[26]</sup>。

北疆地区地表糙率在 1~16.95 之间, 当地表糙率为 1 时表明地表非常光滑, 反之则粗糙。坡位指数为海拔高度及坡度的综合反映, 海拔高及坡度大的地方坡位指数高, 反之则低。北疆地区坡位指数在 0.24~1.3 之间, 在山区较高, 盆地较低。

### 1.2.3 灰色关联度

采用相关分析来衡量海拔高度与极端气温指数之间的相关关系, 采用灰色关联度来分析不同地理因子(海拔高度、经度、纬度、地表糙率、坡位指数)与极端气温指数之间的关联程度。灰色关联度的计算采用基于熵值法赋权的灰色关联度量化模型<sup>[25]</sup>。

熵值法确定权重系数计算步骤如下:

① 对原始数据进行标准化处理, 转换为无量纲数据。

② 假设多属性矩阵  $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A_1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ A_2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m & x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$ , 用

$P_{ij}$  表示第  $j$  个属性下第  $i$  个方案  $A_i$  的贡献度, 用

$E_j$  表示多方案对属性  $X_j$  的贡献总量, 如果  $P_{ij} = 0$  则定义  $P_{ij} \ln(P_{ij}) = 0$ 。

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (3)$$

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (4)$$

③ 权重计算公式:

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (5)$$

灰色关联度计算步骤如下:

① 确定特征序列  $x_0(t) = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(m)\}$ ,  $t = 1, 2, \dots, m$ ; 确定因素序列  $x_i(t) = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m)\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $t = 1, 2, \dots, m$ )。

② 对数据进行标准化处理, 转换为无量纲数据。

③ 计算关联系数  $\zeta$ :

$$\zeta(x_0(t), x_i(t)) = \frac{\min_t \min_i |x_0(t) - x_i(t)| + \rho \max_t \max_i |x_0(t) - x_i(t)|}{|x_0(t) - x_i(t)| + \rho \max_t \max_i |x_0(t) - x_i(t)|} \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为分辨率, 取值为 0.5。

④ 计算加权关联度  $R$ :

$$R_{ij} = \sum_{t=1}^n W_j \zeta(x_0(t), x_i(t)) \quad (7)$$



2 结果分析

2.1 极端气温指数趋势的时间变化特征

表2给出了1961—2017年北疆地区极端气温指数的线性趋势及趋势系数,可以看到,近57 a北疆地区冷指数中除结冰日数外,均呈非常显著的下降趋势,各指数均通过了0.01的显著性检验,其中冷夜日数下降趋势最强,趋势系数达到-0.81,气候倾向率为-10.21 d/10 a;霜冻日数及寒冷日数次之,趋势系数均为-0.53,气候倾向率分别为-5.34 d/10 a及-3.2 d/10 a。暖指数及极值指数呈显著或非常显著的上升趋势,通过信度0.05及以上的显著性检验,其中炎热夜数及暖夜日数上升趋势最为显著,趋势系数分别达到0.72及0.78,气候倾向率分别为4.39 d/10 a及6.83 d/10 a。

对比3类指数可知,极端气温指数变化趋势(绝对值)表现出冷指数>暖指数>极值指数、夜日数>昼日数、极端低温>极端高温,表明1961年以来,在全球气温增暖的趋势下<sup>[1]</sup>,北疆地区极端气温事件的日数变化强于强度变化、夜间变化强于白天变化、极端低温变化强于极端高温变化。北疆地区气候变暖具有白天和夜间变化的不对称性<sup>[15]</sup>以及低温和高温变化的不平衡性,北疆地区气候变暖主要表征为极端气候冷事件频次的降低、夜间温度以及极

端低温的升高。

2.2 极端气温指数趋势与海拔高度、地形之间的关系

北疆地区极端气温指数线性趋势与地形密切相关。其中,暖指数中炎热日数、夏季日数、炎热夜数均与海拔高度呈负相关关系,并且炎热夜数与海拔高度呈显著相关,通过了0.05的显著性检验(表2)。表明上述暖指数中,盆地地区较山区增加更为明显,这可能与人口、城市在盆地聚集所造成的局地气候增暖有关。如炎热日数与炎热夜数中淖毛湖站(海拔479 m)的趋势系数分别为0.66、0.84,而西部的木垒站(海拔1272.1 m)的趋势系数仅为0.36、0.57,海拔高度不同导致两站之间线性趋势存在差异。暖指数中暖夜日数、暖昼日数、生物生长季与海拔高度呈正相关关系,且暖夜日数与海拔高度的相关性非常显著,通过了0.01的显著性检验。冷指数中寒冷日数、结冰日数、冷昼日数的减小趋势随海拔高度递增,其中结冰日数与海拔高度显著相关,通过了0.05的显著性检验,表明山地结冰日数对全球变暖的响应较盆地敏感。冷指数中霜冻日数、冷夜日数则与海拔高度呈较弱的正相关关系。极值指数中除极端最低气温外,其余指数均与海拔高度呈较弱的正相关关系,其上升趋势随海拔高度的增加而增强。与极值指数相比,海拔高度与

表2 1961—2017年北疆地区极端气温指数变化趋势、趋势系数以及趋势系数与海拔高度的相关系数  
Tab.2 Trends and trends ratio of extreme temperature indices in northern Xinjiang during 1961–2017 and correlation between trends ratio and altitude

