

# 未来情景下中国高温的人口暴露度变化及影响因素研究

黄大鹏<sup>1,2</sup>, 张 蕾<sup>3</sup>, 高 歌<sup>1,2</sup>

(1. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 3. 国家气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 基于RCP 8.5气候情景下21个高分辨率全球气候模式的日最高气温数据和A2r社会经济发展情景下的人口数据,以高温日数和人口数量的乘积构建高温的人口暴露度指标,采用多个气候模式集合平均的方法从网格单元尺度分析未来不同时段中国高温和强危害性高温的人口暴露度变化,并从全国和气象地理分区两种空间尺度研究人口暴露度变化的影响因素。研究表明:未来情景下,中国高温的人口暴露度明显增加,2021-2040年、2041-2060年、2061-2080年和2081-2100年相比基准时段1981-2010年分别增加了1.3、2.0、3.6和5.9倍,强危害性高温的人口暴露度增加更为显著,相比基准时段分别增加了2.0、8.3、24.2和82.7倍。高温的人口暴露度在华北、黄淮、华南、江南、江淮、西南和江汉地区增加较为明显,其中华北、黄淮、华南和江南最为显著;强危害性高温的人口暴露度在华北、黄淮、江南、江淮、西南和江汉等区域增加较为明显,其中华北、黄淮、江南和江淮最为显著;未来情景下人口暴露度的变化主要受气候因子的影响,其次受人口和气候因子的共同影响,单独人口因子的影响很小。全国尺度上,气候因子对未来不同时段人口暴露度变化的影响逐渐减弱,贡献率由70.0%左右逐渐减至60.0%左右。人口和气候因子的共同作用逐渐增强,贡献率由20.0%左右逐渐增至40.0%左右。

**关键词:** 未来情景;人口暴露度;高温;强危害性高温;影响因素;中国

DOI: 10.11821/dlxb201607008

## 1 引言

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)于2014发布的第五次评估报告显示,1880-2012年,全球地表温度升高了0.85℃<sup>[1]</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>[2]</sup>。极端高温期间,城市脆弱人口以及城乡户外工作者发病和意外死亡的风险已经被IPCC第五次评估报告确定为气候变化的关键风险之一<sup>[3]</sup>。近年来,极端高温天气及高温灾害在全球频繁发生。2003年的高温热浪席卷了欧洲,造成至少3.5万人死亡<sup>[4]</sup>。2010年夏季高温热浪袭击北半球多国,俄罗斯遭受了40年来最严重的高温干旱<sup>[5]</sup>。2013年夏季中国南方地区遭遇1951年以来最强的高温热浪袭击,中暑、呼吸道疾病和心脑血管疾病发病人数和死亡率激增<sup>[6]</sup>。2014年印度新德里47.8℃高温创62年来纪录,澳大利亚年初经历罕见高温,超过150项气候纪录被打破<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>。2016年5月19日,印度拉贾斯坦邦的小城珀洛迪最高气温达51℃,刷新印度近60年来的最高气温纪录<sup>[9]</sup>。高温灾害对人体健康、生命安全构成严重

收稿日期: 2015-10-25; 修订日期: 2016-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101517) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41101517]

作者简介: 黄大鹏(1978-), 男, 安徽潜山人, 博士, 副研究员, 主要从事气象灾害风险评估、气候变化影响评估、遥感与GIS应用研究等。E-mail: huangdp@cma.gov.cn

1189-1200 页

威胁, 对人们的日常生活以及社会经济发展造成不利影响, 高温灾害研究已引起政府部门和科学界的普遍关注, 成为了气候变化研究的热点。

目前, 高温灾害的研究主要集中在高温本身的时空特征(包括高温强度、发生频率、持续时间等)<sup>[10-13]</sup>、高温的天气成因与环流背景<sup>[14-17]</sup>、高温的气候特征<sup>[17-20]</sup>、高温的灾害影响<sup>[21-28]</sup>等方面。近年来, 高温灾害的风险评价在国内开始出现, 取得了重要进展。谢盼等<sup>[29]</sup>构建了基于“高温胁迫—社会脆弱性—人口暴露”的高温灾害人群健康风险评价框架, 实现了中国县域尺度的高温灾害人群健康风险评价, 为高温灾害风险量化研究做出了有益探索。但此风险评估针对过去已发生的高温事实, 使用的社会经济数据为过去的静态统计资料, 未考虑未来高温的变化及社会经济的发展; 高温胁迫和人口暴露的表达均采用县域的均质化表达, 不能精细化的表达高温的人口暴露度。尹占娥等<sup>[30]</sup>基于历史高温观测数据, 利用概率分布方法计算不同重现期的高温情景, 以土地利用表达高温灾害的暴露度, 最终实现不同重现期下的高温危险性评估, 但这种情景分析仍然是基于过去的高温事实。贺山峰等<sup>[31]</sup>基于单模式的气候情景数据综合高温日数和热浪日数对中国高温灾害危险性的时空格局进行预估, 未涉及暴露度的研究; 董思言等<sup>[32]</sup>基于全球气候模式的情景数据和社会经济情景数据对中国未来高温灾害风险进行了评估, 该评估采用专家打分赋权方法综合人口、GDP和耕地评估高温暴露度, 未针对人口暴露度进行深入分析。本文基于NASA最新发布的高分辨率全球气候预测数据集和奥地利国际应用系统分析研究所(IIASA)的GGI人口情景数据, 以网格为基本分析单元分析未来不同时期中国人口对不同强度高温暴露度的动态变化, 并深入研究全国范围和气象地理分区的高温 and 强危害性高温人口暴露度变化的影响因素。本文的研究成果可以为未来不同时期高温的人口暴露度的热点区域识别及高温灾害风险防范提供科学参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文所用的气候数据集是美国国家航空航天局(NASA)发布的地球交换计划(NASA Earth Exchange)最新产品(NEX-GDDP数据集), 将全球实际观测数据(1950-2005年)与CMIP 5气候模拟资料(2006-2100年)相结合, 包括21个全球气候模式(表1)的逐日最高气温数据, 空间分辨率均为0.25°×0.25°。该气候数据集包括RCP 4.5和RCP 8.5两种情景, 本文选用RCP8.5排放情景, 该情景代表温室气体的高排放情景<sup>[33]</sup>。

中国人口情景数据来自奥地利国际应用系统分析研究所(IIASA)的GGI情景数据库。该数据库包含A2r、B2和B1三种基准的社会经济和技术发展情景。A2r情景是在SRES A2情景基础上修改的新情景, 该情景考虑了长期人口展望的最新观点, 即未来世界人口的增速将减缓<sup>[34]</sup>。考虑到RCP8.5情景中有关人口和社会经济发展趋势以及技术发

