

东亚地区典型极端气候指标未来预估 及高温下人口暴露度研究

安洁 付博 李玮 彭思源 李本纲[†]

北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室 北京 100871; [†] 通信作者, Email: libengang@pku.edu.cn

摘要 基于地球系统模式、CMIP6(第六次全球耦合模式比较计划)温室气体排放和大气成分数据以及人口数据, 研究区域均温变化与极端气候指标变化之间的相关关系, 进而探讨9种SSPs(共享社会经济路径)-RCPs(典型浓度路径)情景下东亚3种极端气候指标的未来预估和区域高温下人口暴露度的变化及归因。结果表明: 1) 全球地表均温变化和区域极端气候指标具有稳健的相关关系, 可以用于区域极端气候指标的未来预估; 2) 与基准期1861—1880年相比, 未来数十年间东亚地区在5种情景(SSP2-4.5, SSP4-6.0, SSP3-LowNTCF, SSP3-7.0-Baseline和SSP5-8.5-Baseline)下面临持续增加的极端气候风险, 而空气污染物减排与控制措施可以显著地降低该风险, 不过, 气候对温室气体及气溶胶排放控制措施的响应具有一定的时间滞后效应, 为预防可能面临的极端气候事件风险, 减排及控制措施应提前布局和实施; 3) 东亚典型区域未来高温下的人口暴露度受气候因子和人口因子共同作用, 随时间动态变化且具有明显的区域差异, 多数情景下, 气候因子对区域高温下人口暴露度的影响逐渐减弱, 而人口因子的影响逐渐加强, 华南地区高温下的人口暴露度明显高于西南和华中地区, 其中气候因子的相对贡献比例也高于后两个地区。

关键词 东亚; 极端气候指标; SSPs(共享社会经济路径)-RCPs(典型浓度路径)情景; 极端高温; 人口暴露度

Future Prediction of Typical Extreme Climatic Indices and Population Exposure to High Temperature in East Asia

AN Jie, FU Bo, LI Wei, PENG Siyuan, LI Bengang[†]

College of Urban and Environmental Sciences, MOE Laboratory for Earth Surface Processes, Peking University, Beijing 100871; [†] Corresponding author, Email: libengang@pku.edu.cn

Abstract Based on the Earth System Model, greenhouse gas emissions and atmospheric composition of CMIP6 and population data, the correlation between the change of regional mean temperature and extreme climatic indices was studied. Three climatic indices over East Asia under nine SSPs-RCPs scenarios were predicted, and the variation and attribution of population exposure to high temperature were analyzed. The results indicate that 1) there is a robust correlation between the change of global mean temperature and regional extreme climatic indices, which can be used to predict the latter in the future. 2) East Asia will experience increasing risk of extreme climate event in the future decades under SSP2-4.5, SSP4-6.0, SSP3-LowNTCF, SSP3-7.0-Baseline and SSP5-8.5-Baseline scenarios. But taking mitigation measures in advance could reduce such risk significantly. 3) Future population exposure to high temperature of three typical regions of East Asia, which is affected by both climate and population factors, changes dynamically over time and regions. Under most scenarios, the effects of climate and population factors are gradually weakening and strengthening, respectively. The population exposure to high temperature of Southern China is significantly higher than that of Southwest and Central China, and the relative contribution of climate factors is also higher than that of these two regions.

Key words East Asia; extreme climatic indices; SSPs-RCPs; extreme high temperature; population exposure

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告^[1]指出, 19 世纪后期以来, 全球地表增温显著, 1880—2012 年全球地表均温约上升 0.85°C (0.65~1.06°C)。研究表明, 2013—2017 年成为有记录以来最暖的五年, 2017 年全球地表均温比工业化前高出约 1.1°C, 成为有气象观测记录以来最暖的 3 个年份之一^[2]。在全球变暖背景下, 以东亚为代表的区域高温热浪、低温冷害等区域极端天气和气候事件频发, 极端气候事件的频率和强度也显著增加, 严重地影响人类社会的生产生活和人体健康^[1]。极端高温和极端低温都会影响人群健康, 高温热浪更是人群死亡及相关疾病发生的重要因素^[3-5]。因此, 极端气候事件的未来预估及典型极端气候事件下人口暴露度的评估, 是当前备受关注的研究课题。

在全球升温背景下区域极端气候事件的未来预估中, 较为关键的是区域气候变化信号的识别和特定升温阈值下极端气候事件的预估方法^[6-7]。针对这一关键环节, 目前较为成熟的 4 种气候变化信号识别方法为排放或浓度情景法、基于全球温度响应的气候模式法、空间型标度法和全球升温时区域气候异常值提取法^[8]。Seneviratne 等^[9]综合这 4 种方法, 研究全球地表均温变化和全球气候变化间的经验响应关系, 并指出可以根据全球地表均温变化, 稳健且有效地预估某些极端气候指标。Wartenburger 等^[10]则采用类似的方法, 研究全球地表均温变化和 32 个区域极端气候指标变化之间响应的经验关系, 用于辅助不同区域极端气候指标的未来预估。Tebaldi 等^[11]发现, 全球地表均温变化会显著地影响区域尺度上极端气候事件的频次及强度。若全球增温从 1.5°C 变化至 2°C, 约 50% 的陆地区域持续高温日数每年将增加 20 天, 暖昼指数将增加 0.6 个标准差^[12]。研究表明, 在全球增温的背景下, 极端气候事件及其变化具有明显的区域差异, 全球干旱地区的极端降水事件增加幅度显著高于湿润地区^[13], 中国大部分地区极端降水指数显著增加^[14], 中国的区域均温增幅高于全球^[15], 较冷区域极端高温事件显著增加, 而较暖区域极端低温事件明显减少^[16]。因此, 针对特定的重要区域, 对区域极端气候事件进行未来预估, 具有重要的现实意义。