分类	指数名称	线性趋势	单位	趋势系数	与海拔高度相关系数
冷指数	寒冷日数(CD0)	-3.20**	d/10 a	-0.53**	-0.20
	霜冻日数(FD0)	-5.34**	d/10 a	-0.53**	0.09
	结冰日数(ID0)	-0.83	d/10 a	-0.14	-0.35*
	冷夜日数(TN10p)	-10.21**	d/10 a	-0.81**	0.12
	冷昼日数(TX10p)	-3.26**	d/10 a	-0.43**	-0.03
暖指数	炎热日数(HD35)	3.40**	d/10 a	0.54**	-0.04
	夏季日数(SU)	1.93**	d/10 a	0.42**	-0.27
	炎热夜数(TR)	4.39**	d/10 a	0.72**	-0.34*
	暖夜日数(TN90p)	6.83**	d/10 a	0.78**	0.77**
	暖昼日数(TX90p)	2.57**	d/10 a	0.37**	0.10
	生物生长季(GSL)	1.72*	d/10 a	0.31*	0.03
极值指数	极端最高气温(TXx)	0.21*	℃	0.28*	0.11
	极端最低气温(TNn)	0.81*	℃	0.29*	-0.10
	最高气温极小值(TXn)	0.75*	℃	0.28*	0.06
	最低气温极大值(TNx)	0.33**	℃	0.37**	0.02

注:\*,\*\*分别表示通过0.05、0.01显著性水平检验。

冷指数及暖指数的相关程度较高,表明海拔高度对极端气温事件的出现频次有较大影响,而对极端气温事件的程度影响较小。

北疆地区海拔高度与极端气温指数的趋势变化之间存在一定的线性相关关系,但这种简单的相关关系并不能充分解释海拔高度对于极端气候事件的影响。陈志军<sup>[27]</sup>研究发现,海拔高度与地形为影响山区气温分布与变化的重要地理因子,且经纬度、下垫面对气温的变化也起着不可忽视的作用。本文挑选经度、纬度、海拔高度、坡位指数、地表糙率5个地理因子代表北疆地理条件,综合考虑气候变暖及海拔高度的影响,挑选4个极端气温指数(霜冻日数、冷夜日数、炎热夜数、暖夜日数)进行研究,分析其与地理因子之间的关系,以期揭示北疆地区地理因子在极端气候事件趋势变化中的作用。

由北疆地区极端气温指数趋势系数的空间分布(图2)可以看出,冷指数北疆全区表现为一致的下降趋势。暖指数中,暖夜日数在北疆全区表现为一致的上升趋势,炎热夜数呈现出全区的上升趋势,仅在阿勒泰附近地区表现为下降趋势。霜冻日数、

冷夜日数下降趋势及暖夜日数上升趋势显著,趋势性非常显著的站点超过90%,其中冷夜日数非常显著的站点达到100%,炎热夜数增加趋势呈非常显著的范围相对较小(约78.38%)。霜冻日数、冷夜日数、炎热夜数及暖夜日数的趋势系数(绝对值)分布相似:在北疆中部盆地地区下降(上升)趋势最强,在北疆北部及南部山区地带,下降(上升)趋势相对较小,炎热夜数与暖夜日数中气候趋势不显著的站点均位于北疆北部及南部山区。其可能原因为,北疆地区城市和人口集中于盆地地区所造成的城市化增温,以及北疆北部及南部山区地带地形起伏相对较大,高海拔山区局地地形因素通过影响局地辐射平衡造成弱的升温趋势<sup>[28]</sup>,使得冷(暖)指数下降(上升)趋势减弱,并且暖指数趋势减弱程度大于冷指数,部分地区甚至表现为较弱的下降趋势。由以上分析可知,盆地与山地对极端气温指数气候趋势的影响不同,并且地形分布对暖指数气候趋势的影响程度大于冷指数。