表1 NEX-GDDP中21个全球气候模式信息  
Tab. 1 Information of 21 global climatic models in NEX-GDDP dataset

气候模式名称/所属国家		
ACCESS1-0 /澳大利亚	CSIRO-MK3-6-0 /澳大利亚	MIROC-ESM /日本
BCC-CSM1-1 /中国	GFDL-CM3 /美国	MIROC-ESM-CHEM /日本
BNU-ESM /中国	GFDL-ESM2G /美国	MIROC5 /日本
CanESM2 /加拿大	GFDL-ESM2M /美国	MPI-ESM-LR /德国
CESM4 /美国	INMCM4 /俄罗斯	MPI-ESM-MR /德国
CESM1-BGC /美国	IPSL-CM5A-LR /法国	MRI-CGCM3 /日本
CNRM-CM5 /法国	IPSL-CM5A-MR /法国	NorESM1-M /挪威

展的假定来源于A2r情景<sup>[33]</sup>，本文选用A2r情景下的人口数据，以与RCP 8.5情景保持一致。GGI人口情景数据的时间分辨率为10年，空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。为保持人口数据与日最高气温数据在空间尺度上的一致性，将人口数据采用平均值计算方法插值到 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的网格上。

## 2.2 高温的人口暴露度构建

根据中国气候和环境特点，将日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 定义为高温，日最高气温 $\geq 40^{\circ}\text{C}$ 定义为强危害性高温<sup>[35]</sup>。将高温的人口暴露度定义为年均高温日数与暴露于高温下的人口数量的乘积<sup>[36]</sup>。本文中高温的人口暴露度的具体计算方法为：将RCP 8.5情景下21个全球气候模式集合平均得到的年均高温日数和年均强危害性高温日数分别与A2r社会经济情景下的人口数据相乘，得到高温的人口暴露度和强危害性高温的人口暴露度。为了研究未来高温的人口暴露度变化，本文分别计算了1981-2010年（基准时段）、2021-2040年、2041-2060年、2061-2080年和2081-2100年共5个时段的中国高温的人口暴露度。

## 2.3 高温的人口暴露度变化的影响因素分析

高温的人口暴露度变化受高温日数和人口数量及分布变化的影响，可以分解为气候因子（高温日数变化，人口数量不变）影响、人口因子（高温日数不变，人口数量变化）影响、人口和气候因子（高温日数和人口数量均变化）共同影响。

高温的人口暴露度变化可表示为：

$$(x+\Delta x) \times (y+\Delta y) - x \times y = x \times \Delta y + y \times \Delta x + \Delta x \times \Delta y \quad (1)$$

式中： $x$ 、 $y$ 分别为高温日数和人口数量； $x \times \Delta y$ 为人口因子影响； $y \times \Delta x$ 为气候因子影响； $\Delta x \times \Delta y$ 为人口和气候因子的共同作用。

高温的人口暴露度变化中不同影响因素的贡献率计算方法如下：

$$\text{气候因子的贡献率: } \frac{y \times \Delta x}{(x+\Delta x) \times (y+\Delta y) - x \times y} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{人口因子的贡献率: } \frac{x \times \Delta y}{(x+\Delta x) \times (y+\Delta y) - x \times y} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{人口和气候因子共同的贡献率: } \frac{\Delta x \times \Delta y}{(x+\Delta x) \times (y+\Delta y) - x \times y} \times 100\% \quad (4)$$

# 3 结果分析

## 3.1 中国高温和强危害性高温的人口暴露度

从中国高温的人口暴露度来看，未来情景下中国高温和强危害性高温的人口暴露度从21世纪20年代开始明显增加（图1）。基准时段1981-2010年，中国高温的人口暴露度为58.41亿人·d；2021-2040年、2041-2060年、2061-2080年和2081-2100年，中国高温的人口暴露度分别增加到134.33亿人·d、177.23亿人·d、267.87亿人·d和402.49亿人·d，相比基准时段分别增加了1.3、2.0、3.6和5.9倍。基准时段（1981-2010年），中国强危害性高温的人口暴露度为1.33亿人·d；2021-2040年、2041-2060年、2061-2080年和2081-2100年，中国强危害性高温的人口暴露度分别增加到3.97亿人·d、12.43亿人·d、33.61亿人·d和111.65亿人·d，相比基准时段分别增加了2.0、8.3、24.2和82.7倍。21世纪后期中国强危害性高温的人口暴露度增幅显著，需要特别关注强危害性高温对人体健康的不利影响，重点加强对强危害性高温的预警和防范工作。

## 3.2 中国高温的人口暴露度分布

基准时段1981-2010年，北京东南部、天津中东部、河北中南部、山东西部、河南东

北部、湖北东北部、江西中北部、湖南东部及重庆西南部等地的高温的人口暴露度为 $4 \times 10^6$ 人 $\cdot$ d~ $10 \times 10^6$ 人 $\cdot$ d, 其余大部分地区不足 $1 \times 10^6$ 人 $\cdot$ d (图2)。

未来情景下, 除甘肃大部、青海、西藏、四川中西部及云南北部外, 中国大部地区人口受到高温的影响, 且从2021-2040年开始高温的人口暴露度明显增加。与基准时段相比, 2021-2040年, 中国大部地区高温的人口暴露度明显增加, 其中北京东南部、河北中南部、山东西部、河南东北部以及天津东部、湖北东部、湖南东部、广东中部等地的部分地区增幅为 $10 \times 10^6$ 人 $\cdot$ d~ $20 \times 10^6$ 人 $\cdot$ d (图3a); 2041-2060年, 除新疆东南部外, 大部地区高温的人口暴露度继续增加, 北京东南部、天津、河北中南部、山东西部、河南东北部、安徽北部、江苏南部以及湖北东部、湖南东部、广东中部等地的部分地区高温的人口暴露度增加 $10 \times 10^6$ 人 $\cdot$ d~ $20 \times 10^6$ 人 $\cdot$ d, 其中北京东南部以及天津、河南、湖北、上海和广东的局部地区增幅超过 $20 \times 10^6$ 人 $\cdot$ d (图3b); 2061-2080年, 北京东南