根据 IPCC《管理极端气候事件与灾害风险、推进气候变化适应特别报告》(SREX)^[17]的相关定义, 人口暴露度指区域人口受到可能不利影响的程

度, 通常用区域暴露人口密度(即灾害日数与对应暴露人口数的乘积)来表征^[18-20], 随时空尺度变化而改变。在区域极端气候事件频发背景下, 未来极端高温事件下的人口暴露度预测及归因分析成为研究热点。目前, 关于极端高温事件的定义多基于特定区域温度的绝对或相对阈值, 尚无统一的标准。Liu 等^[21]用高温热浪天数(日最高温连续 3 天>max(95 百分位值, 25°C)的天数)表征高温热浪事件, 用高温热浪天数与相应人口数的乘积表征高温热浪事件下的人口暴露度, 结果表明, 2100 年全球高温热浪事件下的人口暴露度在高排放情景下将增加近 30 倍, 其中气候因子是人口暴露度大幅增加的主要因素; 至 21 世纪末, 美国高温(日最高气温>35°C)下的人口暴露度将比历史时期增加 4~6 倍, 其中人口和气候变化的贡献相当^[18]; 与 1981—2010 年相比, 中国于 2021—2040 年、2041—2060 年、2061—2080 年和 2081—2100 年 4 个时段高温(日最高气温≥35°C)的人口暴露度将分别增加 1.3、2.0、3.6 和 5.0 倍, 其中华北、黄淮、华南和江南增幅最为显著, 而暴露度变化主要受气候因子主导^[22]; 陈曦等^[23]发现, 历史时期全球热浪事件(日平均湿球黑球温度超过 99 百分位值)下的人口暴露度(年均热浪天数乘以人口数)主要受人口分布主导, 而未来情景下中高纬度地区受气候变化主导, 热带地区的热浪人口暴露度演变趋势则是人口和气候变化共同作用的结果。

目前, 区域极端气候指标的未来预估多基于第五次全球耦合模式比较计划(The fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project, CMIP5)的 4 种典型浓度路径开展, 而高温人口暴露预测、评估及归因分析多采用全球或区域尺度的人口预测数据, 未考虑区域经济发展的独特性。第六次全球耦合模式比较计划(The sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project, CMIP6)构建了 9 个由共享社会经济路径(The Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)与未来气候辐射强迫情景(用典型浓度路径表征, The Representative Concentration Pathways, RCPs)组合的情景矩阵 SSPs-RCPs, 比 CMIP5 具有更强的针对性和合理性^[24]。不同的极端气候指标随社会经济-排放情景不同而动态地变化, 与此同时, 极端气候事件下的人口暴露度预测与评估又受气候变化和社会经济发展的共同影响^[25]。因此, 基于 CMIP6 构建的最新情景, 对区域极端气候指标进

行多情景、多时段和多指标的动态预估,并以此为核心,研究极端高温下的人口暴露度变化及其归因,是亟待解决的科学问题和现实课题。

本研究以 Seneviratne 等^[9]和 Wartenburger 等^[10]关于全球地表均温变化对全球典型极端气候指标变化响应的稳健的经验关系为逻辑基础,采用 CMIP6 最新的温室气体排放和大气成分数据以及最新的 SSPs-RCPs 情景数据,对东亚地区典型极端气候指标进行未来预估,并进一步探讨典型区域高温下人口暴露度的动态变化及其归因。

1 数据和方法

1.1 研究区域

本文以 IPCC SREX^[17]定义的东亚地区为研究区域,地理坐标范围为 100°E—145°E, 20°N—50°N,包括亚洲东部和中部地区。该区域气候类型多样,人口密集,容易受极端气候影响,是理想的研究区域。对未来极端高温下人口暴露度进行预测与评估时,将东亚划分为 5×5 个子区,每个子区的大小为 9°×6°,空间范围和基本信息见表 1。其中,第 2, 6 和 7 子区,由于人口总量大,受高温影响严重,被选定为高温下人口暴露度预测与评估研究区域,并标识为区域 A, B 和 C,基本信息见表 2。

表 1 东亚 25 个子区的基本信息
Table 1 Basic information of 25 sub-regions in East Asia

经度(E)	纬度(N)				
	20°—26°	26°—32°	32°—38°	38°—44°	44°—50°
100°—109°	1 中国西南地区 中南部	2 中国西南地区 中北部	3 中国西北地区 东南部	4 中国西北地区 东北部	5 蒙古国东部
109°—118°	6 中国华南地区	7 中国华中大部分、 华东西部	8 中国华北地区	9 中国京津冀北部、 内蒙古中部	10 中国内蒙古东北部 西侧
118°—127°	11 中国台湾、福建 少部分	12 中国华东中部	13 中国华东西北部 及山东东部	14 中国辽宁和吉林大部 分,内蒙古西南部	15 中国内蒙古东北部
127°—136°	16 中国东海、太平洋 西北部	17 中国东海、太平 洋及部分岛国	18 韩国,朝鲜南部、 日本西南部	19 中国吉林东部少许	20 中国黑龙江东部
136°—145°	21 太平洋	22 太平洋、日本小 笠原诸岛	23 日本中部	24 日本北部	25 日本北部少部分, 俄罗斯东南部