2.3 地理因子对极端气温指数趋势分布的影响

图3为北疆地区极端气温指数趋势系数的空间

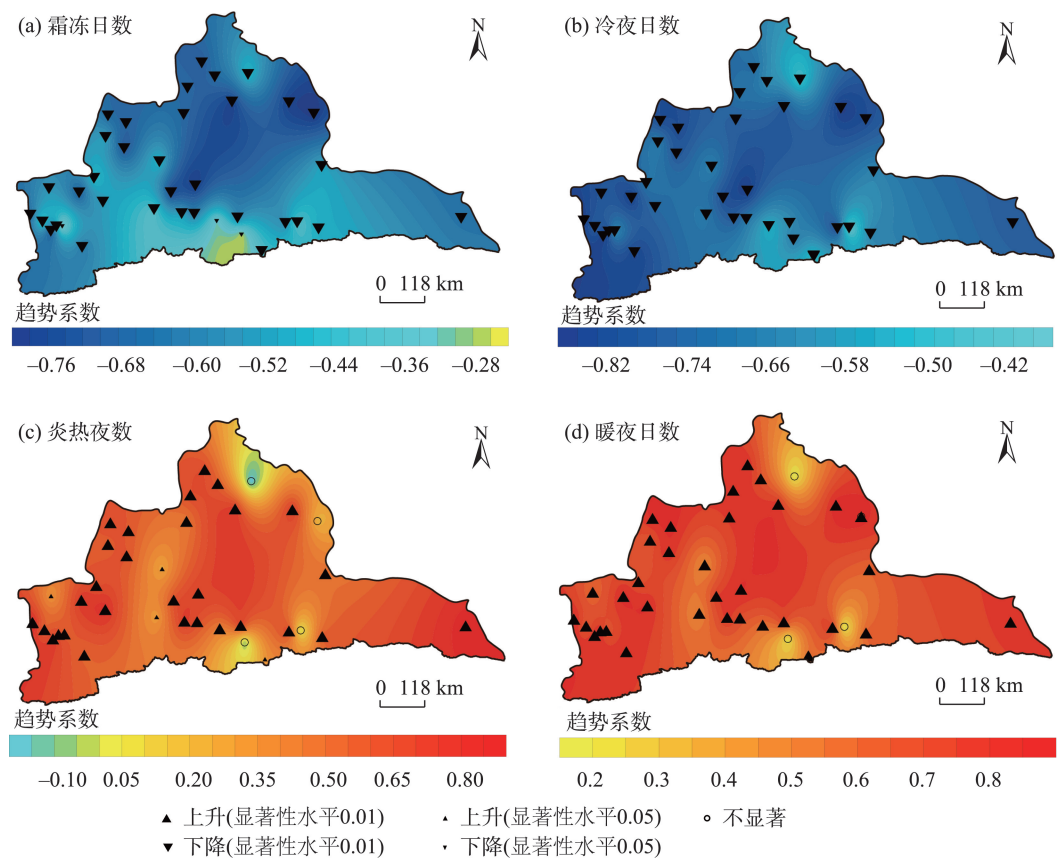
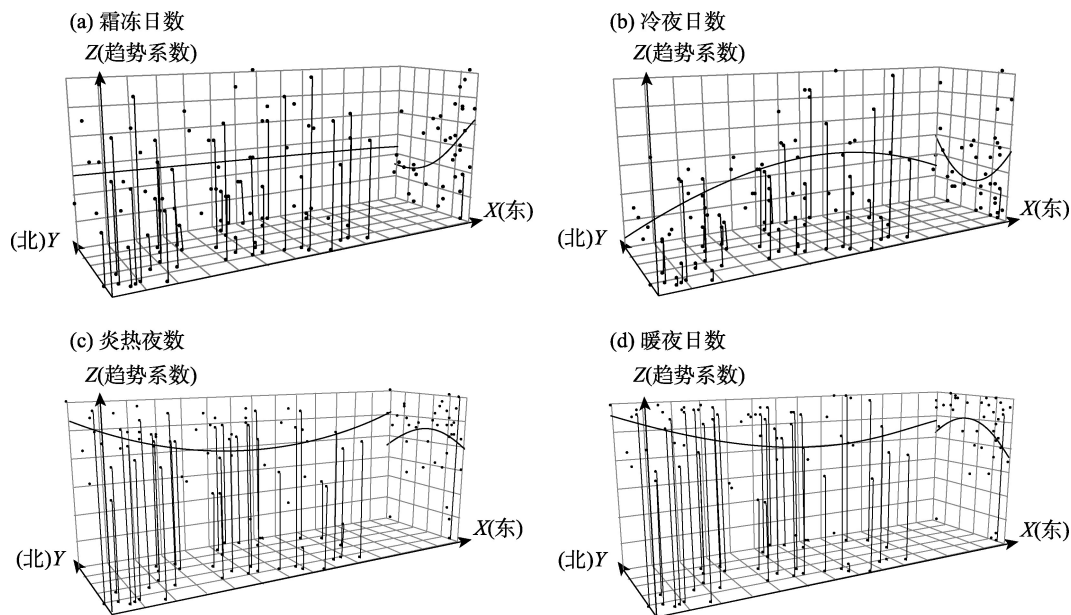


图2 1961—2017年北疆地区极端气温指数趋势系数的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of extreme temperature index trends in northern Xinjiang, 1961–2017



注:图中坐标原点不是零点,趋势系数Z轴仅表示由低值指向高值,即冷指数减弱趋势随Z的增加而降低,暖指数增加趋势随Z的增加而增大。

图3 北疆地区极端气温指数趋势系数的空间趋势分布

Fig.3 Spatial distribution of extreme temperature index trends in northern Xinjiang

趋势分布。从纬向分布上来看,冷夜日数、炎热夜数和暖夜日数的趋势系数呈二项式分布,且极值点位于北疆中部。冷夜日数的减少趋势以及炎热夜数与暖夜日数的增加趋势随经度的增加表现为先减小后增大,并且北疆西部大于东部。与之不同的是,霜冻日数在纬向上呈准线性分布,减小趋势随经度的增加而增大。从经向分布上来看,4项极端气温指数趋势系数均呈二项式分布,霜冻日数及冷夜日数的减小趋势、炎热夜数与暖夜日数的增加趋势均随纬度的增加先增大后减小,但其极值点所处位置并不一致,霜冻日数位于北疆北部,冷夜日数、炎热夜数及暖夜日数位于北疆中部。通过对比北疆南部与北部的趋势系数可以看出,冷夜日数减少趋势与炎热夜数增加趋势在北疆南部与北部相当,而霜冻日数的减少趋势在北疆北部远大于南部地区,暖夜日数的增加趋势则相反。

由北疆地区极端气温指数趋势系数的空间分布(图2)可知,极端气温指数的趋势性变化在北疆中部盆地地区最明显,这与极端气温指数趋势性变化随纬度增加先增大后减小一致,而与其随经度的变化相反(图3),表明纬度因子对于极端气温指数趋势分布的影响强于经度因子,极端气温指数趋势的经向分布是其空间分布的主导模态。

图4、图5分别以纬度44°N、46°N以及经度

84°E、90°E为例,展现了北疆地区极端气温指数趋势系数及海拔高度的纬向、经向分布,进一步揭示北疆地区极端气温指数趋势变化的经向及纬向差异,及其与海拔高度的关系。

