“一带一路”沿线区域21世纪极端高温热浪风险预估

王芳^{1*}, 张晋韬^{1,2}, 葛全胜¹, 郝志新¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101;

2. 复旦大学大气与海洋科学系, 上海 200438

* 联系人, E-mail: wangf@igsnrr.ac.cn

2020-09-15 收稿, 2020-12-15 修回, 2020-12-16 接受, 2021-02-08 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFA0602704, 2019YFC0507805)、中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA20020202)和国家自然科学基金(41771050)资助

摘要 极端高温热浪可能对社会经济和自然生态系统产生多方面的影响, 全球增暖背景下增多的高温热浪相关灾害威胁到“一带一路”沿线这一气候类型复杂、且经济基础薄弱区域的可持续发展。在高温高湿环境下, 人体健康面临更大威胁, 与传统研究仅考虑温度这一变量相比, 考虑温度-湿度的综合作用可以更好地解释人体在高温环境下的热负荷, 进而更好地衡量高温热浪事件的强度特征。因此本研究基于ISI-MIP全球气候模式模拟试验和NCAR-CIDR人口预估数据集, 以一个反映温度-湿度协同效应的热浪指数表征极端高温的健康风险, 对21世纪该区域不同风险等级高温热浪的发生频率及人口暴露度的变化进行了预估。结果表明, 在未来温度-湿度变化综合影响下, “一带一路”沿线大部分区域的高温热浪强度和频次呈现不同程度的增加趋势, 在两种典型气候-社会经济情景(SSP2-4.5和SSP3-8.5)下, 到21世纪末全区各等级极端高温热浪的人口暴露度总和将增加至基准时段(1986~2005年)的2.0和3.3倍, 且越高风险等级(对人体健康影响越大)的高温热浪出现频次及其人口暴露度的相对增加越突出。极端高温热浪及其人口暴露度最突出的增加出现在低纬度的南亚和东南亚地区, 对这些区域发展中国家的大量人口构成潜在威胁。总体上气候因素对人口暴露度增加的贡献最大, 但气候/人口因素的相对贡献大小存在明显的区域差异。

关键词 极端高温, 热浪指数, 一带一路, 暴露度, 气候变化

极端高温热浪可能对人类活动和自然生态系统产生多方面的影响, 例如威胁人体健康、降低劳动者的生产率、破坏公共设施和降低作物产量^[1-3]。在全球增暖的背景下, 多个区域观测到的极端高温热浪呈显著增加趋势, 且这种增加可归因于工业革命以来人类活动排放的大量温室气体^[4-7]。全球增暖背景下极端高温及其相关灾害风险的变化是当前气候变化领域的研究热点, 已发表的大量预估研究表明, 未来将会出现更加频繁、持久和强烈的极端高温热浪事件^[8-10]。对未来情景下区域极端高温灾害风险进行准确预估, 既是重要的科学问题, 也易引发决策者和公众的关注。

绝大多数高温热浪相关研究均着眼于近地表气温这一变量, 但仅靠这个变量不能准确反映环境对于人体的舒适度^[11,12]。在高温环境下人体主要通过流汗驱散自身热负荷, 如果此时周围环境湿度较高, 人体的散热能力将会下降, 严重者可导致相关疾病发生甚至死亡率上升。因此, 从环境对于人体舒适度的影响出发, 在与极端高温热浪风险相关研究中考虑温度和湿度的协同效应具有重要意义, 也是当前气候变化预估研究中的前沿和热点^[13-18]。此外, 为探讨高温热浪事件对未来社会经济的潜在影响, 有必要开展高温热浪灾害风险的量化评估, 而暴露度是气候变化风险评估中的

引用格式: 王芳, 张晋韬, 葛全胜, 等. “一带一路”沿线区域21世纪极端高温热浪风险预估. 科学通报, 2021, 66: 3045-3058

Wang F, Zhang J T, Ge Q S, et al. Projected changes in risk of heat waves throughout Belt and Road Region in the 21st century (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3045-3058, doi: 10.1360/TB-2020-1171