表 2 研究区域 A, B 和 C 的基本信息
Table 2 Basic information of study region A, B and C

区域编号	地理坐标范围	主要省市
A	100°E—109°E, 26°N—32°N	西南地区的中北部, 包括四川省、贵州省、重庆市的大部分地区和云南北部部分地区(丽江、昭通)
B	109°E—118°E, 20°N—26°N	华南地区大部分, 包括广东省、广西西部(桂林、柳州、贺州、北海、玉林), 湖南省郴州市、江西省赣州市, 福建南部(漳州市、龙岩市等)
C	109°E—118°E, 26°N—32°N	华中中南部和华东西部, 包括湖南省、湖北省、江西省大部分和安徽省中南部地区

1.2 社会经济-气候情景

CMIP6 第 18 子计划是情景模式比较计划(ScenarioMIP)^[24], 该计划基于不同的共享社会经济路径及其可能产生的能源结构、人为排放和土地利用变化,采用 6 个综合评估模型(integrated assessment models, IAMs),设计 9 种情景预估试验,包括一级(Tier-1)和二级(Tier-2)两种试验优先级以及“基准”和“减缓”两类情景类型。这 9 种情景既包括未来的社会经济情景(SSPs),也包括未来全球的气候情景(RCPs),用于未来预估(表 3)。

1.3 数据和模型

从极端气候检测和指数专家组(Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI)^[26]定义的 27 个极端气候指标中,选取包括温度极值和温度相对阈值在内的 3 个极端气候指标(表 4),进行东亚地区极端气候预估。

全球地表均温和区域极端气候指标数据来源于干热气候区域地图集(<http://www.drought-heat.ethz.ch/atlas/>)^[10]。共提取 1861—2099 年全球地表均温、东亚地表均温和东亚 3 种典型极端气候指标数据,包括全球 26 个模式第 1 个集合成员(r1i1p1)的模拟结果,基准期为 1861—1880 年,空间分辨率为 2.5°×2.5°。未来排放情景为 RCP8.5 高排放情景,

表 3 CMIP6 的 9 种情景
Table 3 Nine scenarios of CMIP6

情景名称	SSP	2100 年辐射强迫目标/(W·m ⁻²)	情景类型	试验级别
SSP1-1.9	1	1.9	减缓	Tier-2
SSP1-2.6	1	2.6	减缓	Tier-1
SSP2-4.5	2	4.5	减缓	Tier-1
SSP3-7.0-Baseline	3	7.0	基准	Tier-1
SSP3-LowNTCF	3	6.3	减缓	Tier-2
SSP4-3.4	4	3.4	减缓	Tier-2
SSP4-6.0	4	6.0	减缓	Tier-2
SSP5-3.4-OS	5	3.4	减缓	Tier-2
SSP5-8.5-Baseline	5	8.5	基准	Tier-1

表 4 本研究选取的 3 个极端气候指标
Table 4 Three extreme climatic indices in this study

简称	全称	定义	单位
txx	日最高温最大值	每年日最高温度的最大值	℃
tn90p	暖夜指数	每年日最低温>90%分位值的日数百分比	%
tx90p	暖日指数	每年日最高温>90%分位值的日数百分比	%

该情景下 2100 年全球辐射强迫升至 8.5 W/m²。

人口数据使用姜彤等^[27]和王艳君等^[28]构建的 SSPs 人口经济数据集。该数据集综合考虑了中国各地区经济发展不平衡、全面二孩政策实施以及城市化与户籍约束等对人口的影响,涵盖未来 5 种 SSPs 下的中国人口网格数据,时间为 2010—2100 年,空间分辨率为 0.5°×0.5°。

地球系统模式为 OSCAR^[29],包含地球系统模拟的所有重要组件,如海洋和陆地碳循环、土地利用变化(模拟大气二氧化碳的变化)、对流层化学和天然湿地排放(甲烷)、N₂O 的平流层化学反应、37 种卤代化合物、对流层和平流层臭氧、气溶胶的直接和间接效应、地表反照率的变化(黑炭对积雪的沉降、土地覆被变化)以及温度和降水的响应(全球和区域)。

1.4 研究方法

1.4.1 最小二乘法拟合及拟合优度检验

采用 MatlabR2018a 软件和最小二乘法,拟合全球地表均温和极端气候指标相对于基准期的变化值之间的关系函数,假设关系函数的形式包括一元线性回归模型和过原点的类指数型函数。根据均方根误差和可决系数来检验拟合优度,确定最优拟合

函数。

1.4.2 未来极端高温下人口暴露度评估及归因分析

区域极端气候事件研究中,常用百分位法确定极端高温的阈值。本研究将区域高温天数定义为日最高温大于 90 百分位数的天数(即暖日天数),参考文献[17,21]的定义,用高温天数与暴露在此温度范围的人口数的乘积来表征高温下的人口暴露度,单位为天×人/年,计算公式为

$$\text{Expo} = T \cdot P = \text{tx90p} \times 365 \times \text{pop}, \quad (1)$$