北疆地区海拔高度在87°E以西,北部低于南部,其中83.4°E左右差异最大,约为2700 m;而87°E以东,南部与北部海拔高度相当。极端气温指数增加(减小)趋势均表现为北部大于南部,并且南北差异主要集中于北疆中部(84°E~92°E)地区。北疆地区城市与人口分布北部大于南部,城市化增温对北部气温增暖为正贡献,天山山脉起伏较大,地形的遮蔽作用对南部气温增暖为负贡献,这可能为极端气温指数增加(减小)趋势均北部大于南部的重要原因。4个极端气温指数增加(减少)趋势在北疆西部地区南北差异较小,但随着经度增大,海拔高度的降低,其南北差异逐渐增加,而后随着海拔高度的增加南北差异又逐渐减小。以上分析表明,在山地地区,纬度对于极端气温指数的气候趋势影响较小,而在盆地地区,纬度为影响极端气温指数气候趋势的重要因子。北疆中部(84°E~92°E)地区的偏南纬度(44°N),极端气温指数增加(减少)趋势与海拔高度呈正相关,即自西向东,变化趋势随海拔高度先减小后增大。而在92°E以东,暖指数增加趋势与海拔高度呈负相关,冷指数中霜冻日数减少趋势



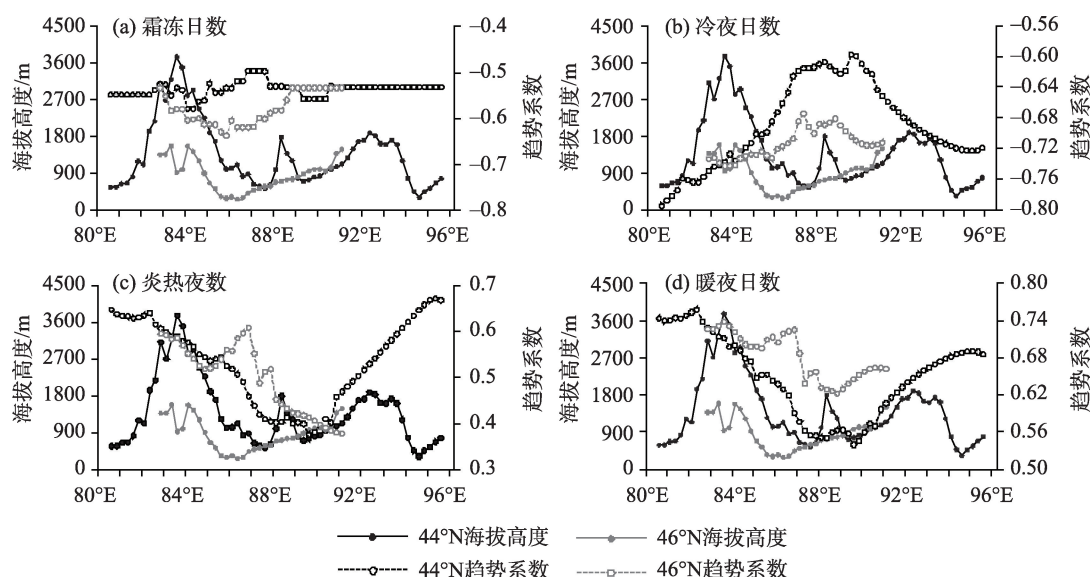


图4 北疆地区极端气温指数趋势系数及海拔高度的纬向分布

Fig.4 Latitudinal distribution of extreme temperature index trends and altitude in northern Xinjiang

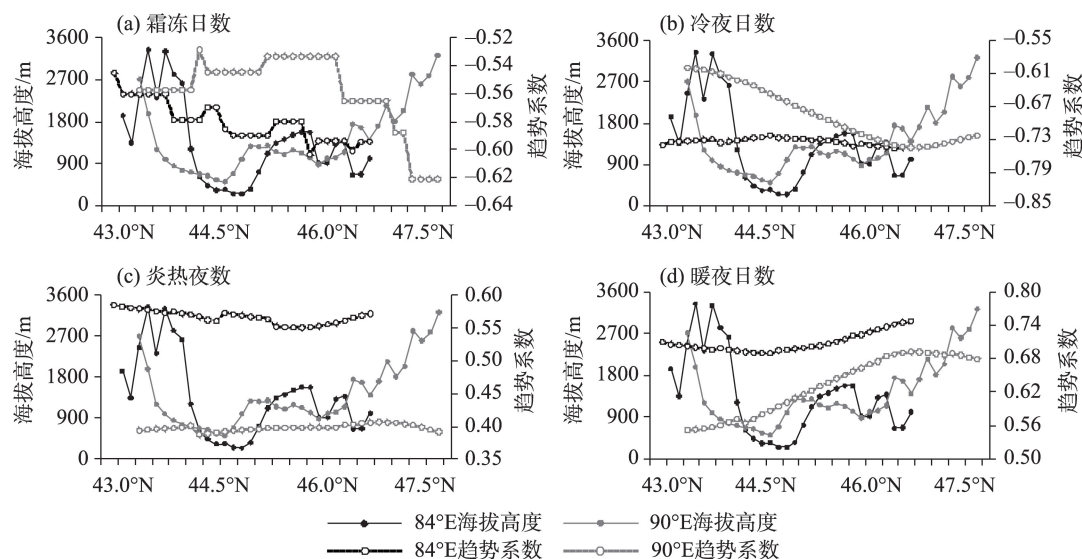


图5 北疆地区极端气温指数趋势系数及海拔高度的经向分布

Fig.5 Meridional distribution of extreme temperature index trends and altitude in northern Xinjiang

随海拔高度变化不大,而冷夜日数减少趋势依然与海拔高度呈正相关。在北疆中部(84°E~92°E)地区的偏北纬度(46°N),极端气温指数增加(减少)趋势与海拔高度呈负相关,自西向东随海拔高度先增大后减小。北疆地区北部与南部极端气温指数增加(减少)趋势随海拔高度呈现相反的变化趋势,这可能是由于北部人为气溶胶辐射强迫负作用产生的降温效应(草帽效应)的影响<sup>[29]</sup>。