核心概念^[19]。针对这一科学问题,近年来有研究预估了21世纪气候-社会经济变化情景下全球人口对极端高温事件的暴露度^[20-22],但这些研究通常仅单独考虑了温度的作用,有可能低估了未来情景下极端热浪变化对“一带一路”沿线部分区域人口的威胁。

2013年,中国国家主席习近平提出的建设“一带一路”(“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”的简称)倡议绘制了中国与沿线国家协同发展的宏伟蓝图,具有重大战略意义。“一带一路”区域横跨亚洲、欧洲、非洲,拥有近40亿人口,且区内气候类型复杂多样。“一带一路”沿线各国大多数都是发展中国家,经济基础薄弱,对气候变化,尤其是对极端天气气候事件的变化,具有较高的脆弱性,极端事件很可能对这些国家造成严重的经济和社会影响。因此,该区域极端高温热浪事件及其相关风险的定量化评估亟待开展^[23,24]。近期有少数“一带一路”区域未来气候变化相关风险的研究成果发表^[25-27],但目前尚无着眼于该区域温度-湿度协同“复合型”高温热浪风险的系统性研究,未来气候-社会经济情景下“一带一路”沿线区域极端高温热浪及其影响的准确预估仍是尚待解决的科学问题。

本研究基于气候变化多部门影响模型比较计划(Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, ISI-MIP)第二阶段提供的最新全球气候模式(global climate model, GCM)模拟结果,采用考虑温度-湿度协同效应、可以表征人体健康风险的热浪指数,预估了21世纪“一带一路”沿线区域两种典型气候-社会经济情景下不同风险等级极端高温热浪的发生频率及其人口暴

露度变化,辨识未来情景下极端高温热浪影响的高风险区,并揭示气候和人口变化因素对极端高温热浪的人口暴露度变化的相对贡献大小。本研究结果可为“一带一路”沿线各国适应气候变化、防灾减灾的政策设计提供科学参考。

1 数据和方法

1.1 研究区域

本研究区为“一带一路”沿线的65个国家的陆地区域。吴绍洪等人^[26]按照生态地理地域系统划分的基本依据和原则将“一带一路”陆域划分为9个子区域(表1、图1(a)),本研究也将采用这一分区方案。

1.2 气候模式数据

本研究采用了ISI-MIP第2阶段提供的4个GCM(表2)的最新模拟试验结果,包括历史和未来预估模拟,其中历史模拟(即historical试验)的时间段为1861~2005年,未来预估模拟的时间段为2006~2099年。本研究使用了其中的日平均近地表气温和相对湿度两个变量的结果。这4个GCM都参加了耦合模式比较计划第5阶段(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)^[28],按照CMIP5的试验框架,未来预估模拟在4个典型浓度路径(representative concentration pathway, RCP)下进行,代表了4种不同的未来气候变化情景,其中最主要的差异是温室气体排放量^[29]。本研究分析其中两个有代表性的情景:RCP8.5(无政策干预时的高排

表1 “一带一路”沿线国家的分区

Table 1 Subregions of countries along the Belt and Road

分区	国家(地区)
中东欧寒冷湿润区(CEE)	波兰、捷克、斯洛伐克、匈牙利、斯洛文尼亚、克罗地亚、罗马尼亚、保加利亚、塞尔维亚、黑山、马其顿、波黑、阿尔巴尼亚、爱沙尼亚、立陶宛、拉脱维亚、乌克兰、白俄罗斯、摩尔多瓦、俄罗斯(欧洲部分)
北亚寒冷干旱区(NA)	蒙古、俄罗斯(亚洲部分)
中亚西亚干旱区(CWA)	哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、阿富汗、土耳其、伊朗、叙利亚、伊拉克、阿联酋、沙特阿拉伯、卡塔尔、巴林、科威特、黎巴嫩、阿曼、也门、约旦、以色列、巴勒斯坦、亚美尼亚、格鲁吉亚、阿塞拜疆、埃及
东南亚温暖湿润区(SEA)	越南、老挝、柬埔寨、泰国、马来西亚、新加坡、印度尼西亚、文莱、菲律宾、东帝汶
巴基斯坦干旱区(PAK)	巴基斯坦
南亚温暖湿润区(SA)	孟加拉国、印度、缅甸、斯里兰卡、马尔代夫
中国东部季风区(CNE)	中国湿润半湿润地区
中国西北干旱区(CNW)	中国干旱半干旱地区
青藏高原区(TIB)	中国青藏高原地区、尼泊尔、不丹

