

# “一带一路”区域极端高温事件与人口暴露度特征

吕嫣冉<sup>1</sup>, 姜彤<sup>1,3</sup>, 陶辉<sup>3</sup>, 翟建青<sup>2</sup>, 王艳君<sup>1\*</sup>

1. 南京信息工程大学地理科学学院/灾害风险管理研究院, 南京 210044

2. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

3. 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

**摘要** 基于1979—2018年“一带一路”区域再分析数据集(ERA-Interim)夏季逐日最高气温和格网化的人口数据, 选取日最高气温序列的95%分位数作为极端高温阈值, 采用改进的强度-面积-持续时间(IAD)方法, 辨识极端高温事件特征, 并定量评估极端高温事件的人口暴露度。结果表明, 1979—2018年“一带一路”区域夏季极端高温事件频次、强度和持续时间均呈上升趋势, 年均值分别为11次、32.3℃和5.8 d, 显著增加区域分布在中国东部、俄罗斯西部、中东欧地区; 夏季极端高温事件多发于研究区偏北地区的哈萨克斯坦、中国新疆、俄罗斯中部等, 但事件的强度高值区主要分布在西南部的埃及、沙特阿拉伯、巴基斯坦、印度等地, 事件持续时间高值区集中分布在印度地区; 1979—2018年夏季极端高温事件的年累计影响面积和人口暴露度均呈现上升趋势, 近10年达到峰值。人口暴露度高值区主要分布在中国东部、印度大陆和北海周边国家, 且高暴露度范围不断扩大; 人口暴露度变化的影响因素中, 气候、人口、气候和人口综合因素的贡献率相当, 但近10年气候因素的贡献率明显增加。建议加强高温等极端事件的监测、预警预报与区域合作研究, 建立区域合作共同体, 并培养和加强公众科学防灾减灾意识。

**关键词** 极端高温事件; 强度-面积-持续时间方法; 人口暴露度; “一带一路”区域

在气候变暖的背景下, 全球平均气温屡创新高, 据世界气象组织(World Meteorology Organization, WMO)统计, 2015—2019年是有记录以来最热

的5年<sup>[1]</sup>。自1950年以来, 人类观测到许多极端天气和气候事件的变化, 在全球尺度上冷昼夜的天数在减少, 而暖昼夜的天数在增加。在欧洲和亚洲等

收稿日期: 2020-04-28; 修回日期: 2020-06-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018FY100501), 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX20\_0957), 国家自然科学基金项目(41971023)

作者简介: 吕嫣冉, 硕士研究生, 研究方向为灾害风险管理, 电子信箱: lvyaran1013@163.com; 王艳君(通信作者), 副教授, 研究方向为气候变化社会经济影响的风险评估, 电子信箱: yjwang78@163.com

引用格式: 吕嫣冉, 姜彤, 陶辉, 等. “一带一路”区域极端高温事件与人口暴露度特征[J]. 科技导报, 2020, 38(16): 68-79; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.16.008

地,高温的强度、频率和日数可能都在增加<sup>[2]</sup>。气温的升高已经导致人类热相关疾病和死亡风险的增加<sup>[3-4]</sup>。2003年8月,高温热浪席卷欧洲,造成约6.6万人死亡<sup>[5]</sup>。2010年,夏季高温热浪袭击北半球的多个国家,俄罗斯东部和中央区东南部遭受了40年来罕见的高温干旱,导致5.5万人死亡<sup>[6]</sup>。2014年,印度新德里出现47.8℃的高温,创62年来的记录<sup>[7]</sup>。2015年,高温热浪席卷巴基斯坦卡拉奇,超过1200人死亡<sup>[8]</sup>。WMO调查发现,2001—2010年全球受高温热浪影响而死亡的人数相比1991—2000年增加超过2000%,这一增幅远远高于干旱、风暴和洪水等极端天气气候事件所造成的死亡人数变化<sup>[9]</sup>。高温灾害对人体健康、生命安全构成严重威胁,对人们的日常生活以及社会经济发展造成不利影响,受到各国政府部门和科学界的普遍关注,成为气候变化研究的热点<sup>[9-13]</sup>。

对高温事件的研究,大多基于单站极端阈值或固定范围内的站点阈值进行时空特征分析<sup>[14]</sup>。极端事件具有三维度特征,包括持续时间、强度和影响面积。例如,任福民等<sup>[10]</sup>依据单站点或格点提出了持续性极端事件客观识别方法,但该方法没有事件的空间范围与时间连续性。姜彤等<sup>[15]</sup>针对极端事件的持续时间、强度和影响面积的三维度特征,创建强度-面积-持续时间(intensity-area-duration, IAD)方法(软著登记号:2019SR1118964),定义一次极端事件为:在一定时间尺度段内,连续面积大于给定阈值的格点集合。此方法能客观识别极端事件强度、影响范围和持续时间。暴露度是人口、经济和其他承灾体受到致灾因子不利影响的价值或数量<sup>[16]</sup>。目前在极端事件暴露度的研究中,已经开展了国家尺度的极端降水事件对人口经济<sup>[17]</sup>、极端低温对耕地暴露度<sup>[18-19]</sup>、极端高温事件对人口<sup>[20]</sup>、干旱事件对人口经济<sup>[21-22]</sup>的研究。

“一带一路”(The Belt and Road, B & R)是中国政府关于合作发展理念提出的“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”的简称,“一带一路”倡议是中国在新的政治经济形势下实行全面对外开放的重大举措,对促进“一带一路”沿线各国的经济合作、共同繁荣具有深远意义。据统计,1900—

2015年“一带一路”区域共发生自然灾害5400余次,占全球总数的1/2以上,其中4148次与气象相关,超过286次与极端温度有关,受灾人数更是超过1亿人次,经济损失高达250亿美元,风险指标明显高于全球平均水平<sup>[23-24]</sup>。“一带一路”沿线绝大多数国家都是发展中国家,抵御自然灾害的能力不容乐观<sup>[25]</sup>,且“一带一路”区域极端事件及其对社会经济影响的相关研究相对缺乏。

本研究选择“一带一路”区域作为研究区,基于1979—2018年欧洲中期天气预报中心(ECMWF)再分析资料(ERA-Interim)逐日最高气温再分析数据集,采用改进的IAD极端事件辨识方法,分析极端高温事件的演变特征,并探讨极端高温事件的人口暴露度及其影响因素。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区