北疆地区东部与西部海拔高度在44.3°N以北差异不大,44.3°N以南东部海拔高度低于西部,最

大海拔高度差位于44°N左右,约为2250 m。极端气温指数增加(减小)趋势均表现为西部大于东部,“雪/冰—反照率”的正反馈作用可能为其重要的驱动作用。气温增暖致使北疆西部山区冰雪消融加快,无雪期增长,地表反照率的减小使地表能够吸收更多的太阳辐射使温度升高,造成冰雪的进一步消融,这种正反馈机制造成北疆西部地区极端气温指数增加(减小)趋势大于东部<sup>[28]</sup>。其中东西差异最大处,霜冻日数位于北疆地区中部(44.3°N~47°N),冷夜日数与暖夜日数位于北疆地区南部(45°N以

南),而炎热夜数东西差异随纬度的变化并不明显。在北疆西部地区(84°E),冷夜日数减小趋势和炎热夜数增加趋势与海拔高度均无明显相关性,霜冻日数的减少趋势与暖夜日数的增加趋势在44.3°N以北与海拔高度呈正相关。在北疆东部地区(90°E),霜冻日数、冷夜日数的减少趋势与暖夜日数的增加趋势与海拔高度呈正相关,炎热夜数的增加趋势随海拔高度的变化不明显。由此可以看出,炎热夜数增加趋势在同一经度上与海拔高度的相关性较低,北疆东部极端气温指数的变化趋势与海拔高度相关性高于北疆西部。

2.4 地理因子对极端气温指数趋势变化影响程度

极端气温指数的趋势变化与地理因子之间的灰色关联度表示地理因子对极端气温指数趋势变化的影响程度,关联度越高表示影响程度越强,通常当 $0 < R \leq 0.3$ 时为轻度关联,当 $0.3 < R \leq 0.6$ 时为中度关联,当 $0.6 < R \leq 1$ 时为高度关联。本文选取了5个地理因子(经度、纬度、海拔高度、坡位指数、地表糙率)与极端气温指数趋势系数进行灰色关联分析,来研究地理因子对极端气温指数趋势变化的影响程度及影响区域。

由表3可以看出,5个地理因子与各极端气温指数趋势系数之间的灰色关联度均大于0.6,为高度关联,表明地理因子对极端气温指数的趋势变化具有显著的影响。与不同极端气温指数具有最强关联性的地理因子有一定差异,如霜冻日数与炎热夜数的最高关联性地理因子为海拔高度与坡位指数,冷夜日数的最高关联地理因子为纬度,而暖夜日数的最高关联因子为纬度与海拔高度。综合来看,与极端气温指数关联性最强的地理因子为海拔高度,其次为纬度,这与极端气温指数趋势的经向分布是其空间分布的主要模态(图3)相一致。由于太阳辐射随纬度的增加而减小,并且气温随海拔高

度的增加而降低,纬度、海拔高度分别为影响气温水平与垂直分布的关键因子,在其气候趋势变化中起着重要作用,因此二者与极端气温指数的趋势变化之间也具有密切的联系。与此同时,城市与人口多集中于海拔高度较低的盆地及丘陵地区,北疆北部多于南部,且城市化对区域气候有着重要影响,因此纬度与海拔高度对极端气温指数趋势系数的影响程度中也包含有城市化的部分贡献。

图6为极端气温指数趋势系数与地理因子(经度、纬度、海拔高度、坡位指数、地表糙率)灰色关联度的空间分布,北疆地区关联度均大于0.4,为中度到高度关联,表明地理因子对北疆全区极端气温指数趋势变化起着重要作用。灰色关联度的空间分布中,霜冻日数与冷夜日数较为一致,炎热夜数与暖夜日数分布较为一致,但冷暖指数之间的差异较大,并且暖指数高度关联的站点多于冷指数,这表明地理因子对暖指数趋势变化的影响程度高于冷指数。冷指数中为中度关联的站点多位于阿勒泰地区东部以及昌吉南部,最大关联性地区位于博尔塔拉、塔城以及哈密北部地区。暖指数为中度关联的站点位于阿勒泰地区北部,整体与冷指数相似,但其关联性的极值分布与冷指数有很大不同,最大关联性集中于塔城、昌吉北部以及阿勒泰南部地区。由此可以看出,地理因子对冷指数的影响在山地、丘陵地区更为突出,而对暖指数的影响主要集中于地势较为平缓的丘陵和盆地地区。

3 结论与讨论

本文通过分析北疆地区极端气温趋势的时空特征以及地理因子在北疆极端气温趋势变化中的作用,得出以下结论:

(1) 北疆地区气候变暖显著,极端气温冷指数呈非常显著的下降趋势,暖指数及极值指数呈显著或非常显著的上升趋势。极端气温事件的频次变化强于强度变化、夜间变化强于白天变化、极端低温变化强于极端高温变化。气候变暖具有白天和夜间变化的不对称性以及低温和高温变化的不平衡性,主要体现为极端气候冷事件频次降低、夜间温度以及极端低温的升高。

(2) 极端气温指数线性趋势与地形关系密切,地形分布对暖指数表征的气候趋势的影响程度大于冷指数。海拔高度对极端气温事件的出现频次

表3 北疆地区极端气温指数趋势系数与地理因子间的灰色关联度

Tab.3 Grey correlation between extreme temperature index trends and geographical factors in northern Xinjiang

指数	经度	纬度	海拔高度	坡位指数	地表糙率
霜冻日数	0.61	0.65	0.68	0.68	0.63
冷夜日数	0.67	0.70	0.66	0.66	0.67
炎热夜数	0.69	0.70	0.71	0.71	0.69
暖夜日数	0.69	0.72	0.72	0.69	0.67