其中, T 和 P 分别为高温天数和人口数量, tx90p 为日最高温大于 90 百分位数的天数百分比, pop 为区域人口。

对研究区高温下人口暴露度变化进行归因分析时,针对未来的 2021—2040 年、2041—2060 年、2061—2080 年和 2081—2100 年 4 个时段,分别计算后一时段相比于前一时段气候因子、人口因子及暴露度的变化。其中,高温下人口暴露度变化计算公式^[21-22]如下:

$$\begin{aligned} \Delta \text{Expo} &= (\Delta T + T) \cdot (\Delta P + P) - T \cdot P \\ &= \Delta T \cdot P + \Delta P \cdot T + \Delta T \cdot \Delta P, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\Delta T \cdot P$ 为气候因子的影响, $\Delta P \cdot T$ 为人口因子的影响, $\Delta T \cdot \Delta P$ 为气候-人口因子的综合作用。各影响因子的相对贡献率则由本文改进后的式(3)~(5)计算。气候因子相对贡献率:

$$C_T = \frac{\Delta T \cdot P}{|\Delta T \cdot P| + |\Delta P \cdot T| + |\Delta T \cdot \Delta P|}; \quad (3)$$

人口因子相对贡献率:

$$C_P = \frac{\Delta P \cdot T}{|\Delta T \cdot P| + |\Delta P \cdot T| + |\Delta T \cdot \Delta P|}; \quad (4)$$

气候-人口综合因子相对贡献率:

$$C_{T-P} = \frac{\Delta T \cdot \Delta P}{|\Delta T \cdot P| + |\Delta P \cdot T| + |\Delta T \cdot \Delta P|}. \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 均温变化与区域极端气候指标变化的关系

由 1861—2099 年全球地表均温变化(ΔGst)和东亚 3 种极端气候指标变化的散点图及关系函数图(图 1)可以看出,东亚年极端最高温变化(Δtxx)和暖日、暖夜指数变化(Δtx90p , Δtn90p)均随全球地表均温变化的升高而显著增加。东亚 3 种极端气候指标变化与全球地表均温变化间有较好的拟合基础。

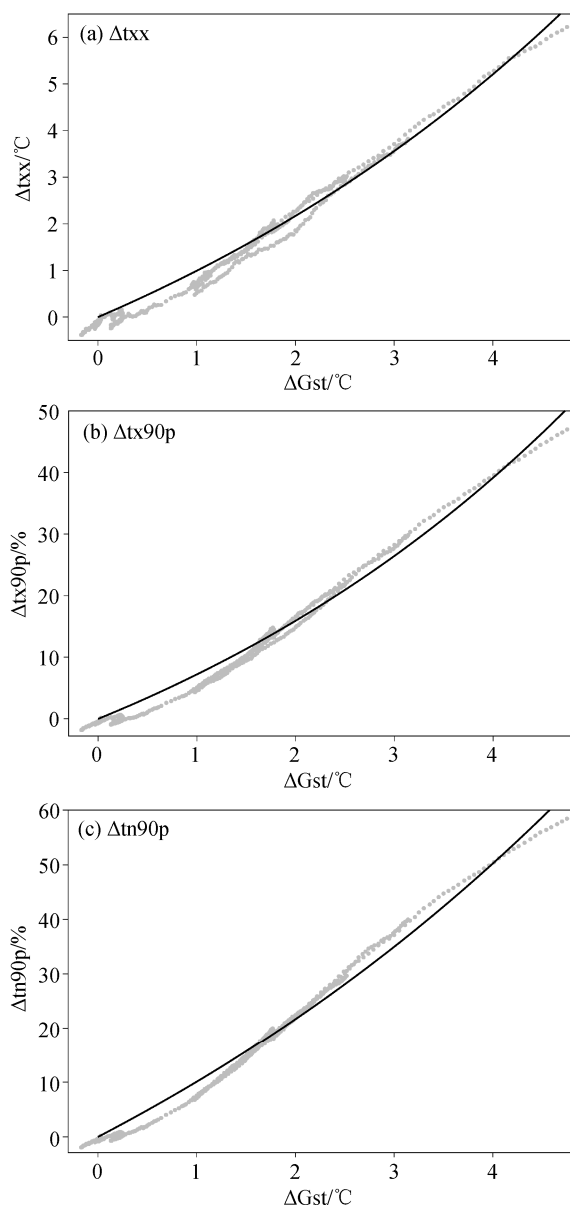


图 1 1861—2099 年全球地表均温变化与东亚极端气候指标变化的散点及关系函数图 (基准期为 1861—1880 年)

Fig. 1 Scatter plot and fitting curves of the change of global mean temperature and extreme climatic indices over East Asia from 1861–2099 (the baseline period is 1861–1880)

表 5 全球地表均温变化与东亚极端气候指标变化的关系函数及拟合优度

Table 5 Fitting function and goodness of fit between the change of global mean surface temperature and extreme climatic indices over East Asia

极端气候指标	拟合函数	R^2	RMSE
Δt_{xx} (°C)	$y = 5.415 \times e^{0.1684x} - 5.415$	0.9870	0.2187
Δt_{x90p} (%)	$y = 34.8 \times e^{0.1884x} - 34.8$	0.9945	1.0709
Δt_{n90p} (%)	$y = 67.6 \times e^{0.1389x} - 67.6$	0.9888	1.9410