选择“一带一路”的核心区域,包括中国、东北亚2国、中亚5国、西亚北非20国、中东欧19国、东南亚11国、南亚7国等65个国家为研究区(图1)。截至2018年,区域总人口达46亿人,占世界的62%,土地总面积超过5700万平方公里,占世界的39%,国内生产总值(GDP)总量23万亿美元,占世界的31%。“一带一路”区域自然环境差异大,气候类型多样,涵盖热带气候、干带气候、温暖带气候、冷温带气候、极地带气候5种气候类型,区域气温自西南向东北递减,降水自沿海向内陆递减<sup>[26]</sup>。

### 1.2 数据

研究所用气温数据采用ECMWF第3代再分析资料ERA-Interim。该数据集采用了四维变分分析,结合改进的湿度分析、卫星数据误差校正等技术,实现了再分析资料的质量提升<sup>[27]</sup>,研究人员对比全球尺度的气温观测数据和再分析资料发现,在欧洲和亚洲区域两者的相关系数超过0.99<sup>[28]</sup>。ERA-Interim提供自1979年以来的再分析资料,并实时更新每3h同化分析数据<sup>[29]</sup>。本文采用日2m最高气温数据,时间序列选用1979—2018年逐年夏季6、7、8月数据,共3680天,分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ,

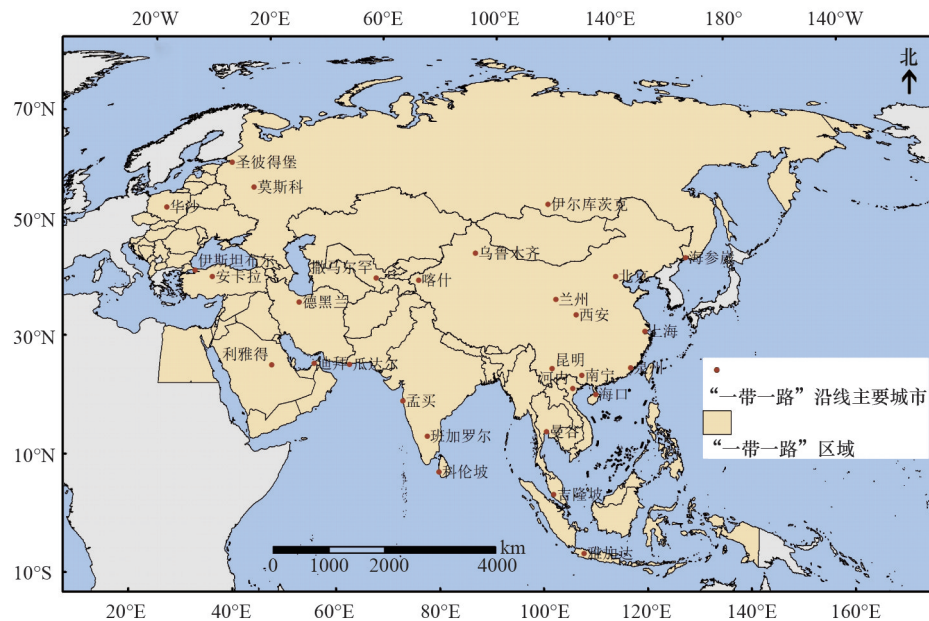


图1 “一带一路”区域地理位置

共2.7578万个格点。

研究区中国人口数据来自中国国家统计局1999年以来发布统计年鉴。除中国外其他64个国家1979—2018年总人口数据均来自世界银行<sup>[30]</sup>。按照面积权重模型方法,以哥伦比亚大学国际地球科学信息网所提供的第4版世界网格化人口(GP-Wv4)数据为基础,将国家尺度的人口数据重采样至空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的格点。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 极端高温阈值

对于极端高温阈值的定义,大体上分为相对阈值与绝对阈值2种。绝对阈值如 $30^{\circ}\text{C}$ <sup>[31]</sup>、 $35^{\circ}\text{C}$ <sup>[32]</sup>、 $40^{\circ}\text{C}$ <sup>[33]</sup>。相对阈值如常用日最高气温升序排列的第90、第95或第99百分位数<sup>[34-35]</sup>。考虑到“一带一路”区域范围广,温度地域差异大,且本研究重点为极端高温事件对人口的影响,本研究将各格点年均日最高气温<研究区平均最高气温( $22.5^{\circ}\text{C}$ )的青藏高原、俄罗斯远东等高寒地区去除后,定义阈值为各格点1979—2018年夏季逐日最高气温升序排列的第95百分位数。极端高温阈值的空间分布(图2)地区差异较大,大致从区域西南部的埃及、阿拉伯半岛、印度逐渐向东北部降低。

#### 1.3.2 改进的IAD方法

姜形等<sup>[15]</sup>提出IAD方法,将极端事件的三维特征联合起来,选取既定时间尺度和连续面积>给定阈值的格点集合作为一次极端事件。但此方法仅能识别固定时间尺度的事件,无法实现事件在空间上的迁移,存在面积的重复计算等问题。为此,通过以下步骤改进原有的IAD三维识别方法。

1) 标记高温事件。采用原有IAD方法识别高温事件,并将每次事件标记不同的编号。

2) 判断事件连续性。设定面积阈值,记为 $A_0$ ,仅考虑影响面积大于 $A_0$ 的事件<sup>[36-37]</sup>,同时利用 $A_0$ 判定事件之间的时间连续性。假定2个相邻时刻 $t_1$ 和 $t_2$ ,分别有2个相邻的事件 $E_1$ 和 $E_2$ (图3中的黄色、蓝色块),将其投影到二维平面上有一个重叠区域 $A_{\text{overlap}}$ (图3中灰色块)。如果 $A_{\text{overlap}} > A_0$ ,则认为 $E_1$ 和 $E_2$ 属于同一场高温事件,反之则认为其不属于同一场。本研究设置 $A_0$ 为 $50 \text{万 km}^2$ <sup>[38-39]</sup>,按照此规则,比较相邻时刻的任何事件,最终所有时空连通在一起的事件都被赋予相同且唯一的编号。