图 1 未来情景下, 研究区的年平均温度和人口数量相对基准时段的变化
Figure 1 Changes in annual mean temperature and population count in regions along the study area under the two future RCP/SSP scenarios, relative to reference period

表 2 本研究用到的全球气候模式的基本信息
Table 2 Basic information of four GCMs adopted in this research

模式名称	研发机构	国家
IPSL-CM5A-LR	皮埃尔-西蒙物理学研究所	法国
GFDL-ESM2M	地球物理流体动力学实验室	美国
MIROC5	海洋地球科学与技术局、大气海洋研究所和国家环境变化研究所	日本
HadGEM2-ES	哈德莱气象中心	英国

放情景, 2012~2100年间累积CO₂排放量为1415~1910 GtC, 21世纪末CO₂浓度达约936 ppm(1 ppm=1 μg/g), 对应较高的增暖水平)和RCP4.5(减排政策下的中等排放情景, 2012~2100年间累积CO₂排放量为595~1005 GtC, 21世纪末CO₂浓度约为538 ppm, 对应中等偏低的增暖水平). 本研究将气候变化未来情景下的气候态定义为RCP8.5(或4.5)情景下2080~2099年平均值, 而基准时段的气候态定义为1986~2005年平均值.

上述4个GCM的原始输出结果已按照Hempel等人^[30]和Frieler等人^[31]提出的统计降尺度算法进行处理(降尺度到0.5°×0.5°的水平分辨率, 并以多套可靠的观测和再分析数据为基准进行偏差订正). 该算法在订正GCM原始结果中的偏差时, 也保留了GCM原始结果中的长期气候变化趋势. 经上述处理后的结果, 除作为ISI-MIP框架内各种评估模型的输入量^[32], 也被广泛地直接应用于极端气候事件变化及其影响的研究中^[21,33~36].

气候变化预估领域的研究通常采用多模式集合平均的方法力求减小预估结果的不确定性^[37], 因此本研究也将主要分析多模式集合平均的结果. 为评估上述模拟结果的可靠性, 且注意到研究区缺乏到高分辨率且时空连续性强的器测记录, 本研究采用了欧洲中期天气预报中心第5代大气再分析系统(ERA5)的近地表气象变量偏差校正重建数据集^[38], 对研究区基准时段高温热浪的气候态进行了对比验证, 这套数据集以下简称观测资料, 但需要指出它不是严格意义上的观测(器测)记录.

1.3 人口数据

本研究计算了不同气候-社会经济情景下人口对于极端高温热浪的暴露度(详见1.5节), 需要用到基准和未来时段的人口数据. 共享社会经济路径(shared socio-economic pathway, SSP)情景是气候变化预估研究中常用的社会经济情景^[39,40]. 本研究采用了美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)和纽约市立大学人口研究所(City University of New York Institute for Demographic Research, CIDR)发表的SSP情景下21世纪全球人口数量格点化预估数据集^[41], 其水平分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$, 在应用时将原始的细网格数据聚合到与气候模式结果相同的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 经纬度网格上. 该数据集近年来在气候变化及其社会经济影响的研究中得到了广泛应用^[9,32,42,43].

不同气候-社会经济情景的组合涵盖了未来气候变化影响的多种可能性, 但并非所有的RCP-SSP组合都具有实际意义^[44,45]. 参照前人的做法^[21,22], 本研究将着重分析以下两种具有实际意义的RCP和SSP的组合: (1) RCP8.5和SSP3(区域竞争发展路径)的组合, 下文简称SSP3-8.5; (2) RCP4.5和SSP2(中等发展路径)的组合, 下文简称SSP2-4.5. 为了与前述“未来(基准)气候情景”相对应, 在计算未来(基准)时段的人口暴露度时采用

2090年(2000年)的人口数量估计值.