由表 5 可以看出, 全球地表均温变化与东亚极端气候指标变化的关系函数稳健, 且能用于未来预估。与基准期 1861—1880 年相比, 当全球升温达 1.5°C 和 2°C 时, 东亚 t_{xx} , t_{x90p} 和 t_{n90p} 分别比基准期增加 1.56°C、11.36% (约 41 天)、15.66% (约 57 天) 和 2.17°C、15.92% (约 58 天)、21.65% (约 79 天)。

基于区域地表均温变化与极端气候指标变化之间具有稳健的关系函数这一逻辑基础, 建立东亚地表均温变化与 3 个东亚子区域 A, B, C 暖日指数 t_{x90p} 的关系函数, 如表 6 所示。可以看出, 区域 A, B 和 C 的暖日指数均随东亚均温上升而显著增加, 区域 B (华南) 的增速显著快于区域 A (西南) 和区域 C (华中)。当东亚均温比基准期 (1861—1880 年) 上升 0.5°C 时, 区域 A, B 和 C 的 t_{x90p} 分别增加 2.30%, 5.03% 和 2.21%, 即每年分别增加 8, 18 和 8 天; 当均温上升 1.0°C 时, 3 个区域的 t_{x90p} 分别增加 4.46%, 9.28% 和 4.21%, 即每年分别增加 16, 34 和 15 天, 届时区域人口将面临较严重的高温暴露风险。

2.2 未来 9 种 SSPs-RCPs 情景下东亚极端气候指标的变化

采用地球系统模式 OSCAR 模型输出的全球地表均温变化的未来时间序列, 由表 5 中全球地表均温变化与东亚 3 种极端气候指标变化 (Δt_{xx} , Δt_{x90p} 和 Δt_{n90p}) 的关系函数, 得到东亚地区 3 种极端气候指标的变化在 9 种 SSPs-RCPs 情景下的未来 (2010—2100 年) 时间序列, 如图 2 所示。可以看出, 与基准期 1861—1880 年相比, 2010—2100 年东亚地区 Δt_{xx} , Δt_{x90p} 和 Δt_{n90p} 在 SSP2-4.5, SSP4-6.0, SSP3-LowNTCF, SSP3-7.0-Baseline 和 SSP5-8.5-Baseline 这 5 种情景下呈显著上升趋势, 且增幅依次变大; 在 SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP4-3.4 和 SSP5-3.4-OS 这 4 种情景下, 3 种极端气候指标先增后降, 峰值出现时间分别为 2040, 2076, 2079 和 2058 年。其中, 与基准期 1861—1880 年相比, 2100 年低排放情景 SSP1-

表 6 东亚均温变化与区域 A, B, C 暖日指数变化的关系函数
Table 6 Regression equation between the change of East Asia mean temperature and t_{x90p} of region A, B and C

区域编号	回归方程	R^2
A	$y = 4.33x + 0.13$	0.7220**
B	$y = 8.50x + 0.78$	0.8149**
C	$y = 4.00x + 0.21$	0.6726**

说明: 回归方程中, y 为暖日指数 t_{x90p} 变化 (%), x 为东亚均温变化 (°C); ** 表示通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验。

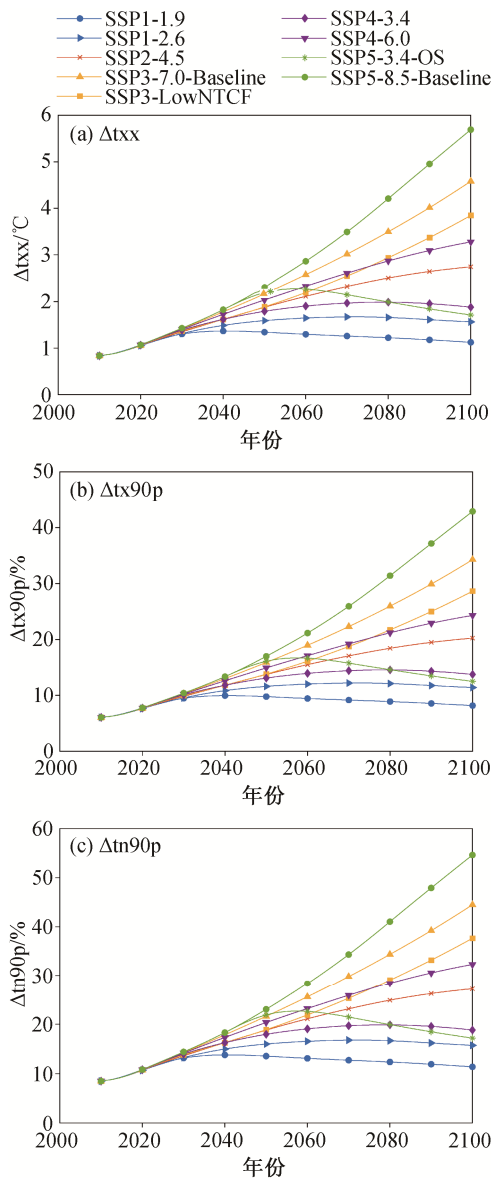


图2 2010—2100年9种SSPs-RCPs情景下东亚极端高温与暖日、夜指数变化时间序列(基准期为1861—1880年)

Fig. 2 Changes of txx, tx90p and tn90p relative to 1861–1880 in East Asia under nine SSPs-RCPs scenarios from 2010 to 2100