部、天津、河北中南部、山东中西部、河南中东部、安徽北部、江苏南部、广东中南部、广西东南部以及湖北东部、湖南中东部、四川盆地、陕西关中等地的部分地区高温的人口暴露度增加 $10 \times 10^6$ 人 $\cdot$ d~ $20 \times 10^6$ 人 $\cdot$ d, 其中北京东南部、天津中部、河北中南部、山东西部、河南东北部、广东中部以及江苏、上海、湖北等地的局部地区增幅超过 $20 \times 10^6$ 人 $\cdot$ d (图3c); 2081-2100年, 北京大部、天津、河北中南部、山东中西部、河南东北部、江苏南部、广东南部以及上海、浙江、湖北、湖南、广西、四川盆地、陕西关中等地局部地区高温的人口暴露度增幅超过 $20 \times 10^6$ 人 $\cdot$ d (图3d)。

从中国气象地理区划的分区<sup>[37]</sup>来看, 未来不同时段高温的人口暴露度在华北、黄淮、华南、江南、江淮、西南和江汉等区域增加较为明显 (图4)。与基准时段1981-2010年相比, 2021-2040年, 江南、华北、黄淮、华南、江淮、西南和江汉等区域高温的人口暴露度增幅在7.00亿人 $\cdot$ d以上, 其中江南、华北和黄淮的增幅超过25.28亿人 $\cdot$ d; 与2021-2040年相比, 2041-2060年, 华北、黄淮、江南、华南、江淮、西南和江汉等区域

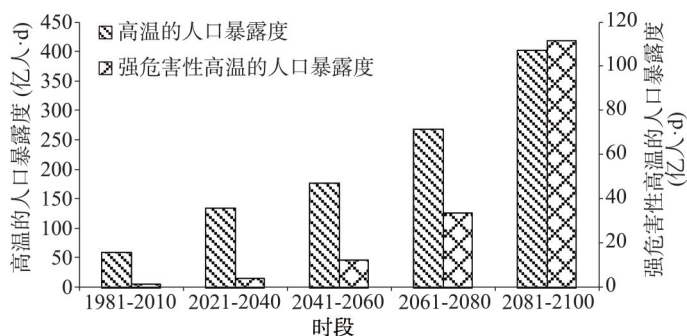


图1 基准时段和未来情景下中国人口对高温和强危害性高温的暴露度

Fig. 1 Population exposure to high temperature and extremely high temperature for the 1981-2010 base period and projected exposures under RCP8.5 climate scenario and A2r population scenario for future periods in China

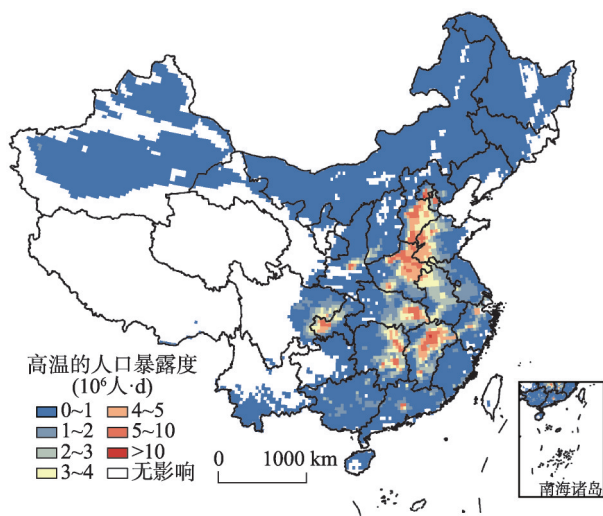


图2 基准时段1981-2010年中国高温的人口暴露度

Fig. 2 Population exposure to high temperature for the 1981-2010 base period in China



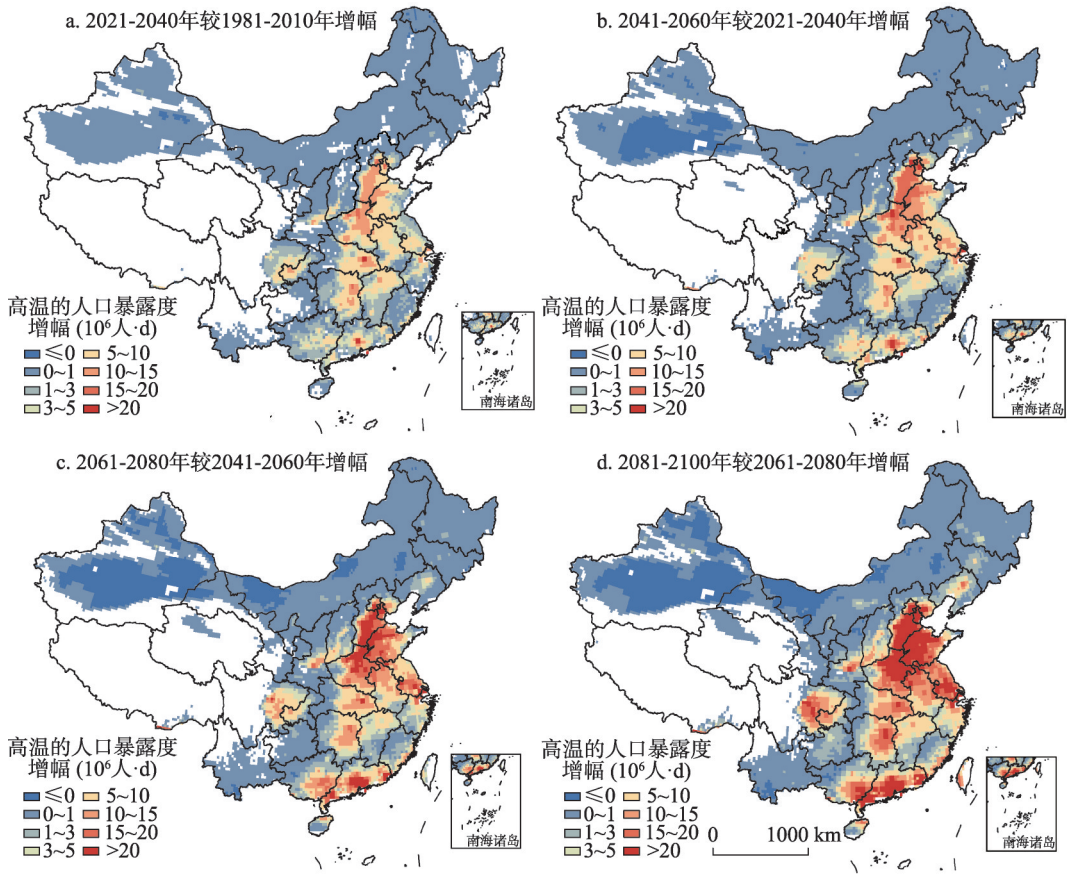


图3 未来情景下各时段中国高温的人口暴露度变化

Fig. 3 Projected changes in population exposure to high temperature for future periods under RCP8.5 climate scenario and A2r population scenario in China