3) 根据编号提取事件。采用极端高温事件频次、强度、持续时间和影响面积4个变量描述极端高温事件特征,其中频次为事件发生次数,强度为

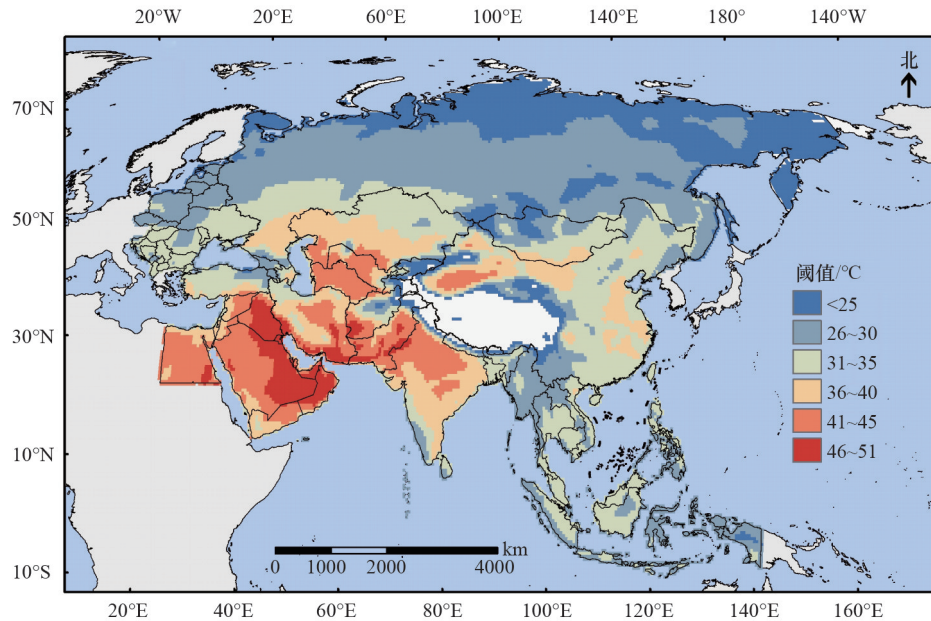


图2 “一带一路”区域夏季极端高温阈值空间分布

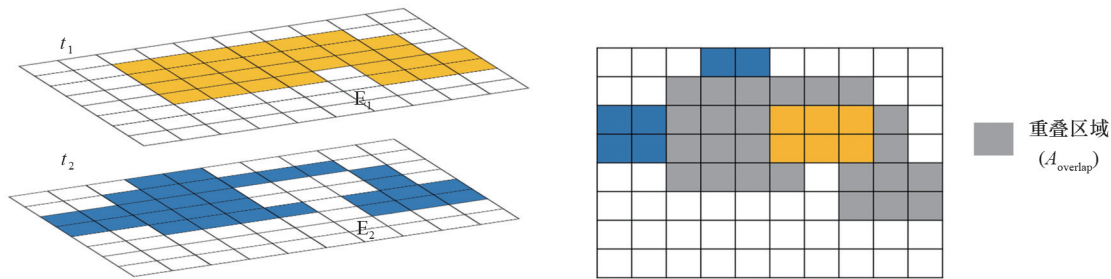


图3 极端高温事件在时间上的连续过程

事件所有格点最高气温值的均值,持续时间是事件的历时(本研究仅选取持续时间 $\geq 3$  d的事件),影响面积为事件的最大影响范围即事件在二维平面上的投影。

### 1.3.3 人口暴露度变化的影响因素

极端高温事件的人口暴露度变化取决于气候和人口因素变化,可以分解为人口因子(高温事件影响范围不变,人口数量变化)、气候因子(高温事件影响范围变化,人口数量不变)、人口和气候综合因子(高温事件影响范围和人口数量均变化),人口暴露度变化可表示为<sup>[40-41]</sup>

$$(A + \Delta A) \times (P + \Delta P) - P \times A = P \times \Delta A + A \times \Delta P + \Delta P \times \Delta A \quad (1)$$

气候因子的贡献率为

$$\frac{P \times \Delta A}{(A + \Delta A) \times (P + \Delta P) - P \times A} \times 100\% \quad (2)$$

人口因子的贡献率为

$$\frac{A \times \Delta P}{(A + \Delta A) \times (P + \Delta P) - P \times A} \times 100\% \quad (3)$$

人口和气候综合因子的贡献率为

$$\frac{\Delta P \times \Delta A}{(A + \Delta A) \times (P + \Delta P) - P \times A} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $A$ 和 $P$ 是极端高温事件的影响范围和人口数, $\Delta A$ 是极端高温事件的影响范围变化, $\Delta P$ 是人口数量变化, $A \times \Delta P$ 是人口因子, $P \times \Delta A$ 是气候因子, $\Delta A \times \Delta P$ 是人口和气候的综合因子。

### 1.3.4 Mann-Kendall非参数检验方法

Mann-Kendall 检验法是世界气象组织推荐使

用的非参数检验方法,最初由 Mann<sup>[42]</sup>和 Kendall<sup>[43]</sup>提出。Mann-Kendall方法已经广泛用于分析气温、径流、降水等要素时间序列的趋势变化<sup>[44-45]</sup>。本研究中采用M-K趋势检验法对极端高温事件特征的变化趋势进行分析。

## 2 结果分析

### 2.1 极端高温事件特征分析

#### 2.1.1 事件频次特征

极端高温事件频次反映了区域极端高温事件的发生次数。1979—2018年共发生极端高温事件423次,年均发生11次,以0.2次/a的速度呈现增长趋势。2010年为总频次最多的年份,共发生19次。年代际尺度上,极端高温事件发生的次数呈先减少后增加的趋势,1998年之前为极端高温频次明显

偏低时期,1979—1988、1989—1998年两时段极端高温事件频次均值分别较多年均值低1.2次/a、2.9次/a;1998年之后区域极端高温事件频次出现明显增长的两个阶段,即1998—2008和2009—2018年,这两阶段的极端高温事件频次分别增加到11.4和13.8次/a。其中,2009—2018年为频次最高且增长最快的时段。从频次空间分布来看(图4(a)),高值区主要分布在研究区偏北地区,其中在中亚的哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦,中国新疆,俄罗斯中部近40年发生极端高温事件多达50次左右。从变化趋势来看(图4(b)),87.0%的研究区都呈频次增加趋势,显著增加(通过95%置信度检验)的区域主要分布在中国东部、蒙古、伊朗、土耳其、俄罗斯中东部和西部、波兰、乌克兰地区;减少的区域主要在印度、巴基斯坦、哈萨克斯坦等部分地区。