1.9下txx, tx90p和tn90p分别增加1.12°C, 8.17%(约30天)和11.37%(约42天), 而高排放情景SSP5-8.5-Baseline下分别增加5.69°C, 42.92%(约157天)和54.64%(约199天)。东亚地区在未来数十年间将面临持续增加的高温相关极端气候事件风险。

值得注意的是, SSP5-3.4-OS和SSP5-8.5-Baseline情景在2040年之前的设计完全相同, 不同的是SSP5-3.4-OS情景自2040年起开始采取减缓政策。由图2可见, 在SSP5-3.4-OS情景下, 2058年极端气

候指标开始从峰值下降, 且趋势明显。气候对温室气体及气溶胶排放控制措施的响应具有一定的时间滞后效应, 为预防可能面临的极端气候事件风险, 减排及控制措施应提前布局和实施。

2.3 东亚典型区域未来极端高温下的人口暴露度

基于表6的东亚均温变化与区域A、B和C暖日指数变化关系函数, 结合区域人口数据, 可以预估9种SSPs-RCPs情景下3个典型区域2010—2100年高温下的人口暴露度, 如图3所示。可以看出, 区

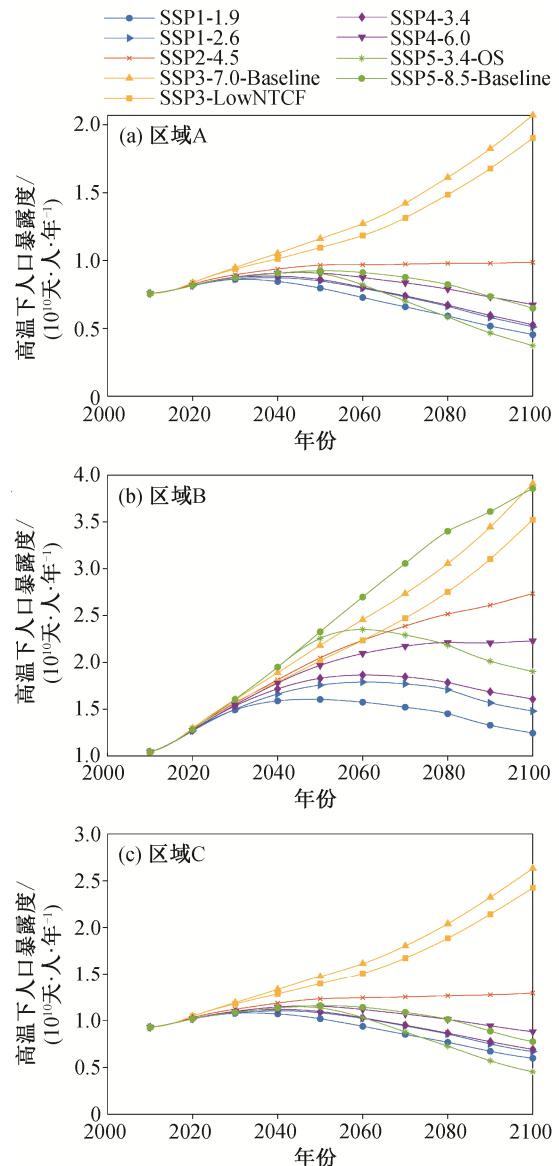


图3 2010—2100年9种情景下区域A、B和C高温下的人口暴露度

Fig. 3 Population exposure to high temperature under nine scenarios in region A, B and C from 2010 to 2100

域 A、B 和 C 未来高温下的人口暴露度受不同社会经济-气候情景影响,且区域差异显著。其中,区域 A(西南)和区域 C(华中)高温下人口暴露度的变化特征相似,SSP3-7.0-Baseline 和 SSP3-LowNTCF 情景下最高,且呈持续上升趋势。SSP2-4.5 情景下这两个区域人口暴露度短暂上升后即趋于稳定。在其余 6 种情景(SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP4-3.4, SSP4-6.0,

SSP5-3.4-OS 和 SSP5-8.5-Baseline)下均呈现上升后逐年下降的趋势。至 2100 年, A 和 C 两个区域的人口暴露度将分别达到 $(0.37\sim 2.07)\times 10^{10}$ 和 $(0.45\sim 2.63)\times 10^{10}$ 天·人/年。区域 B(华南)的人口暴露度变化特征则与上述两个区域明显不同,在 5 种情景(SSP4-6.0, SSP2-4.5, SSP3-LowNTCF, SSP3-7.0-Baseline 和 SSP5-8.5-Baseline)下呈持续上升趋势,在 4 种情