高温的人口暴露度增幅在7.73亿人·d以上,其中华北、黄淮和江南的增幅超过31.77亿人·d;与2041-2060年相比,2061-2080年,华北、黄淮、华南、江南、江淮、西南和江汉的高温的人口暴露度增幅在10.29亿人·d以上,其中华北、黄淮、华南和江南的增幅达42.46亿人·d以上,华北和黄淮的增幅超过56.82亿人·d;与2061-2080年相比,2081-

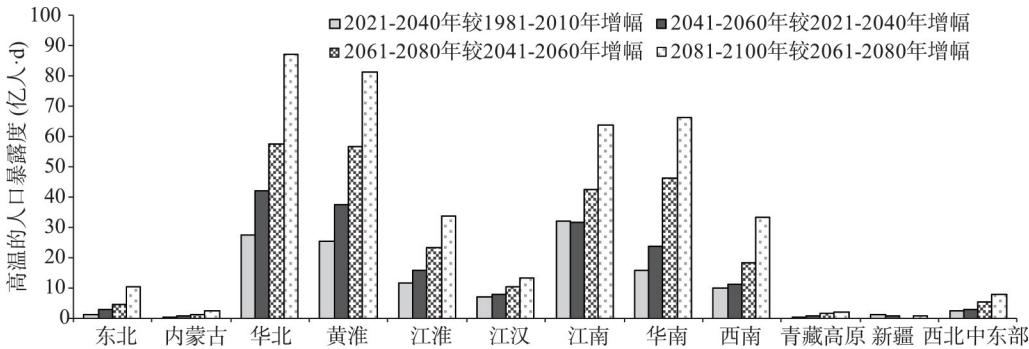


图4 未来情景下中国不同区域的高温的人口暴露度变化

Fig. 4 Projected changes in regional population exposure to high temperature for future periods under RCP8.5 climate scenario and A2r population scenario in different meteorological geographical divisions of China

2100年,华北、黄淮、华南、江南、江淮、西南高温的人口暴露度增幅在33.36亿人·d以上,其中华南和江南的增幅达63.96亿人·d以上,华北和黄淮的增幅超过81.45亿人·d。

### 3.3 中国强危害性高温的人口暴露度分布

基准时段1981-2010年,新疆南疆和北疆中部、陕西关中、山西西南部、内蒙古东北部部分地区、北京东北部、天津、河北中东部、山东西部大部、河南中东部、安徽中部、湖北东部、江西大部、湖南东北部及重庆西部等地的人口遭受强危害性高温的危害,强危害性高温的人口暴露度一般不足 $0.1 \times 10^6$ 人·d,北京东南部、河北中南部、河南东北部及江西中北部部分地区强危害性高温的人口暴露度为 $0.1 \times 10^6$ 人·d~ $0.2 \times 10^6$ 人·d,其中北京东南部部分地区达 $0.3 \times 10^6$ 人·d~ $0.5 \times 10^6$ 人·d(图5)。

未来情景下,随着年代的增長,强危害性高温的人口暴露度在范围和强度上均有明显增加。与基准时段相比,2021-2040年上述大部地区强危害性高温的人口暴露度有所增加,其中北京东南部、天津中东部、河北中南部、河南东北部、湖北东部、江西中北部、湖南东部增加了 $0.6 \times 10^6$ 人·d~ $1.2 \times 10^6$ 人·d(图6a);与2021-2040年相比,2041-2060年人口受强危害性高温影响的范围和强度均明显增加,北京东南部、天津大部、河北中南部、山东西北部、河南东北部、湖北东部、江西中北部、湖南东北部等地强危害性高温的人口暴露度增幅超过 $1.2 \times 10^6$ 人·d(图6b);2061-2080年中国中东部大部地区人口均受到强危害性高温的影响,与2041-2060年相比,北京东部、天津、河北中南部、山东中西部、河南中东部、安徽中北部、江苏西部和南部、浙江北部、江西北部、湖南东部、湖北东部、重庆西南部、四川盆地东南部、陕西关中及山西西南部等地强危害性高温的人口暴露度增幅超过 $1.2 \times 10^6$ 人·d(图6c);与2061-2080年相比,2081-2100年中国中东部大部、重庆西部及四川盆地等地强危害性高温的人口暴露度增幅超过 $1.2 \times 10^6$ 人·d(图6d)。

从中国气象地理区划的分区来看,未来不同时段强危害性高温的人口暴露度在华北、黄淮、江南、江淮、西南和江汉等区域增加较为明显(图7)。与基准时段1981-2010年相比,2021-2040年江南、华北、江淮、黄淮等区域强危害性高温的人口暴露度增幅在0.39亿人·d以上;与2021-2040年相比,2041-2060年华北、江南、黄淮、江淮、江汉和西南等区域强危害性高温的人口暴露度增幅在0.62亿人·d以上,其中华北和江南的增幅超过3.16亿人·d;与2041-2060年相比,2061-2080年华北、黄淮、江南、江淮、西南、江汉、西北中东部、华南和新疆的强危害性高温的人口暴露度增幅在0.34亿人·d以上,其中华北、黄淮、江南和江淮的增幅达3.29亿人·d以上,华北、黄淮和江南的增幅超过6.88亿人·d;与2061-2080年相比,2081-2100年,除东北、内蒙古、青藏高原和新疆外,其余区域强危害性高温的人口暴露度增幅均高于1.82亿人·d,其中华北、黄淮、江南、江淮、西南、江汉和华南的增幅达4.37亿人·d以上,华北和黄淮的增幅超过26.94亿人·d。

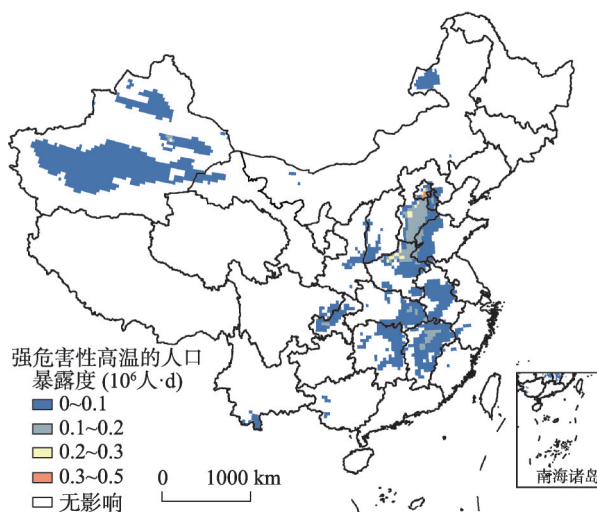


图5 基准时段1981-2010年中国强危害性高温的人口暴露度

Fig. 5 Population exposure to extremely high temperature for the 1981-2010 base period in China