1.4 热浪指数

美国国家海洋和大气管理局在业务中使用的热浪指数(heat index, HI)是本研究分析极端高温热浪及其相关风险的指标. HI考虑了温度和湿度的协同效应, 可以较为直观地反映人体在不同环境下的舒适度(在实际应用中有时也称这类指标为体感温度). HI的实用算法由Rothfus^[46]基于Steadman^[47]提供的数据给出, 在气温 $20 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 、水汽压 $0 \sim 4.6 \text{ kPa}$ 的范围内具有广泛的适用性, 本研究涉及的温湿度范围绝大部分也在其中. HI除作为部分国外气象机构业务使用外, 在全球和区域尺度上的极端高温热浪研究^[16,17]中也有应用, 其基本公式如下:

$$\begin{aligned} \text{HI} = & -42.379 + 2.04901523 \times T + 10.14333127 \times \text{RH} \\ & - 0.22475541 \times T \times \text{RH} - 6.8378 \times 10^{-3} \times T^2 \\ & - 5.48172 \times 10^{-2} \times \text{RH}^2 + 1.229 \times 10^{-3} \times T^2 \times \text{RH} \\ & + 8.528 \times 10^{-4} \times T \times \text{RH}^2 - 1.99 \times 10^{-6} \times T^2 \times \text{RH}^2, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 T 为温度($^{\circ}\text{F}$), RH 为相对湿度(%), 计算出的热浪指数HI也以 $^{\circ}\text{F}$ 为单位. 在部分温度-湿度组合情况下, 上述计算公式不适用, 需要进行调整, 请参见<https://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex.shtml>. 根据日平均HI的数值可对极端高温热浪的风险等级进行划分(表3)^[17,46,48]. 本研究首先根据日平均气温和相对湿度计算出逐日的热浪指数, 然后统计每年低、中、高风险等级高温热浪出现的日数.

1.5 人口暴露度

为进一步探讨极端高温热浪对“一带一路”沿线区域社会经济系统的影响, 本研究计算了不同气候-社会经济情景下“一带一路”沿线区域人口对于不同风险的

表3 基于热浪指数的风险等级划分标准

Table 3 Heat index (HI), the corresponding risk, and the health problems they can trigger

HI ($^{\circ}\text{F}$)	HI ($^{\circ}\text{C}$)	风险等级	健康影响
<80	<26.7	无	没有显著影响
80~90	26.7~32.2	低	长时间暴露和(或)体力劳动情形下易感到疲倦
90~105	32.2~40.6	中	长时间暴露和(或)体力劳动情形下可能出现痉挛、眩晕等症状
>105	>40.6	高	很可能出现痉挛、眩晕等症状, 长时间暴露和(或)体力劳动情形下有可能造成昏厥甚至生命危险

极端高温热浪的暴露度, 定义为极端高温热浪事件出现频率(日数)和人口数量的乘积^[49,50], 单位为人·d。以上计算均先在格点上完成, 然后再进行区域汇总。为辨识气候变化和人口变化因素对于人口暴露度总体变化的相对贡献大小, 本研究参照Jones等人^[49]提出的方法对人口暴露度的变化(ΔE)做如下分解:

$$\Delta E = P_0 \times \Delta C + C_0 \times \Delta P + \Delta C \times \Delta P, \quad (2)$$

其中, ΔC 和 ΔP 分别为极端高温热浪事件出现日数和人口数量的变化, C_0 和 P_0 分别为基准时段的热浪日数和人口数量。等式右端的前两项分别解释为单独的气候变化因素(保持人口不变, 但气候变化)和单独的人口变化因素(保持气候不变, 但人口变化), 而最后一项是分解余项, 可解释为气候-人口变化的交叉(协同)因素(气候和人口都变化)。