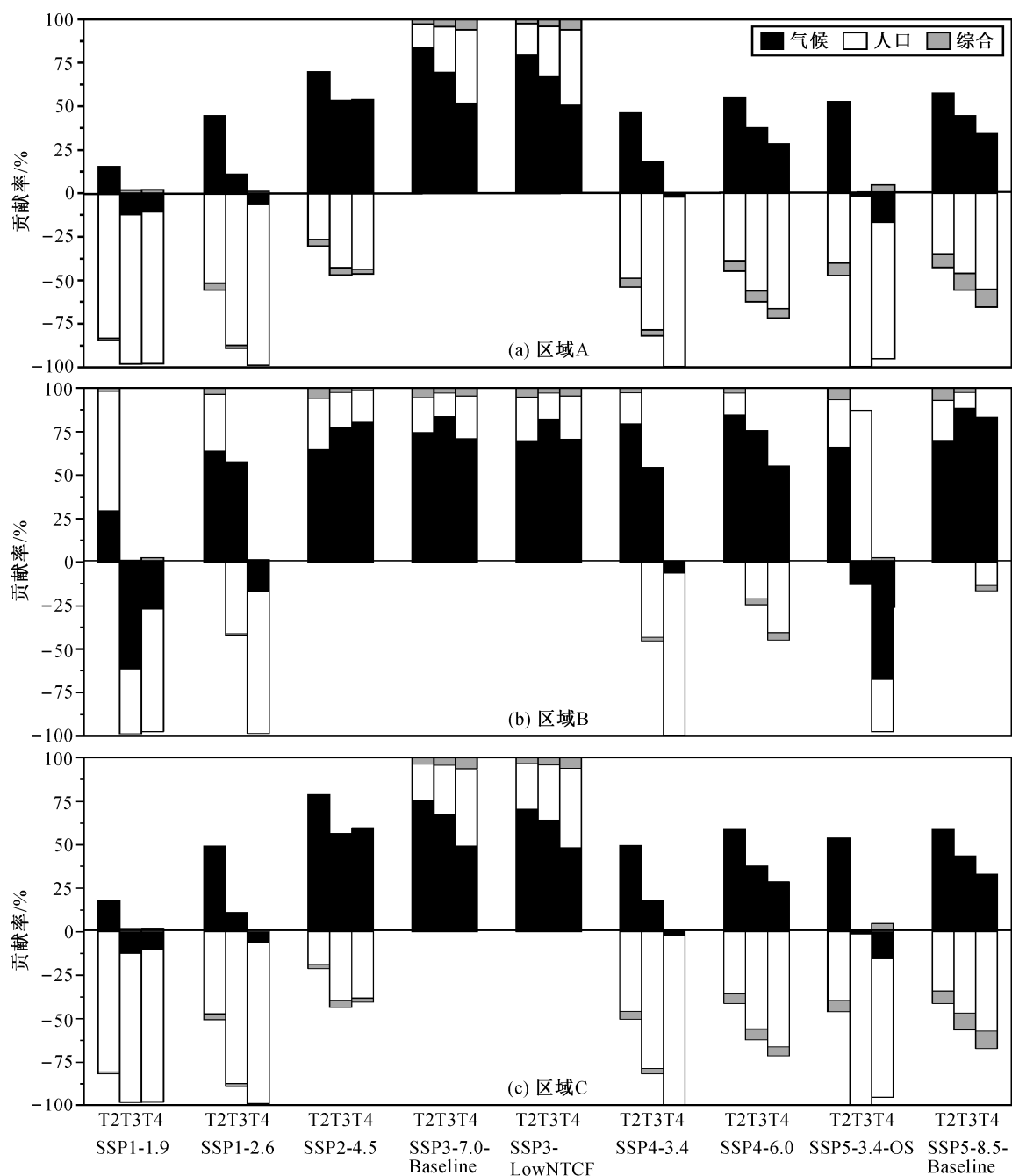


图 4 2041—2100 年 9 种情景下区域 A、B 和 C 高温下人口暴露度变化的影响因子贡献率
Fig. 4 Contribution rates of influencing factors of exposure changes of high-temperature population under nine scenarios of region A, B and C from 2041 to 2100

景(SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP4-3.4和SSP5-3.4-OS)下先上升后逐年下降。以SSP5-8.5-Baseline情景下的人口暴露度为最高。至2100年,区域B高温下的人口暴露度可达 $(1.24\sim 3.91)\times 10^{10}$ 天·人/年,明显高于区域A和C。

对未来不同情景下区域A、B和C在高温下人口暴露度进行归因分析发现,总体而言,相较于前一时段,T2时段(2041—2060年)、T3时段(2061—2080年)和T4时段(2081—2100年)高温下人口暴露度受气候-人口综合因子影响较小,受气候和人口因子分别影响较大。3种因子的相对贡献率因区域、情景和时段各异(图4)。

可以看出,区域A(图4(a))和区域C(图4(c))中各影响因子的相对贡献特征较为相似,SSP2-4.5, SSP3-7.0-Baseline和SSP3-LowNTCF情景下由气候因子主导,且贡献为正,说明这3种情景下区域气候变化是导致高温下人口暴露度增加的主要原因。在SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP4-3.4和SSP5-3.4-OS这4种情景下,区域A和C高温下人口暴露度的变化则主要受区域内人口波动(人口减少,贡献率为负)的影响。在SSP4-6.0和SSP5-8.5-Baseline情景下,气候因子影响强度逐渐减弱,但贡献仍为正,人口因子影响强度增强,且贡献率均为负,即随时间推移,气候变暖和人口减少,这两个区域高温下人口暴露度变化由气候因子主导逐渐向人口因子主导转变。

区域B(图4(b))的情况明显有别于区域A和C。在SSP2-4.5, SSP3-7.0-Baseline, SSP3-LowNTCF, SSP4-6.0和SSP5-8.5-Baseline这5种情景下,气候因子始终占据主导地位。SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP4-3.4和SSP5-3.4-OS这4种情景下,气候因子和人口因子的主导地位动态地变化,其中SSP1-2.6和SSP4-3.4情景下逐渐由气候因子主导过渡为人口因子主导。