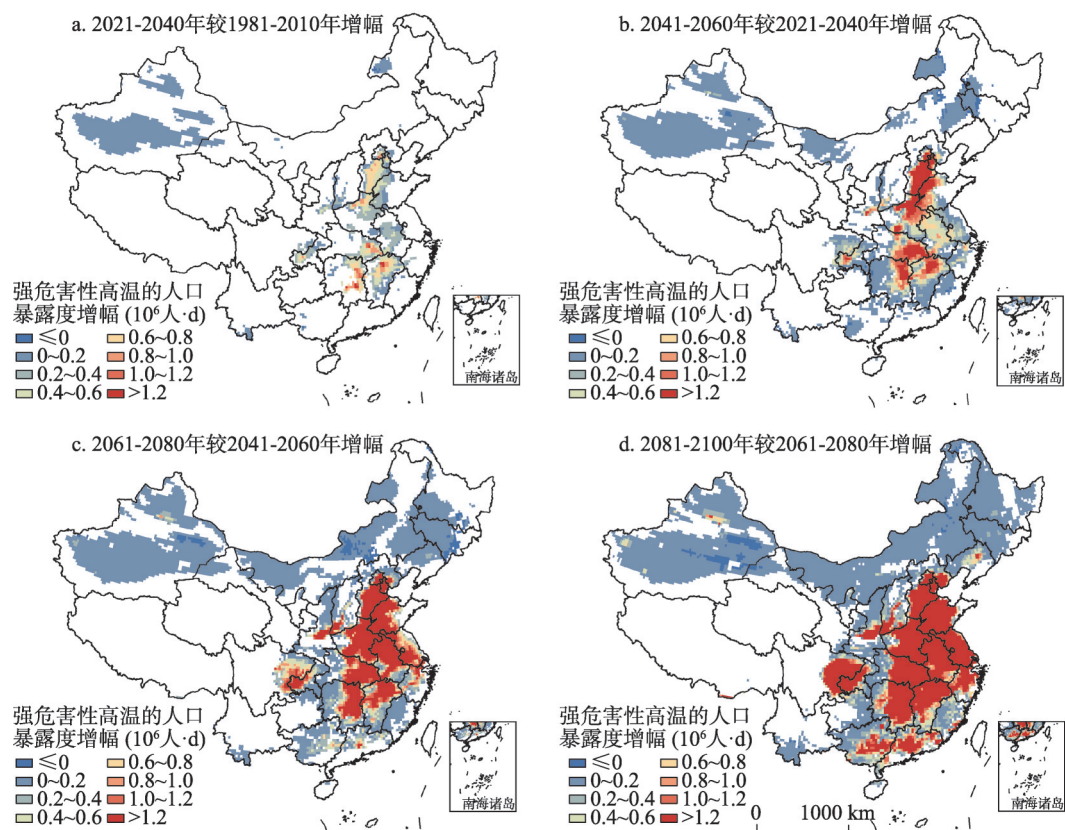


图6 未来情景下各时段中国强危害性高温的人口暴露度变化

Fig. 6 Projected changes in population exposure to extremely high temperature for future periods under RCP8.5 climate scenario and A2r population scenario in China

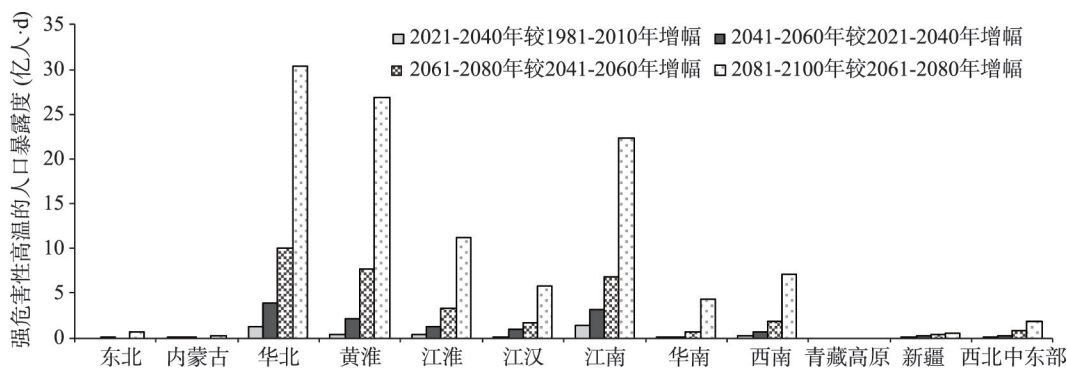


图7 未来情景下中国不同区域强危害性高温的人口暴露度变化

Fig. 7 Projected changes in regional population exposure to extremely high temperature for future periods under RCP8.5 climate scenario and A2r population scenario in different meteorological geographical divisions of China

### 3.4 未来情景下高温和强危害性高温的人口暴露度变化的影响因素分析

高温和强危害性高温的人口暴露度变化不仅取决于气候因子(高温日数)的变化,也取决于人口数量及其空间分布的变化。从全国尺度来看,未来不同时段高温和强危害性高温的人口暴露度变化主要由气候因子(高温日数变化,人口数量不变)主导,且气候因子的影响在未来不同时段逐渐减弱;人口因子(高温日数不变,人口数量变化)在



未来不同时段人口暴露度变化中的影响很小,人口因子影响最强的时段反映在2021-2040年相较于1981-2010年的变化中,对高温的人口暴露度变化的贡献率达13.1%,对强危害性高温的人口暴露度变化的贡献率达7.7%,其它时段的贡献率均不足3.0%;人口和气候因子的共同影响(高温日数和人口数量均变化)在未来不同时段逐渐增强,贡献率由20.0%左右逐渐增加到40.0%左右(表2)。