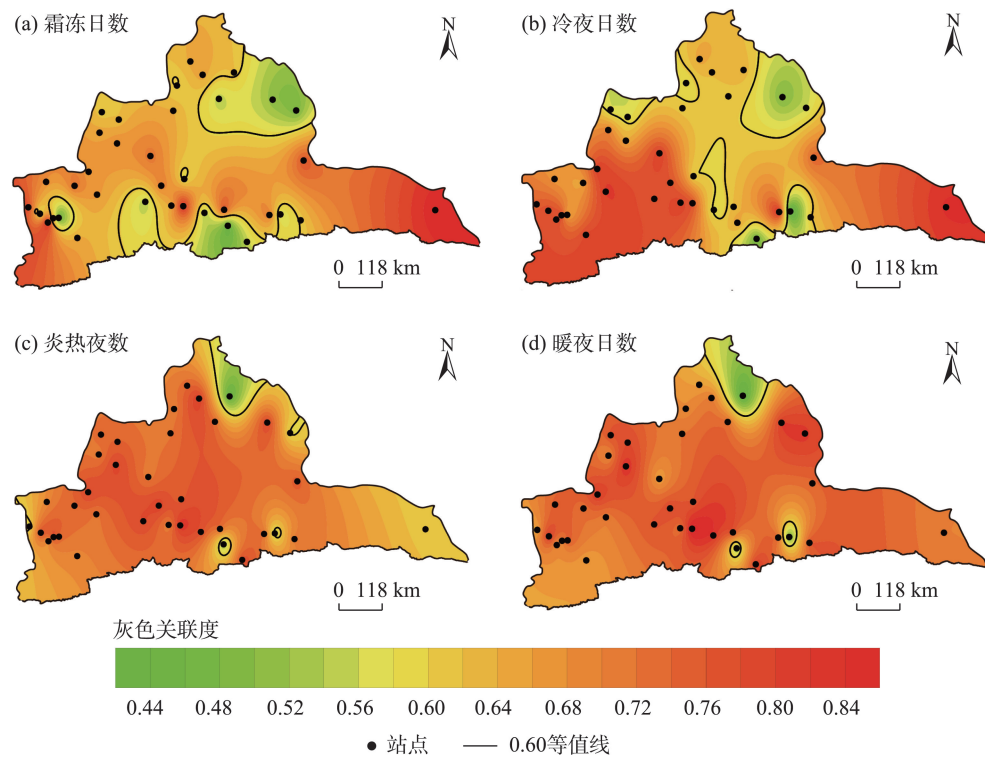


图6 北疆极端气温指数趋势系数与地理因子灰色关联度空间分布

Fig.6 Spatial distribution of grey correlation degree between extreme temperature index trends and geographical factors in northern Xinjiang

有较大影响,对极端气温事件的程度影响较小。极端气温指数在北疆中部盆地地区的趋势性变化最强,这与其随纬度的变化相一致,随经度的变化则相反。表明盆地与山地对极端气温指数气候趋势的影响不同,并且极端气温指数趋势的经向分布是其空间分布的主导模态。

(3) 北疆地区极端气温指数的变化趋势北部大于南部、西部大于东部,南北差异主要集中于北疆中部地区,但东西差异最大处位置并不一致。4个极端气温指数趋势性变化的南北差异与海拔高度呈负相关,海拔较低处差异较大,较高处则相反,表明在山地地区,纬度对于极端气温指数的气候趋势影响较小,而在盆地地区,纬度为影响极端气温指数气候趋势的重要因子。经向上,除炎热夜数增加趋势在同一经度上与海拔高度的相关性较低外,北疆东部极端气温指数的趋势性变化与海拔高度的相关性高于北疆西部。

(4) 地理因子对极端气温指数的趋势变化具有显著的影响,对暖指数的影响程度大于冷指数。其中,对冷指数的影响在山地、丘陵地区较强,对暖指

数的影响主要为地势较为平缓的丘陵和盆地地区。

北疆极端气温指数趋势性变化在北疆中部盆地地区最强,这可能包含有城市化对气候变暖的贡献,瓦力江<sup>[30]</sup>及余华等<sup>[31]</sup>研究发现,城市化增温对乌鲁木齐市以及吐鲁番市的气温,特别是最低气温上升影响显著,其中对乌鲁木齐市最低气温上升的贡献达到47%。与此同时,极端气温指数在乌鲁木齐市及阿勒泰市的趋势性变化相对较小,这可能与该站点受“绿洲化”影响有关。“绿洲化”为北疆地区城市化影响的特点之一,受“绿洲化”影响的站点出现城市年和夏季平均气温增温率低于郊区的“冷岛现象”<sup>[30,32]</sup>。此外,北疆地区城市与人口多集中于海拔高度较低的盆地及丘陵地区,北部多于南部,纬度与海拔高度对极端气温指数趋势系数的影响程度中也可能包含有城市化的部分贡献。本文虽然对地理因子在北疆极端气温趋势变化中的作用进行了较为全面的分析,但没有考虑城市化的影响。因此,城市化对北疆地区极端气温事件的贡献如何,怎样剔除极端气温指数气候趋势中城市化的影响是接下来将要开展的工作。