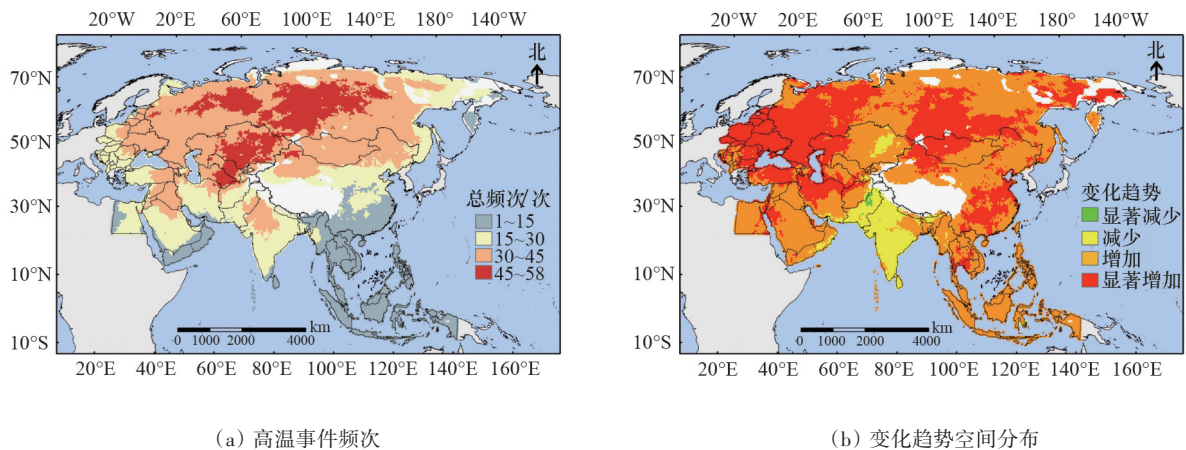


图4 1979—2018年“一带一路”区域夏季极端高温事件频次及其变化趋势空间分布

#### 2.1.2 强度特征

1979—2018年“一带一路”区域夏季极端高温事件多年平均强度为32.3℃,区域平均强度最低和最高值分别发生在1985和2018年,强度分别为28.3℃和37.5℃。其中1995、2014、2017、2018年区域平均强度均超过35℃(图5(a))。平均强度总体呈现增加的趋势,增幅为0.1℃/a。年代际呈阶段上升趋势,1979—1988年为极端高温事件区域平均强度的低值时期,强度为30.1℃;1989—2008年期

间,区域平均强度明显上升,达到多年均值;至2009年以后,区域平均强度再次显著增强,至34.6℃,超过多年均值2.3℃。夏季极端高温事件强度的空间分布上,总体而言与阈值分布相似,高值区主要分布在研究区西南部的埃及、沙特阿拉伯、巴基斯坦、印度等地区,其高温强度普遍在40℃以上,部分地区甚至达到45℃以上。从强度变化趋势的空间分布来看,86.0%的研究区极端高温事件的强度都呈现增加趋势。显著增加地区分布在中国

东部、马来西亚、印度尼西亚、俄罗斯西部与南部等地区,占研究区面积的40.0%。减小区域分布在哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦等中亚地区,以及印度、巴基斯坦、孟加拉国等南亚地区,占研究区面积的

14.0%,其中在哈萨克斯坦北部、巴基斯坦北部、印度东南部呈显著的下降趋势(通过95%置信度检验)(图5(b))。

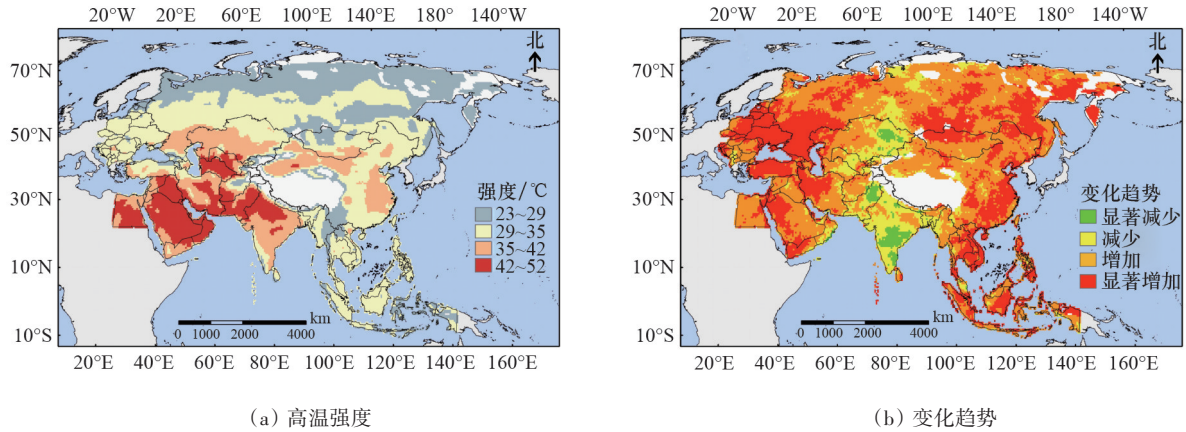


图5 1979—2018年“一带一路”区域夏季极端高温事件强度及其变化趋势

### 2.1.3 持续时间特征

1979—2018年“一带一路”区域夏季极端高温事件平均持续时间为5.8 d/a,总体呈现增加趋势,增幅为0.03 d/a。近40年来,1985年为极端高温事件持续时间最短的一年(3.5 d),2010年为最长的一年(7.8 d)。年代际上,极端高温事件的持续时间呈持续增长趋势。1979—1988和1989—1998年极端高温事件的持续时间均较多年均值低,1998—2008年和2009—2018年事件持续时间分别达到6.0 d/a和6.3 d/a,分别超过多年均值0.2 d/a和0.5

d/a。从空间分布上看,持续时间高值区主要集中在南亚地区的印度、孟加拉国,极端高温的持续时间长达12~16 d/a,次高值区在中国东部、土耳其、沙特阿拉伯地区,年均持续时间为9~12 d/a(图6(a))。从变化趋势来看,除印度、巴基斯坦、孟加拉国等地区夏季极端高温事件持续时间呈现减少趋势外,其余大部分区域(研究区的89.1%)都是增加的,显著增加区域分布在中国的华北、蒙古、俄罗斯西部、中东欧等区域(图6(b))。