考虑到中国高温和强危害性高温的人口暴露度变化主要发生在华北、黄淮、江淮、江汉、江南、华南和西南地区,仅对这些区域人口暴露度变化的影响因素进行分析(表3)。除华北地区在2041-2060年、2061-2080年、2081-2100年高温和强危害性高温的人口暴露度的增加主要受人口和气候因子共同影响(高温日数和人口数量均变化)外,其它区域未来不同时段人口暴露度的变化主要受气候因子(高温日数变化,人口数量不变)影响,其次受人口和气候因子(高温日数和人口数量均变化)的共同影响;各区域不同时段人口暴露度的变化受人口因子(高温日数不变,人口数量变化)的影响较小,贡献率一般低于9.0%,仅在华北、黄淮、江淮2021-2040年高温的人口暴露度变化中、黄淮2061-2080年高温的人口暴露度变化中以及华北2021-2040年强危害性高温的人口暴露度变化中高于9.0%。西南地区在高温的人口暴露度变化中,气候因子占绝对的主导地位,贡献率达90.0%以上,西南和华南地区在强危害性高温的人口暴露度变化中,气候因子同样的占绝对的主导地位。

表2 中国高温和强危害性高温的人口暴露度变化的影响因素分析

Tab. 2 Analysis of factors affecting changes in population exposure to high temperature and extremely high temperature in China

暴露度变化	高温( $\geq 35^{\circ}\text{C}$ )			强危害性高温( $\geq 40^{\circ}\text{C}$ )		
	人口因子 (%)	气候因子 (%)	人口和气候 因子(%)	人口因子 (%)	气候因子 (%)	人口和气候 因子(%)
2021-2040年较1981-2010年	13.1	67.6	19.4	7.7	68.9	23.4
2041-2060年较2021-2040年	2.9	67.6	29.5	0.9	67.1	32.1
2061-2080年较2041-2060年	1.5	66.3	32.2	0.3	65.4	34.4
2081-2100年较2061-2080年	1.8	58.4	39.9	0.1	59.9	40.0

4 结论与讨论

基于最新的全球高分辨率多模式RCP 8.5气候情景数据和A2r人口情景数据,对未来情景下中国高温和强危害性高温的人口暴露度变化及其影响因素进行研究,主要结论为:

(1) 从全国范围来看,相比于基准时段1981-2010年,未来情景下中国高温的人口暴露度逐渐增加,2021-2040年、2041-2060年、2061-2080年和2081-2100年分别增加1.3、2.0、3.6和5.9倍,强危害性高温的人口暴露度增加更加明显,分别增加2.0、8.3、24.2和82.7倍。

(2) 未来情景下,除甘肃大部、青海、西藏、四川中西部及云南北部外,中国大部地区人群受到高温影响,且从2021-2040年开始高温的人口暴露度明显增加。至2081-2100年,北京大部、天津、河北中南部、山东中西部、河南中东部、江苏、安徽中北部、湖北东部、湖南东部、广东南部、广西东南部及四川盆地高温的人口暴露度增幅最为明显。强危害性高温的人口暴露度从基准时段只出现在中国中部和新疆发展至中国北方和中东部大部地区。

(3) 从中国气象地理区划的分区来看,未来不同时段高温的人口暴露度在华北、黄淮、华南、江南、江淮、西南和江汉等区域增加较为明显,其中华北、黄淮、华南和江



表3 中国不同气象地理分区高温和强危害性高温的人口暴露度变化的影响因素分析  
Tab. 3 Analysis of factors affecting changes in population exposure to high temperature and extremely high temperature in different meteorological geographical divisions of China

暴露度变化	气象地理分区	高温(≥ 35℃)			强危害性高温(≥ 40℃)		
		人口因子 (%)	气候因子 (%)	人口和气候 因子(%)	人口因子 (%)	气候因子 (%)	人口和气候 因子(%)
2021-2040 年较 1981-2010 年增幅	华北	30.1	40.0	29.9	19.0	45.6	35.5
	黄淮	13.5	63.4	23.1	8.6	66.9	24.5
	江淮	11.1	68.3	20.6	3.4	75.7	20.9
	江汉	9.0	72.1	18.9	2.4	77.8	19.8
	江南	9.7	74.6	15.7	1.9	78.6	19.5
	华南	3.9	78.9	17.2	-12.7	152.6	-39.9
	西南	2.5	92.9	4.6	0.3	96.4	0.3
2041-2060 年较 2021-2040 年增幅	华北	8.7	39.7	51.7	2.6	43.5	53.9
	黄淮	2.8	62.3	34.9	0.5	65.8	33.7
	江淮	2.0	67.9	30.1	0.3	71.7	28.0
	江汉	1.7	73.0	25.3	0.1	74.0	25.9
	江南	1.3	77.7	21.1	0.1	76.0	23.9
	华南	0.3	76.2	23.5	-0.4	125.1	-24.7
	西南	-2.5	106.5	-4.0	-0.4	107.6	-7.1
2061-2080 年较 2041-2060 年增幅	华北	4.7	36.6	58.7	0.7	40.0	59.2
	黄淮	14.6	58.8	39.8	0.1	63.2	36.6
	江淮	1.1	64.3	34.6	0.1	67.6	32.3
	江汉	1.1	71.3	27.6	0.0	71.2	28.8
	江南	1.0	77.2	21.8	0.1	75.4	24.6
	华南	0.2	71.7	28.1	0.0	92.8	7.2
	西南	-0.9	108.0	-7.0	-0.1	106.7	-6.6
2081-2100 年较 2061-2080 年增幅	华北	3.6	31.8	64.6	0.3	35.3	64.4
	黄淮	1.7	48.7	49.6	0.1	56.2	43.7
	江淮	1.5	54.3	44.2	0.1	61.3	38.6
	江汉	2.0	61.2	36.9	0.0	65.5	34.5
	江南	2.1	66.4	31.5	0.1	69.0	30.9
	华南	0.4	62.1	37.6	0.0	80.9	19.1
	西南	0.4	99.9	-0.3	0.0	100.6	-0.6

南最为显著。未来不同时段强危害性高温的人口暴露度在华北、黄淮、江南、江淮、西南和江汉等区域增加较为明显，其中华北、黄淮、江南和江淮最为显著。

(4) 从全国尺度来看，在未来不同时段高温和强危害性高温的人口暴露度变化中气候因子占主导，其次为人口和气候因子的共同影响。气候因子的影响在未来不同时段逐渐减弱，在高温的人口暴露度变化中，其贡献率由67.6%逐渐减至58.4%；在强危害性高温的人口暴露度变化中，其贡献率由68.9%逐渐减至59.9%。人口和气候因子的共同影响在未来不同时段逐渐增强，贡献率由20.0%左右逐渐增至40.0%左右。