## 参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 王海军, 张勃, 赵传燕, 等. 中国北方近 57 年气温时空变化特征 [J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 643-650. [Wang Haijun, Zhang Bo, Zhao Chuanyan, et al. The spatio-temporal characteristics of temperature change in recent 57 years in Northern China. Progress in Geography, 2009, 28(4): 643-650.]
- [3] 韩翠华, 郝志新, 郑景云. 1951—2010 年中国气温变化分区及其区域特征 [J]. 地理科学进展, 2013, 32(6): 887-896. [Han Cuihua, Hao Zhixin, Zheng Jingyun. Regionalization of temperature changes in China and characteristics of temperature in different regions during 1951-2010. Progress in Geography, 2013, 32(6): 887-896.]
- [4] Fang S B, Qi Y, Han G J, et al. Changing trends and abrupt features of extreme temperature in mainland China during 1960 to 2010 [J]. Atmosphere, 2016, 7(2): 22. doi: 10.3390/atmos7020022.
- [5] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111: D05109. doi: 10.1029/2005JD006290.
- [6] 赵俊虎, 王启光, 支蓉, 等. 中国极端温度的群发性研究 [J]. 气象学报, 2012, 70(2): 302-310. [Zhao Junhu, Wang Qiguang, Zhi Rong, et al. A study of the extreme temperature group-occurring events in China. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(2): 302-310.]
- [7] 刘学华, 季致建, 吴洪宝, 等. 中国近 40 年极端气温和降水的分布特征及年代际差异 [J]. 热带气象学报, 2006, 22(6): 618-624. [Liu Xuehua, Ji Zhijian, Wu Hongbao, et al. Distributing characteristics and interdecadal difference of daily temperature and precipitation extremes in China for latest 40 years. Journal of Tropical Meteorology, 2006, 22(6): 618-624.]
- [8] 武丽梅, 陈璐, 王凯, 等. 中国大陆 1983—2012 年年极端气温时空变化特征 [J]. 干旱气象, 2016, 34(6): 945-951. [Wu Limei, Chen Lu, Wang Kai, et al. Temporal and spatial variation characteristics of annual extreme temperature in the mainland of China during 1983-2012. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(6): 945-951.]
- [9] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 701-716. [Ren Guoyu, Chu Ziyang, Zhou Yaqing, et al. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(4): 701-716.]
- [10] Zhou Y Q, Ren G Y. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961-2008 [J]. Climate Research, 2011, 50(2): 125-139.
- [11] Visbeck M, Chassignet E P, Curry R G, et al. 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 D C, USA: American Geophysical Union, 2003: 113-146.
- [12] 左金清. 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, 2011. [Zuo Jinqing. Relationship between AO/NAO and ENSO and their impact on climate anomalies in China. Lanzhou, China: Lanzhou University, 2011.]
- [13] 琚建华, 任菊章, 吕俊梅. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响 [J]. 高原气象, 2004, 23(4): 429-434. [Ju Jianhua, Ren Juzhang, Lv Junmei. Effect of interdecadal variation of arctic oscillation on temperature increasing in north of East Asian winter. Plateau Meteorology, 2004, 23(4): 429-434.]
- [14] 张自银, 龚道溢, 郭栋, 等. 我国南方冬季异常低温和异常降水事件分析 [J]. 地理学报, 2008, 63(9): 899-912. [Zhang Ziyin, Gong Daoyi, Guo Dong, et al. Anomalous winter temperature and precipitation events in Southern China. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(9): 899-912.]
- [15] 徐贵青, 魏文寿. 新疆气候变化及其对生态环境的影响 [J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 14-18. [Xu Guiqing, Wei Wenshou. Climate change of Xinjiang and its impact on eco-environment. Arid Land Geography, 2004, 27(1): 14-18.]
- [16] 袁玉江, 何清, 魏文寿, 等. 天山山区与南、北疆近 40a 来的年温度变化特征比较研究 [J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 521-526. [Yuan Yujiang, He Qing, Wei Wenshou, et al. Comparison of features of annual temperature change in Tianshan mountainous area, southern and northern Xinjiang for the recent 40 years. Journal of Desert Research, 2003, 23(5): 521-526.]
- [17] 汪宝龙. 1960—2009 年新疆极端气温和降水事件的变化研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2013. [Wang Baolong. Study in extreme events of temperature and precipitation over Xinjiang, northwest China during 1960-2009. Lanzhou, China: Northwest Normal University, 2013.]
- [18] 丁之勇, 葛拥晓, 吉力力·阿不都外力. 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,