3 结论

本研究结合CMIP6温室气体排放与大气成分和人口数据,建立区域均温变化与极端气候指标变化之间的稳健相关关系。在此基础上,结合地球气候模式,探讨9种SSPs-RCPs情景下东亚地区3种极端气候指标的未来变化趋势,进而评估3个典型区域高温下的人口暴露度及其变化归因,得到如下结果。

1) 全球地表均温变化与区域极端气候指标具有稳健的相关关系,可用于区域极端气候指标的未來预估。

2) 与基准期1861—1880年相比,未来数十年间东亚地区在5种情景(SSP2-4.5, SSP4-6.0, SSP3-LowNTCF, SSP3-7.0-Baseline和SSP5-8.5-Baseline)下面临持续增加的极端气候风险,大气污染物减排与控制措施可以显著地降低该风险。由于气候对温室气体及气溶胶排放控制措施的响应具有一定的时间滞后效应,为预防可能面临的极端气候事件风险,减排及控制措施应提前布局和实施。

3) 东亚典型区域未来高温下人口暴露度的变化受气候因子和人口因子共同作用,随时间动态地变化,且具有明显的区域差异。多数情景下,气候因子对区域高温下人口暴露度的影响逐渐减弱,而人口因子的影响逐渐加强。华南地区高温下人口暴露度明显高于西南和华中地区,其气候因子的相对贡献率也高于后两个地区。

目前的高温下人口暴露度预估是基于现有的人口预测数据,气候变化在一定程度上依赖于人口变化和其他因素,未来人口、医疗和社会保障政策的逐步完善可能会影响区域人口的走势,进而影响空气污染物排放及全球气候,因此相关研究需要持续跟进。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. New York: Cambridge University Press, 2014
- [2] 秦大河. 气候变化科学概论. 北京: 科学出版社, 2018
- [3] 兰莉, 王建, 崔国权, 等. 热浪健康风险预警系统构建与应用. 中国公共卫生, 2014, 30(6): 849-850
- [4] 刘方, 张金良. 气象因素对人类健康的影响. 中国公共卫生, 2005, 21(3): 115-117
- [5] 赵金琦, 金银龙. 气候变化对人类环境与健康影响. 环境与健康杂志, 2010, 27(5): 462-465
- [6] Jiang Dabang, Sui Yue, Lang Xianmei. Timing and associated climate change of a 2°C global warming. International Journal of Climatology, 2016, 36(14): 4512-4522
- [7] 徐影, 周波涛, 吴婕, 等. 1.5~4°C升温阈值下亚洲地区气候变化预估. 气候变化研究进展, 2017, 13(4): 306-315
- [8] James R, Washington R, Schleussner C, et al.

- Characterizing half-a-degree difference: a review of methods for identifying regional climate responses to global warming targets. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate Change*, 2017, 8(2): 1–17
- [9] Seneviratne S I, Donat M G, Pitman A J, et al. Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets. *Nature*, 2016, 529: 477–483
- [10] Wartenburger R, Hirschi M, Donat M G, et al. Changes in regional climate extremes as a function of global mean temperature: an interactive plotting framework. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(9): 3609–3634
- [11] Tebaldi C, O'Neill B, Lamarque J. Sensitivity of regional climate to global temperature and forcing. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(7): 74001
- [12] Schleussner C, Lissner T K, Fischer E M, et al. Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: the case of 1.5°C and 2°C. *Earth System Dynamics*, 2016, 7(2): 327–351
- [13] Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 2016, 6(5): 508–513
- [14] Jiang Zhihong, Li Wei, Xu Jianjun, et al. Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. Part I: model evaluation. *Journal of Climate*, 2015, 28(21): 8603–8619
- [15] 陈晓晨, 徐影, 姚遥. 不同升温阈值下中国地区极端气候事件变化预估. *大气科学*, 2015, 39(6): 1123–1135
- [16] 李林超. 极端气温、降水和干旱事件的时空演变规律及其多模式预测[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019
- [17] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Cambridge: Cambridge University Press, 2012
- [18] 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
- [19] 刘伟霞. 不同升温情景下长江流域极端降水事件及人口暴露度研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018
- [20] 占明锦. 全球升温背景下高温对城市能源消耗和人体健康的影响研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2018
- [21] 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. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 43909
- [22] 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. *地理学报*, 2016, 71(7): 1189–1200
- [23] 陈曦, 李宁, 张正涛, 等. 全球热浪人口暴露度预估——基于热应力指数[J/OL]. *气候变化研究进展*, 2020: 1–12 [2020-01-14]. <http://www.climatechange.cn/CN/abstract/abstract1242.shtml#AbstractTab>
- [24] Gidden M J, Riahi K, Smith S J, et al. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(4): 1443–1475
- [25] Jones B, Tebaldi C, O'Neill B C, et al. Avoiding population exposure to heat-related extremes: demographic change vs climate change. *Climatic Change*, 2018, 146(3): 423–437
- [26] Sillmann J, Kharin V V, Zwiers F W, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(6): 2473–2493
- [27] 姜彤, 赵晶, 景丞, 等. IPCC 共享社会经济路径下中国和分省人口变化预估. *气候变化研究进展*, 2017, 13(2): 128–137
- [28] 王艳君, 景丞, 曹丽格, 等. 全球升温控制在 1.5°C 和 2.0°C 时中国分省人口格局. *气候变化研究进展*, 2017, 13(4): 327–336
- [29] Gasser T, Ciais P, Boucher O, et al. The compact Earth system model OSCAR v2.2: description and first results. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(1): 271–319