(5) 从中国气象地理区划的分区来看，华北地区在2041-2060年、2061-2080年、2081-2100年高温和强危害性高温的人口暴露度的增加主要受人口和气候因子的共同作用，其次为气候因子的影响；黄淮、江淮、江汉、江南、华南和西南地区人口暴露度的变化主要受气候因子的影响，其次受人口和气候因子的共同作用；各区域不同时段人口暴露度的变化受人口因子的影响较小。西南地区在高温的人口暴露度变化中，气候因子占绝对的主导地位，西南和华南地区在强危害性高温的人口暴露度变化中，气候因子同样的占绝对的主导地位。

总体上来说,未来情景下中国中东部大部高温的人口暴露度明显增加,强危害性高温的人口暴露度增幅更为明显,因此要重点加强对强危害性高温的预警与防范。未来情景下高温的人口暴露度变化主要受气候因子的影响,其次受人口和气候因子的共同作用,单独人口因子的影响很小。

本文采用多模式集合平均方法对未来高温情景进行了预估,该方法是气候变化预估的一种常用方法,但多模式对于未来高温模拟的不确定性仍需要进一步研究。本文基于网格单元,以高温日数和高温对应网格单元的人口情景数据作为直接衡量高温的人口暴露度指标,精细化的揭示了高温的人口暴露度变化。分区域研究人口暴露度的变化规律及其影响因素,识别人口暴露度变化的热点区域,为更加有效的开展高温预警和高温灾害风险的防范工作提供了科学指导。高温灾害风险除了受高温的人口暴露度影响之外,还与不同人群的高温适应能力、不同区域的高温防御水平等因素有关,年龄、性别、职业、疾病状况、医疗资源、经济水平等均会在一定程度上影响人群对高温的反应,因此,有必要在本文的基础上,进一步研究未来情景下高温灾害脆弱性的时空演变,提升高温灾害的风险管理水平。

## 参考文献(References)

- [1] IPCC, 2014. Climate change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change//Core Writing Team, Pachauri R K, Meyer L A. Geneva, Switzerland, IPCC, 151.
- [2] Zhang Cunjie, Huang Dapeng, Liu Changyi, et al. IPCC AR5 updated understanding of climate change impacts on human well-beings. *Advances in Climate Changes Research*, 2014, 10(4): 246-250. [张存杰, 黄大鹏, 刘昌义, 等. IPCC 第五次评估报告气候变化对人类福祉影响的新认知. *气候变化研究进展*, 2014, 10(4): 246-250.]
- [3] Li Ying, Gao Ge, Song Lianchun. Understanding of disaster risk and the management associated with climate change in IPCC AR5. *Advances in Climate Changes Research*, 2014, 10(4): 246-250. [李莹, 高歌, 宋连春. IPCC 第五次评估报告对气候变化风险及风险管理的新认知. *气候变化研究进展*, 2014, 10(4): 260-267.]
- [4] European heatwave caused 35,000 deaths. *New Scientist*, 2003. <https://www.newscientist.com/article/dn4259-european-heatwave-caused-35000-deaths>.
- [5] National Climate Committee, China Meteorological Administration. *China Climate Bulletin*, 2010, 2011. [国家气候委员会, 中国气象局. *中国气候公报* 2010年, 2011.]
- [6] China Meteorological Administration. *China Meteorological Disaster Yearbook (2014)*. Beijing: China Meteorological Press, 2015. [中国气象局. *中国气象灾害年鉴* 2014. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [7] National Climate Committee, China Meteorological Administration. *China Climate Bulletin* 2014, 2015. [国家气候委员会, 中国气象局. *中国气候公报* 2014年, 2015.]
- [8] Pakistan Heat Wave 2015: Death Toll Exceeds 1,200 As Karachi Struggles With Continued Extreme Weather During Ramadan. *International Business Times*. <http://www.ibtimes.com/pakistan-heat-wave-2015-death-toll-exceeds-1200-karachi-struggles-continued-extreme-1986866>.
- [9] Ashish Mehta. Rajasthan's Phalodi sizzles at 51°C, highest ever temperature in country. *The Times of India*. <http://timesofindia.indiatimes.com/city/jaipur/Rajasthans-Phalodi-sizzles-at-51C-highest-ever-temperature-in-country/articleshow/52349772.cms>.
- [10] Ding T, Qian W H, Yan Z W. Changes in hot days and heatwaves in China during 1961-2007. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(10): 1452-1462.
- [11] Ye Dianxiu, Yin Jifu, Chen Zhenghong, et al. Spatiotemporal change characteristics of summer heatwaves in China in 1961-2010. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 9(1): 15-20. [叶殿秀, 尹继福, 陈正洪, 等. 1961-2010年我国夏季高温热浪的时空变化特征. *气候变化研究进展*, 2013, 9(1): 15-20.]
- [12] Li Shuangshuang, Yang Saini, Zhang Donghai, et al. Spatiotemporal variability of heat waves in Beijing-Tianjin-Hebei Region and influencing factors in recent 54 years. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(5): 545-554. [李双双, 杨赛霓, 张东海, 等. 近54年京津冀地区热浪时空变化特征及影响因素. *应用气象学报*, 2015, 26(5): 545-554.]
- [13] Yang Honglong, Pan Jie, Zhang Lei. Characteristics of regional high temperature and heat wave events over China under SRES A2 scenario. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, 31(1): 51-59. [杨红龙, 潘婕, 张镭. SRES A2情景下中国区域性高温热浪事件变化特征. *气象与环境学报*, 2015, 31(1): 51-59.]