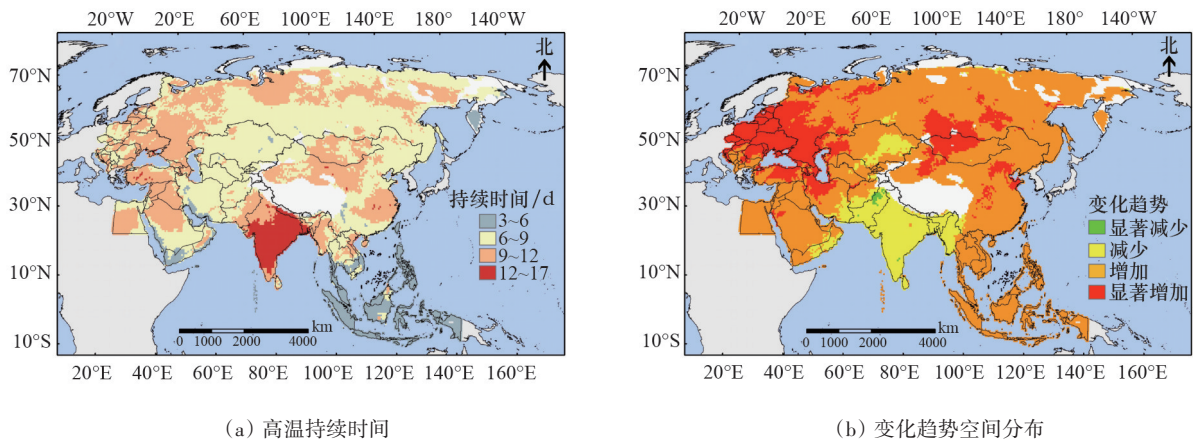


图6 1979—2018年“一带一路”区域夏季极端高温事件平均持续时间及其变化趋势空间分布

### 2.1.4 影响面积

1979—2018年“一带一路”区域夏季极端高温事件的影响面积变化趋势如图7所示。近40年平均每年累计影响面积为 $3.8 \times 10^7 \text{ km}^2$ , 2010年和2017年累计影响面积较大, 超过 $8.0 \times 10^7 \text{ km}^2$ , 约为研究区总面积的1.5倍, 1993年极端高温事件累计影响面积最小, 为 $1.4 \times 10^7 \text{ km}^2$ , 1979—2018年事件累计影响面积以每年 $9.8 \times 10^5 \text{ km}^2/\text{a}$ 速度增长。年代际尺度上, 1979—1988年是事件累计影响面积最小时期, 较多年均值少29.8%, 约为 $2.6 \times 10^7 \text{ km}^2$ ; 1989—1998年累计影响面积有小幅增加, 达 $2.7 \times 10^7 \text{ km}^2$ , 但仍是事件影响面积最小时期; 1999—2008年和2009—2018年累计影响面积持续增大, 分别达到 $4.2 \times 10^7$ 和 $5.5 \times 10^7 \text{ km}^2$ , 超过多年均值的10.5%和44.7%。

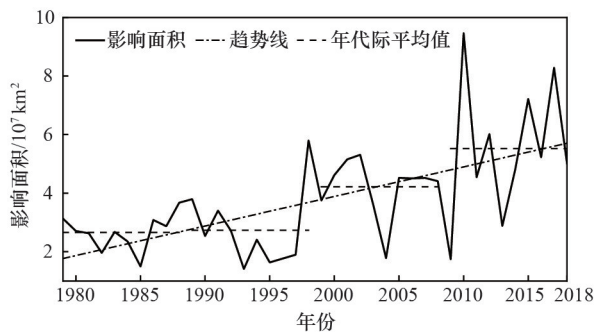


图7 1979—2018年“一带一路”区域夏季极端高温事件累计影响面积变化

## 2.2 极端高温事件人口暴露度分析

### 2.2.1 人口暴露度特征

极端高温事件人口暴露为受极端高温事件影响区域内的人口规模。1979—2018年有323次事件暴露人口超过 $1.0 \times 10^7$ 人, 166次超过 $1.0 \times 10^8$ 人, 56次超过 $5 \times 10^8$ 人, 单次暴露人口最多的事件发生在2014年, 暴露范围为 $3.3 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 包括印度、巴基斯坦、孟加拉国等南亚地区, 暴露人口 $1.5 \times 10^9$ 人, 占“一带一路”区域总人口的32.6%。其次为发生在2010年单次事件, 暴露人口超过 $1.3 \times 10^9$ 人, 影响面积大于 $3.0 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

1979—2018年“一带一路”区域极端高温事件影响范围内的年累计人口多年均值为 $1.9 \times 10^9$ 人

(图8), 近40年来表现为上升趋势, 增长幅度为 $5.2 \times 10^7/\text{a}$ 。暴露人口最多的年份在2010年, 为 $6.8 \times 10^9$ 人, 为当年总人口的1.5倍; 其次是2017年, 暴露人口为 $4.6 \times 10^9$ 人, 最少的年份出现在1990年, 暴露人口为 $1.2 \times 10^8$ 人。年代际上, 1979—1988、1989—1998和1999—2008年是极端高温事件暴露人口较少的年代, 均低于多年平均暴露人口, 暴露人口分别为 $1.4 \times 10^9$ 、 $1.4 \times 10^9$ 和 $1.5 \times 10^9$ 人。2009—2018年暴露人口大幅增加, 为暴露人口最多的年代, 达到 $3.2 \times 10^9$ 人, 超过多年均值的68.8%。

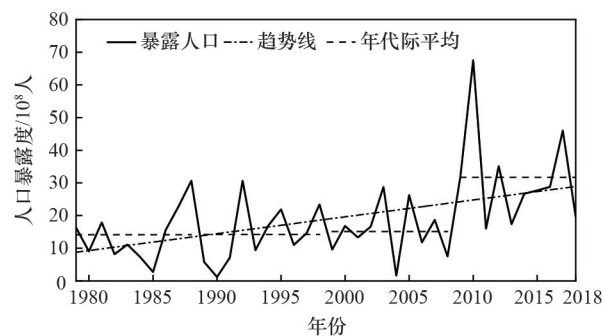


图8 1979—2018年“一带一路”区域夏季极端高温事件年累计人口暴露度变化

1979—2018年夏季极端高温事件几乎覆盖整个研究区域(图9), 受影响最大的是中国东部、印度等人口稠密地区。从“一带一路”区域极端高温事件人口暴露度的空间分布年代际变化来看, 各年代人口暴露度空间分布格局相似, 高暴露区主要集中在 中国东部、印度大陆和黑海周边国家。但是, 暴露人口高值范围不断扩大。1979—1988和1989—1998年人口暴露度超过 $5.0 \times 10^6$ 人的面积占区域总面积的4.1%和5.6%, 零星分布在中国东部和印度大陆地区; 1999—2008和2009—2018年人口暴露度超 $5.0 \times 10^6$ 人的范围进一步扩大, 约占区域总面积的10.0%, 几乎覆盖整个中国东部和大部分印度大陆, 甚至部分区域人口暴露度超 $5.0 \times 10^7$ 人, 同时, 黑海周边的土耳其、乌克兰等国家也逐渐成为人口暴露度高值区。从图9人口暴露度变化曲线看出, “一带一路”区域近10年极端高温事件的人口暴露度增长主要来源于中国东部, 印度大陆, 黑海周边的乌克兰、土耳其等国家。