2 结果

2.1 “一带一路”沿线区域未来气候变化和人口变化的总体特征

“一带一路”沿线区域气候在RCP4.5中等排放情景和RCP8.5高排放情景下都呈现显著的增暖趋势(图1(a), (b)), 两种情景下全区21世纪末平均气温相对基准时段的增幅分别为2.94°C(1.71~4.15°C, 各模式结果的范围, 下同)和5.70°C(4.02~7.05°C), 高于全球平均水平。增幅大小具有比较明显的纬向分布特征, 随着纬度升高增幅也逐渐增大, 此外青藏高原也是一个增幅的高值中心, 说明高纬度和高海拔地区是全球气候变化的敏感区域, 该现象及其机制在许多研究中^[51]已讨论。

“一带一路”沿线区域人口在SSP2(中等发展路径)和SSP3(区域竞争发展路径)下都呈总体增加的趋势(图1(c)~(d)), 两种情景下全区21世纪末总人口较基准时段的36.7×10⁸人分别增加9.47×10⁸和28.4×10⁸人(增幅分别约为基准时段的0.3和0.8倍), 但不同区域的人口变化有明显差异。其中, 中国和中东欧地区的人口显著减少, 在SSP2情景下的减少量相对更大; 而南亚次大陆、西亚和东南亚部分地区的人口显著增加, 在SSP3情景下的增加量相对更大。南亚温暖湿润区人口在两种情景下分别增加6.89×10⁸和16.0×10⁸人, 中亚西亚干旱区的人口在两种情景下分别增加4.12×10⁸和7.93×10⁸人, 它们贡献了整个研究区人口的绝大部分增量。

2.2 “一带一路”沿线区域基准气候态下极端高温热浪及其人口暴露度的时空格局

在讨论未来情景下极端高温热浪及其人口暴露度之前, 有必要先分析基准气候态下不同等级极端高温热浪及其人口暴露度的空间分布格局。基准时段内全区平均的低、中、高风险热浪年出现日数分别为2.01(1.98~2.04)、0.85(0.83~0.87)和0.06(0.04~0.07) d, 但空间差异明显, 其中以南亚次大陆、中南半岛、印度尼西亚群岛(以下简称印尼群岛)和阿拉伯半岛等地的极端高温热浪出现频次较高, 上述区域各等级热浪日数的总和普遍在10 d以上。这其中大部分为低风险热浪日数的贡献, 而中高风险高温热浪则相对罕见, 仅在中南半岛和印尼群岛部分区域有较明显的分布。在所有分区中, 东南亚温暖湿润区的热浪日数最多, 其次为南亚温暖湿润区、巴基斯坦干旱区和中亚西亚干旱区。与观测资料对比, 多模式集合平均的结果总体上较好地模拟出了不同等级热浪日数的空间分布格局, 热浪日数高、低值区域的范围在模式中较为准确地重现, 但在热浪日数的绝对数值方面有轻度高估的现象(图2(a)~(h))。

进一步分析不同等级极端高温热浪的人口暴露度空间分布(图2(i)~(l))。基准时段内全区人口对于低、中、高风险极端高温热浪的暴露度分别为128(125~132)×10⁸、102(101~103)×10⁸和11.3(8.2~13.1)×10⁸人·d, 其中南亚温暖湿润区的贡献最大(尤其是对于中高风险高温热浪的人口暴露度贡献可占主导地位), 东南亚温暖湿润区的贡献次之。此外, 中国东部季风区和中亚西亚干旱区对于全区人口暴露度也有一定程度的贡献, 其余区域的贡献则为可近似忽略的小量。受人口分布的影响, 人口暴露度的空间格局与热浪日数的空间格局存在一定差异。