- 2018, 9(2): 159-171. [Ding Zhiyong, Ge Yongxiao, Jilili Abuduwaali. Spatiotemporal variation characteristics of extreme temperature and its influencing factors in recent 53 years in northern Xinjiang, China. *Journal of Earth Environment*, 2018, 9(2): 159-171. ]
- [19] 慈晖, 张强, 张江辉, 等. 1961—2010年新疆极端气温时空演变特征研究 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(4): 129-138. [Ci Hui, Zhang Qiang, Zhang Jianghui, et al. Spatiotemporal variations of extreme temperature events over Xinjiang during 1961-2010. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2015, 54(4): 129-138. ]
- [20] 康菊花, 朱美玲. 新疆农业生产结构历史与现状实证分析 [J]. 边疆经济与文化, 2008(6): 3-5, 183. [Kang Juhua, Zhu Meiling. The historical and substantial evidence analysis of Xinjiang agricultural production structure. *The Border Economy and Culture*, 2008(6): 3-5, 183. ]
- [21] 马燕, 马洪亮, 高彦兵. 浅析制种玉米在实际生产中遇到的几个问题 [J]. 新疆气象, 2005, 28(3): 19-21. [Ma Yan, Ma Hongliang, Gao Yanbing. The analyse of some problems for producing corn seed. *Bimonthly of Xinjiang Meteorology*, 2005, 28(3): 19-21. ]
- [22] 宋艳玲, 张强, 董文杰. 气候变化对新疆地区棉花生产的影响 [J]. 中国农业气象, 2004, 25(3): 15-20. [Song Yanling, Zhang Qiang, Dong Wenjie. Impact of climate change on cotton production in Xinjiang autonomous region. *Agricultural Meteorology*, 2004, 25(3): 15-20. ]
- [23] 王铮, 张丕远. 论中国的重点减灾区 [J]. 中国减灾, 1996, 6(1): 20-23. [Wang Zheng, Zhang Piyuan. On the key disaster reduction areas in China. *Disaster Reduction in China*, 1996, 6(1): 20-23. ]
- [24] 周雅清, 任国玉. 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, 2010, 15(4): 405-417. [Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956-2008. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 405-417. ]
- [25] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. *Modern climate statistical diagnosis and prediction technology*. 2nd Edition. Beijing, China: China Meteorological Press, 2007. ]
- [26] Shao J A, Li Y B, Ni J P. The characteristics of temperature variability with terrain, latitude and longitude in Sichuan- Chongqing region [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(2): 223-244.
- [27] 陈志军. 基于起伏地形下重庆地区的天文辐射、气温分布研究 [D]. 南京: 南京气象学院, 2004. [Chen Zhijun. Study on the distribution of astronomical radiation and temperature in Chongqing area based on undulating terrain. Nanjing, China: Nanjing Institute of Meteorology, 2004. ]
- [28] 丁明军, 李兰晖, 张镔锂, 等. 1971—2012年青藏高原及周边地区气温变化特征及其海拔敏感性分析 [J]. 资源科学, 2014, 36(7): 1509-1518. [Ding Mingjun, Li Lanhui, Zhang Yili, et al. Temperature change and its elevation dependency on the Tibetan Plateau and its vicinity from 1971 to 2012. *Resources Science*, 2014, 36(7): 1509-1518. ]
- [29] 董丹宏. 全球背景下中国区域温度随海拔高度变化的时空分析 [D]. 成都: 成都信息工程大学, 2015. [Dong Danhong. Temperature trend-altitude relationship in China under the background of global warming. Chengdu, China: Chengdu University of Information Technology, 2015. ]
- [30] 瓦力江. 乌鲁木齐市近地面气温变化特征及其城市化效应 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018. [Wa Lijiang. Characteristics of surface air temperature change and urbanization effect in Urumqi. Nanjing, China: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018. ]
- [31] 余华, 张慧琴, 包荣刚. 新疆吐鲁番市1952—2012年气温变化特征及城市化影响 [J]. 干旱气象, 2014, 32(2): 215-219. [Yu Hua, Zhang Huiqin, Bao Ronggang. Variation characteristics of temperature during 1952-2012 and the urbanization impact in Turpan of Xinjiang. *Journal of Arid Meteorology*, 2014, 32(2): 215-219. ]
- [32] 张爱英, 任国玉, 周江兴, 等. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差 [J]. 气象学报, 2010, 68(6): 957-966. [Zhang Aiyang, Ren Guoyu, Zhou Jiangxing, et al. On the urbanization effect on surface air temperature trends over China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 68(6): 957-966. ]



## Possible impacts of geographical factors on long-term trends of extreme temperature indices over northern Xinjiang, China

ZHAO Xuan<sup>1,2</sup>, BIAN Tao<sup>1,2,3\*</sup>, REN Guoyu<sup>3,4</sup>, ZHANG Yanpin<sup>1,2</sup>, HAN Zifei<sup>5</sup>

(1. Urumqi Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830001, China;

2. Shijiazhuang Meteorological Service of Hebei Province, Shijiazhuang 050081, China;

3. Department of Atmospheric Science, School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. Open Laboratory of Climate Research,

China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081, China;

5. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Based on the daily temperature data of 37 stations in northern Xinjiang from 1961 to 2017 and elevation, 15 extreme temperature indices of 3 categories (cold indices, warm indices, and extreme indices) were selected to explore the possible impacts of geographical factors on long-term trends of extreme temperature indices over northern Xinjiang by means of correlation analysis and grey correlation degree. The results show that: 1) Climate warming is significant in northern Xinjiang, the extreme temperature cold indices show a very significant downward trend, and the warm and extreme indices show a significant or very significant upward trend; climate warming is mainly reflected in the decrease of extreme cold event frequency, and the rise of night temperature and extreme low temperature, which has the characteristics of asymmetry of daytime and nighttime changes and imbalance of low and high temperature changes. 2) The trends of extreme temperature indices in the central basin area of northern Xinjiang are the strongest, while relatively small in the mountainous areas. The influence of topography on the long-term trends of warm indices is greater than that of cold indices. Altitude has a great influence on the frequency of extreme temperature events. 3) The meridional distribution of the trends of extreme temperature indices is the dominant pattern of their spatial distribution. The tendency variations of extreme temperature indices in northern Xinjiang are greater in the north than in the south, and greater in the west than in the east. The biggest difference of tendency variation between the north and the south is in the central part of Northern Xinjiang, and the difference has a negative correlation with altitude, which indicates that latitude has little influence on the long-term trends of the extreme temperature indices in mountainous areas, while it is an important factor in the basin. In the meridional direction, the increasing trend of hot nights has a lower correlation with altitude, while the other indices have a higher correlation with latitude in the east than in the west of northern Xinjiang. 4) Geographical factors have significant influences on long-term trends of extreme temperature indices (the grey correlation degrees are greater than 0.6, which means a high correlation), and the influences of geographical factors on warm indices are greater than cold indices. The influences of geographical factors on the cold indices are stronger in the mountainous and hilly areas, while the influences on the warm indices are mainly manifested in the hilly and basin areas with relatively flat terrain.

**Keywords:** northern Xinjiang; extreme temperature indices; long-term trends; geographical factors