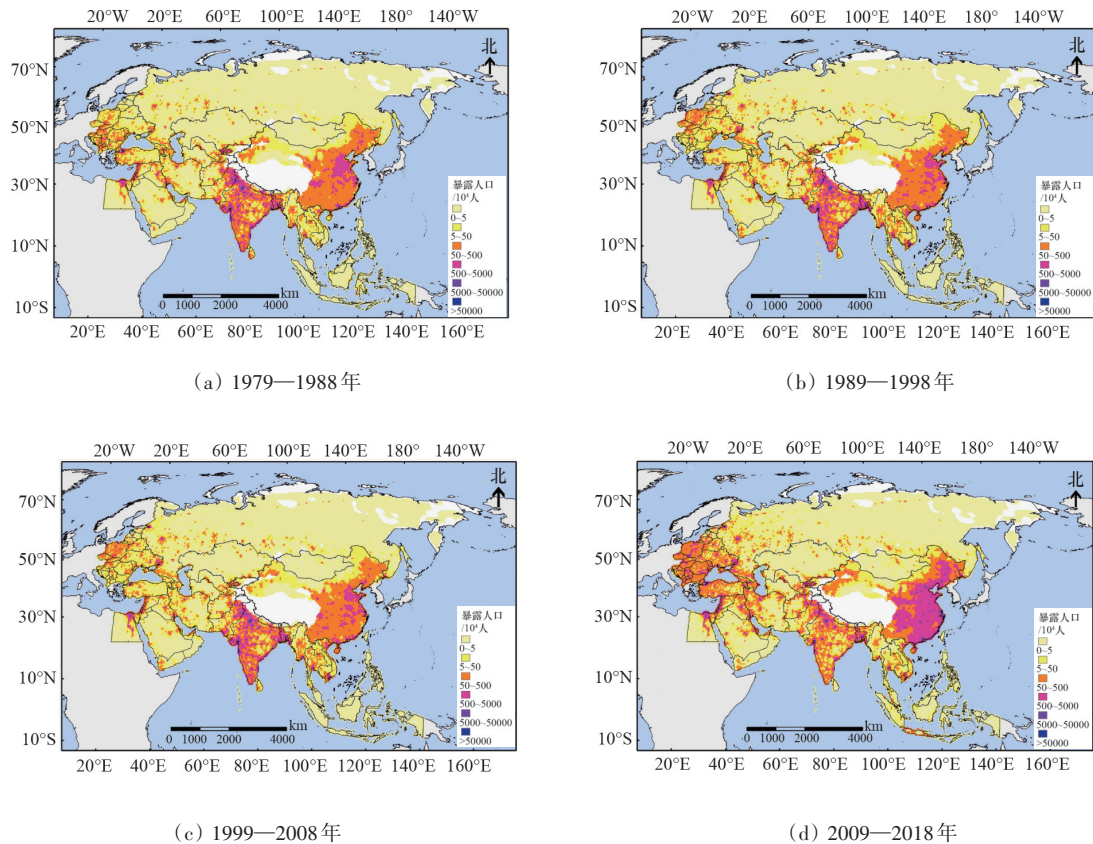


图9 1979—2018年“一带一路”区域夏季极端高温事件人口暴露度空间分布

### 2.2.2 人口暴露度变化影响因素分析

极端高温事件人口暴露度变化不仅取决于气候因素的变化,也与人口数量的变化有关。以1979—1988年为基准期,考虑人口数量固定不变,极端高温事件的范围变化(气候因素);人口数量变化,事件的影响范围不变(人口因素);人口数量和事件影响范围均变化(气候和人口综合因素)3种情景,分析各时期区域极端高温事件人口暴露度变化的主要贡献率,结果见表1。总体来看,气候、人口、气候与人口综合因素在区域各时段极端高温的人口暴露度变化中贡献相当,但气候因素的贡献逐渐明显,人口因素、气候与人口综合因素的作用有所减弱。近10年(2009—2018年),气候因素对人口暴露度变化的贡献率达到了42.5%,明显高于人口因素(26.8%)以及气候和人口综合因素(30.7%)的贡献。

表1 人口暴露度变化的影响因素贡献率

时段/年	暴露度变化/ ( $10^9$ 人)	因素贡献率/%		
		气候 因素	人口 因素	综合 因素
1989—1998	0.1	29.6	35.3	35.1
1999—2008	1.0	31.5	31.9	36.6
2009—2018	17.6	42.5	26.8	30.7

注:基准期为1979—1988年。

## 3 结论

基于“一带一路”区域1979—2018年再分析数据集ERA-Interim中的日最高气温数据,采用改进的IAD方法,从频次、持续时间、影响面积、强度等方面刻画了高温事件的时空变化过程,并结合人口格点数据,探讨了区域极端高温事件人口的影响。

1) 1979—2018年“一带一路”区域夏季共发生极端高温事件423次,年均11次;事件平均强度为32.3℃,平均持续时间为5.8 d;近40年极端高温事件频次、强度、持续时间均呈上升趋势,以0.2次/a、0.1℃/a、0.03 d/a的增幅变化,至2009—2018年达到最大值。

2) 1979—2018年夏季极端高温事件多发于研究区偏北地区,例如中亚的哈萨克斯坦、中国新疆、俄罗斯中部等;事件强度高值区主要分布在研究区西南部的埃及、沙特阿拉伯、巴基斯坦、印度等地;事件持续时间高值区主要分布在印度地区。从变化趋势的空间分布看,无论频次、强度、持续时间,除印度、巴基斯坦、哈萨克斯坦北部地区外,均呈增加趋势,其中在中国东部、俄罗斯西部、中东欧地区呈显著增长趋势。

3) 1979—2018年夏季极端高温事件的累计影响面积和人口暴露度均呈上升趋势,增幅分别为 $9.8 \times 10^5 \text{ km}^2/\text{a}$ 、 $5.2 \times 10^7 \text{ 人}/\text{a}$ ,近10年达到最高值。人口暴露度在不同年代具有相似的空间分布格局,高暴露度区域主要分布在中国东部、印度大陆和黑海周边国家,暴露人口超过 $5.0 \times 10^6 \text{ 人}$ ,且暴露度高值区范围不断扩大。