- [14] Peng Haiyan, Zhou Zengkui, Zhao Yongling, et al. THE analysis of abnormal high temperature in 2003 summer. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2005, 25(4): 355-361. [彭海燕, 周曾奎, 赵永玲, 等. 2003年夏季长江中下游地区异常高温的分析. 气象科学, 2005, 25(4): 355-361.]
- [15] You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003. *Climate Dynamics*, 2011, 36(11/12): 2399-2417.
- [16] Trenberth K E, Fasullo J T. Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D17): 127-135.
- [17] Sun Jianqi, Wang Huijun, Yuan Wei. Decadal variability of the extreme hot event in China and its association with atmospheric circulations. *Climatic and Environmental Research*, 2011, 16(2): 199-208. [孙建奇, 王会军, 袁薇. 我国极端高温事件的年代际变化及其与大气环流的联系. 气候与环境研究, 2011, 16(2): 199-208.]
- [18] Zhai Panmao, Pan Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 1-10. [翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. 地理学报, 2003, 58(1): 1-10.]
- [19] Luterbacher J, Dietrich D, Xoplaki E, et al. European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science*, 2004, 303: 1499-1503.
- [20] Shi Jun, Ding Yihui, Cui Linli. Climatic characteristics and their changing law during summer high-temperature times in East China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(3): 237-246. [史军, 丁一汇, 崔林丽. 华东地区夏季高温期的气候特征及其变化规律. 地理学报, 2008, 63(3): 237-246.]
- [21] Liu Jianjun, Zheng Youfei, Wu Rongjun. Impacts of heat waves disaster on human health and its research method. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(1): 151-156. [刘建军, 郑有飞, 吴荣军. 热浪灾害对人体健康的影响及其方法研究. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 151-156.]
- [22] Tan Jianguo, Lu Chen, Chen Zhenghong. *Heat Waves and Human Health*. Beijing: China Meteorological Press, 2009. [谈建国, 陆晨, 陈正洪. 高温热浪与人体健康. 北京: 气象出版社, 2009.]
- [23] Deng Zhenyong, Zhang Qiang, Xu Jinfang, et al. Comparative studies of the harm characteristic of hot-dry wind and high temperature heatwaves. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(8): 865-873. [邓振镛, 张强, 徐金芳, 等. 高温热浪与干热风的危害特征比较研究. 地球科学进展, 2009, 24(8): 865-873.]
- [24] Zhang Kehui, Li Zhengtao, Liu Jianfeng, et al. Temporal-spatial feature analysis on the high-temperature and heatwaves in Hebei and its influence on industry and transportation. *Geography and Geo-Information Science*, 2011, 27(6): 90-95. [张可慧, 李正涛, 刘剑锋, 等. 河北地区高温热浪时空特征及其工业、交通的影响研究. 地理与地理信息科学, 2011, 27(6): 90-95.]
- [25] Blumberg G, DPhil S M. Assessing the potential impact of heat waves in cities: Implications for hazard preparation and planning. *Procedia Economics and Finance*, 2014, 18: 727-735.
- [26] Chen K, Bi J, Chen J, et al. Influence of heat wave definitions to the added effect of heat waves on daily mortality in Nanjing, China. *Science of the Total Environment*, 2015, 506/507: 18-25.
- [27] Zuo J, Pullen S, Palmer J, et al. Impacts of heat waves and corresponding measures: A review. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 92: 1-12.
- [28] Zhao Lin, Wang Changke, Li Xudong, et al. Public perceptions of heat wave and its impacts and adaptation for different people groups in Hainan. *Journal of Arid Meteorology*, 2015, 33(2): 310-316. [赵琳, 王长科, 李旭东, 等. 海南省不同人群对高温热浪及其影响与适应的感知分析. 干旱气象, 2015, 33(2): 310-316.]
- [29] Xie Pan, Wang Yanglin, Liu Yanxu, et al. Incorporating social vulnerability to assess population health risk due to heat stress in China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1041-1051. [谢盼, 王仰麟, 刘炎序, 等. 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评价. 地理学报, 2015, 70(7): 1041-1051.]
- [30] Yin Zhan'e, Yin Jie, Zhang Xiaowei. Multi-scenario-based hazard analysis of high temperature extremes experienced in China during 1951-2010. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(3): 436-446.
- [31] He Shanfeng, Dai Efu, Ge Quansheng, et al. Pre-estimation of spatiotemporal pattern of extreme heat hazard in China. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19(2): 91-97. [贺山峰, 戴尔阜, 葛全胜, 等. 中国高温致灾危险性时空格局预估. 自然灾害学报, 2010, 19(2): 91-97.]
- [32] Dong Siyan, Xu Ying, Zhou Botao, et al. Projected risk of extreme heat in China based on CMIP5 models. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10(5): 365-369. [董思言, 徐影, 周波涛, 等. 基于 CMIP5 模式的中国地区未来高温灾害风险预估. 气候变化研究进展, 2014, 10(5): 365-369.]
- [33] Riahi K, Rao S, Krey V, et al. RCP 8.5: A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 2011, 109(1): 33-57.
- [34] Riahi K, Grübler A, Nakicenovic N. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under



- climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 2007, 74(7): 887-935.
- [35] Huang Zhuo, Chen Hui, Tian Hua. Research on the heat wave index. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(3):345-351. [黄卓, 陈辉, 田华. 高温热浪指标研究. *气象*, 2011, 37(3): 345-351.]
- [36] Jones B, O'Neill B C, McDaniel L, et al. Future population exposure to US heat extremes. *Nature Climate Change*, 2015, 5(7): 652-655.
- [37] National Meteorological Center. *Handbook of Meteorological Geographical Division in China*. Beijing: China Meteorological Press, 2006. [中国气象局国家气象中心. *中国气象地理区划手册*. 北京: 气象出版社, 2006.]

## Changes in population exposure to high temperature under a future scenario in China and its influencing factors

HUANG Dapeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>3</sup>, GAO Ge<sup>1,2</sup>

(1. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

3. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Population exposure to high temperature (extremely high temperature) is represented by the multiplication of the population in each grid cell and the projected mean annual number of hot days with daily maximum temperature above 35°C (40°C) for each corresponding grid cell. Based on daily maximum temperature data from 21 global climate models under the RCP8.5 scenario and population projection data under the A2r socio-economic scenario, population exposures for four future periods (2021-2040, 2041-2060, 2060-2081 and 2081-2100) in China were projected at the grid cell level. The ensemble mean method was used to calculate the annual number of hot days. The relative importance of population and climate as drivers of exposures was evaluated at the national level and the meteorological geographical division level. Compared with the population exposure for the 1981-2010 base period, population exposure to high temperature ( $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ) over China for four future periods will increase by 1.3, 2.0, 3.6 and 5.9 times respectively and population exposure to extremely high temperature ( $\geq 40^{\circ}\text{C}$ ) will increase by 2.0, 8.3, 24.2 and 82.7 times respectively. Population exposure to high temperature will increase significantly in Jianghuai region, Southwest China and Jiangnan region, especially in North China, Huanghuai region, South China, Jiangnan region. Population exposure to extremely high temperature will increase significantly in Southwest China and Jiangnan region, especially in North China, Huanghuai region, Jiangnan region and Jianghuai region. Climate factors are the most important driver of exposures for Huanghuai region, Jianghuai region, Jiangnan region, South China and Southwest China, followed by the interact effect of population and climate. At the national level, climate factor is also the most important driver, followed by the interact effect of population and climate. The contribution rate of climate to national-level projected change in exposure will decrease gradually from about 70% to about 60% and the contribution rate of concurrent changes in population and climate will increase gradually from about 20% to about 40% over the four future periods.

**Keywords:** future scenario; population exposure; high temperature; extremely high temperature; influencing factors; China