4) 1979—2018年夏季极端高温事件的人口暴露度增加受气候、人口、气候和人口综合因素影响,且三者在不同时期的贡献相当;但近10年气候因素贡献逐渐增强,对人口暴露度的贡献率达到42.5%,明显高于其他因素。

## 4 建议

气候变化及其影响已经成为全人类高度关注的话题。随着全球气温的升高,极端高温事件频发,给人类社会带来巨大的生命和财产损失。本文采用改进的IAD方法从3个维度识别了1979—2018年“一带一路”区域极端高温事件,发现事件频发于印度、中亚5国、俄罗斯等地区,与Russo等<sup>[46]</sup>的研究结果基本一致。受影响人口多集中在印度与中国的东部,但近年来黑海周边的乌克兰、土耳其等国家也逐渐成为人口暴露度重灾区,Liu

等<sup>[47]</sup>对1971—2000年全球的极端热事件人口暴露度研究同样发现印度大陆和中国东部地区是高值区,这与本文研究较为吻合。同时,本文结果揭示,近年来俄罗斯等纬度较高地区极端高温事件的强度、频次、持续时间有增强的趋势,这与文献<sup>[6,9]</sup>报道较为一致。报道指出,俄罗斯首都莫斯科2010年多日气温高达35℃,部分地区更高至40℃,创同期历史新高,俄全境90%以上地区出现罕见高温,并伴随干旱事件,是俄罗斯近40年来的罕见的极端高温事件。

中国提出“一带一路”倡议以来,已取得联合国等各国国际组织的支持,各国积极响应,互通有无,深化合作。“一带一路”区域由于其对气候变化的高度敏感性和复杂的孕灾环境,面临严峻的气象灾害风险<sup>[48]</sup>。极端高温事件对区域人口的身体健康、农业、电力能源消耗以及森林火灾等都有重大影响,针对“一带一路”区域极端高温事件与人口暴露度时空分布特征的研究结果,提出3点减灾对策。

1) 将防灾措施融入城市规划。“一带一路”区域的城市化进程不断加快,城市化造成的热岛效应加强了极端高温事件的剧烈程度,因此在制定高温防灾减灾措施时,需合理城市规划与建设布局,增加城市绿化,减少人为散热,开发利用清洁能源,尤其中亚、中东欧等地区常年遭遇高温袭击,在城市发展过程中更应充分考虑减轻高温危害的措施。

2) 加强高温监测与预报预警,建立区域合作共同体。“一带一路”区域高温频发国家在地理位置上互相毗邻,以高温灾害为基础的灾害链可能会产生一系列的连锁反应,区域内各国间应该充分利用现有科学技术,建立气象信息综合分析共享平台,合理布局监测预警网络,对高温频发与温度异常地段适当增加监测力度,完善和拓展区域内的监测能力与物理建模能力,提高区域监测系统的可靠性和稳定性,提升“一带一路”区域数据共享能力,构建区域合作体,加强各国信息和经验分享,对灾害进行全方位、多角度、全天候监测与预警。

3) 培养和加强公众科学防灾减灾意识。“一带一路”人口密集区域同时也是极端高温事件频发区域,在这些地区应当加强民众的科普宣传工作,

普及高温中暑及其他热相关疾病的防御知识,特别针对高温场所作业人员等重点人群,加强相关知识的宣传,提高公众的防范意识和自救、互救能力;增强科学防灾和节约能源的意识,以此提升整体区域的防灾减灾抗灾能力。

### 参考文献(References)

- [1] World Meteorological Organization(WMO). The global climate in 2015–2019[R]. Switzerland: WMO, 2019.
- [2] 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]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 208–209.
- [3] IPCC. Climate change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group ii to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 720–721.
- [4] Wang Y J, Wang A Q, Zhai J Q, et al. Tens of thousands additional deaths annually in cities of China between 1.5°C and 2.0°C warming[J]. Nature Communications, 2019, doi: 10.1038/s41467-019-11283-w.
- [5] Fouillet. The relationship between summer daily temperature and mortality in France: 1975 to 2003[J]. Current Genetics, 2006, 32(1): 60–65.
- [6] Hoag H. Russian summer tops ‘universal’ heatwave index [EB/OL]. (2014–10–29)[2020–02–20]. <https://www.nature.com/news/russian-summer-tops-universal-heatwave-in-dex-1.16250>.
- [7] Ians. Delhi records highest temperature in history[EB/OL]. (2019–6–10)[2020–03–01]. <https://www.khaleejtimes.com/international/india/delhi-records-highest-temperature-in-history>.
- [8] Mandhro S. Karachi heatwave death toll crosses 1,200: Health department[EB/OL]. (2015–6–28) [2020–03–02]. <https://tribune.com.pk/story/911335/heatwave-death-toll-in-karachi-crosses-1200-health-department>.
- [9] World Meteorological Organization(WMO). The global climate 2001–2010: A decade of climate extremes[R]. Switzerland: WMO, 2013.
- [10] 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.
- [11] 王灏晨, 路凤, 武继磊, 等. 中国气候变化对人口健康影响研究评述[J]. 科技导报, 2014, 32(28/29): 109–116.
- [12] 罗慧, 张雅斌, 刘璐. 高影响天气事件公众关注度的风险评估[J]. 气象, 2007: 33(10): 15–22.
- [13] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学, 2012: 14(9): 55–63.
- [14] Jones B, O’Neill B C, McDaniel L, et al. Future population exposure to US heat extremes[J]. Nature Climate Change, 2015: 5(7): 652–655.
- [15] 姜彤, 王艳君, 翟建青, 等. 极端气候事件社会经济影响的风险研究: 理论、方法与实践[J]. 阅江学刊, 2018 (1): 90–105.
- [16] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups i and ii of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 40–42.
- [17] 景丞, 姜彤, 王艳君, 等. 中国区域性极端降水事件及人口经济暴露度研究[J]. 气象学报, 2016, 74(4): 572–582.
- [18] 王安乾, 苏布达, 王艳君, 等. 中国极端低温事件特征及其耕地暴露度研究[J]. 资源科学, 2017: 39(5): 954–963.
- [19] 王安乾, 苏布达, 王艳君, 等. 全球升温 1.5°C 与 2.0°C 情景下中国极端低温事件变化与耕地暴露度研究[J]. 气象学报, 2017, 75(3): 415–428.
- [20] Zhan M J, Li X C, Sun H M, et al. Changes in extreme maximum temperature events and population exposure in China under global warming scenarios of 1.5 and 2.0°C: Analysis using the regional climate model COSMO-CLM[J]. Journal of Meteorological Research, 2018, 32(1): 99–112.
- [21] Huang J L, Zhai J Q, Jiang T, et al. Analysis of future drought characteristics in China using the regional climate model CCLM[J]. Climate Dynamics, 2017, 50(1/2): 507–525.
- [22] Su B D, Huang J L, Fischer T, et al. Drought losses in China might double between the 1.5°C and 2.0°C warming[J]. PNAS, 2018, 115(42): 10600–10605.
- [23] 毛星竹, 刘建红, 李同昇, 等. “一带一路”沿线国家自然灾害时空分布特征分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27 (1): 1–8.
- [24] NatCatSERVICE. NatCatSERVICE[EB/OL]. (2019–03–16) [2020–03–01]. <https://natcatservice.munichre.com>.

- [25] 刘哲, 张鹏, 刘南江, 等. “一带一路”中国重点区域自然灾害特征分析[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 65-71.
- [26] 吴绍洪, 刘路路, 刘燕华, 等. “一带一路”陆域地理格局与环境变化风险[J]. 地理学报, 2018: 73(7): 1214-1225.
- [27] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553-597.
- [28] Simmons A. J, Willett K M, Jones P D, et al. Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, doi: 10.1029/2009JD012442.
- [29] Uppala S M, Dee D, Shinya K, et al. Towards a climate data assimilation system: status update of ERA-Interim [M]. ECMWF: Newsletter., 2008: 2-6.
- [30] World Bank. World Development Indicators[R]. Washington: World Bank. 2018.
- [31] Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998[J]. International Journal of Climatology 2001: 21(3): 269-284.
- [32] 李庆祥, 黄嘉佑. 对我国极端高温事件阈值的探讨[J]. 应用气象学报, 2011(22): 12-18.
- [33] IMD. All india heat wave information[EB/OL]. (2019-07-02)[2020-02-20]. <http://www.imd.gov.in/pages/heat-wave.php>.
- [34] 潘晓华, 翟盘茂. 气温极端值的选取与分析[J]. 气象, 2002, 28(10): 28-31.
- [35] Mishra V, Mukherjee S, Kumar R, et al. Heat wave exposure in India in current 1.5°C and 2.0°C worlds[J]. Environmental Research Letters, 2017, doi.org/10.1088/1748-9326/aa9388.
- [36] Sheffield J, Andreadis K M, Wood E F, et al. Global and continental drought in the second half of the twentieth century: Severity-Area-Duration analysis and temporal variability of Large-Scale events[J]. Journal of Climate, 2009, 22(8): 1962-198.
- [37] Wang A H, Lettenmaier D P, Sheffield J. Soil Moisture drought in China 1950-2006[J]. Journal of Climate, 2011, 24(13): 3257-3271.
- [38] Lloyd-Hughes BA. Spatio-temporal structure-based approach to drought characterisation[J]. International Journal of Climatology, 2012, 32(3): 406-418.
- [39] Xu K, Yang D, Yang H, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: A climatic perspective[J]. Journal of Hydrology, 2015(526): 253-264.
- [40] 黄大鹏, 张蕾, 高歌. 未来情景下中国高温的人口暴露度变化及影响因素研究[J]. 地理学报, 2016: 71(7): 1189-1200.
- [41] Zhan L F, Wang Y J, Sun H M, et al. Study on the change characteristics of and population exposure to heatwave events on the North China plain[J]. Advances in Meteorology, 2019, doi:10.1155/2019/7069195.
- [42] Mann H B. Non-parametric test against trend[J]. Econometrica, 1945: 13(3): 245-259.
- [43] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990: 25(1): 86-91.
- [44] 庞盛荣, 罗国军. 绍兴市近48年降水演变特征统计分析[J]. 科技导报, 2009, 27(18): 60-65.
- [45] Guo M, Li J, He H S, et al. Detecting global vegetation changes using mann-kendal (MK) trend test for 1982-2015 time period[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(6): 907-919.
- [46] Russo S, Dosio A, Graversen R G, et al. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(22): 500-512.
- [47] Liu Z, Anderson B, Yan K, et al. Global and regional changes in exposure to extreme heat and the relative contributions of climate and population change[J]. Scientific Reports, 2017(7): 43909.
- [48] 孔锋, 申丹娜, 吕丽莉, 等. “一带一路”沿线综合气象灾害防范国际合作[J]. 阅江学刊, 2017(6): 69-75.

## Spatial-temporal patterns of population exposed to the extreme maximum temperature events in the Belt and Road regions

LÜ Yanran<sup>1</sup>, JIANG Tong<sup>1,3</sup>, TAO Hui<sup>3</sup>, ZHAI Jianqing<sup>2</sup>, WANG Yanjun<sup>1\*</sup>

1. Institute for Disaster Risk Management, School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
2. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

**Abstract** This paper investigates the extreme maximum temperature event characterization and the population exposure in the Belt and Road regions by using the maximum temperature from ERA-Interim reanalysis dataset and the gridded population dataset in the period from 1979 to 2018. The extreme maximum temperature threshold is determined based on the 95% quartile of the daily maximum temperature. The improved Intensity-Area-Duration (IAD) method is used to determine the extreme maximum temperature event characteristics and the quantitative assessment of the population exposure to these extreme events. It is shown that, in the Belt and Road area, the frequency, the intensity and the duration of the summer extreme maximum temperature events are increased in the 1979–2018 period. The significant increase area is distributed in eastern China, western Russia and Central Eastern Europe. In summer, the extreme maximum temperature events mostly occur in Kazakhstan, Xinjiang, and central Russia, generally, in the northern part of the study area. The intensity high value area is mainly distributed in Egypt, Saudi Arabia, Pakistan, India and other places in the southwest region whereas the duration high value area is concentrated in India mainly. During the study period, the yearly cumulative impact area and the population exposure to extreme temperature events show an upward trend, reaching the highest value in the past 10 years. Areas with the high population exposure are mainly distributed in eastern China, Indian continent and countries around the Black Sea and the areas with high population exposure are expanding. Among the influencing factors of the population exposure, the climate factor, the population factor, the interaction of the climate and population factors have a similar contribution rate, but the contribution rate of the climatic factors has increased significantly in the past 10 years. It is suggested to strengthen the research of monitoring, warning and forecast of the extreme maximum temperature events.

**Keywords** extreme maximum temperature events; intensity-area-duration method; population exposure; the Belt and Road region ●



(责任编辑 徐丽娇)