2.3 未来情景下“一带一路”沿线区域不同风险等级热浪的日数

未来气候情景下“一带一路”沿线大部分区域的高温热浪发生频次呈现不同程度的增加趋势, 在RCP4.5和RCP8.5情景下全区平均的各等级热浪日数总和相对基准气候态增加1.41(0.95~1.82)和2.60(1.91~3.15) d, 但具体的变化特征存在明显的区域差异(图3(a)和4)。其中, 东南亚和南亚温暖湿润区的低风险热浪日数减少, 而中高风险热浪日数以更大的幅度增加, 最终效应仍是总热浪日数增加; 中亚西亚和巴基斯坦干旱区的低

图2 研究区基准时段内不同风险等级热浪日数及人口暴露度的空间分布

Figure 2 Spatial pattern of days of each HI category, and population exposure to each HI category, in the study area in the reference period

风险热浪日数变化不明显,但中高风险热浪日数显著增加;中国东部季风区各等级热浪日数都有一定程度的增加;其他分区的热浪日数变化则相对较少,极端高温热浪未来气候情景下在青藏高原区和北亚寒冷干旱区依然罕见。总热浪日数增加最突出的区域位于印度半岛、中南半岛和阿拉伯半岛南部等地,其中高风险热浪日数增加以中南半岛和印度半岛最突出(增幅可达5 d以上),而阿拉伯半岛南部的总热浪日数增加主要由中低风险热浪日数贡献(图3(a))。

2.4 未来情景下“一带一路”沿线国家不同风险等级高温热浪的人口暴露度

未来气候和社会经济情景下“一带一路”沿线区域的高温热浪人口暴露度呈现显著增加的态势,在SSP2-4.5和SSP3-8.5情景下全区各等级高温热浪的人口暴露度总和相对基准时段增加 $237(205\sim 263)\times 10^8$ 和 $557(517\sim 595)\times 10^8$ d,增幅约为基准时段人口暴露度的1.0(0.9~1.1)和2.3(2.2~2.5)倍(图3(b))。从空间分布来看(图5),各等级总人口暴露度出现增加趋势的区域涵盖了

图 3 基准时段及未来情景下, 研究区分区汇总的不同风险等级热浪日数(a)及人口暴露度(b)
Figure 3 Regional averaged number of days of each HI category (a) and population exposure to each HI category (b) in subregions of the study area in the reference period and the two future scenarios

除青藏高原区和北亚寒冷干旱区的绝大部分区域, 其中增幅较大的区域包括印度半岛、中南半岛、印尼群岛、阿拉伯半岛南部和中国东部局地。从分等级来看(图3), 越高风险等级(对人体健康影响越大)高温热浪事件的人口暴露度相对增加越突出, 在SSP2-4.5情景下全区低、中和高风险高温热浪的人口暴露度分别较基准时段增加约0.3(0.2~0.3)、1.1(1.0~1.3)和7.9(4.9~10.3)倍, 在SSP3-8.5情景下全区低、中和高风险高温热浪的人口暴露度分别较基准时段增加约0.5(0.4~0.7)、1.9(1.5~2.4)和27.2(19.0~32.6)倍。对于低风险高温热浪人口暴露度, 仅在东南亚温暖湿润区和中国东部季风区出现了下降趋势(其中前者受低风险热浪日数的减少主导, 后者受人口数量减少的主导), 其他区域仍为增加趋势; 对于中高风险高温热浪人口暴露度, 各分区均呈现不同程度的增加趋势。南亚温暖湿润区是人口暴露度增加最突出的分区, 在SSP2-4.5(SSP3-8.5)情景下分别贡献了全区低、中和高风险高温热浪人口暴露度增幅的约51%(54%)、43%(42%)和71%(63%); 除此之外, 东南亚温暖湿润区、中亚西亚和巴基斯坦干旱区对于整个“一带一路”沿线区域的高温热浪人口暴露度增加也有一定程度的贡献, 而其余分区的贡献很小(图3(b))。

2.5 未来情景下极端高温热浪人口暴露度变化的影响因素分析

人口暴露度的变化是热浪日数和人口数量变化的总体效应, 按照1.5节介绍的方法将人口暴露度变化分解为气候因素、人口因素和交叉因素的贡献(图6)。结果表明总体上气候因素对未来人口暴露度变化的贡献

最大, 但各种因素的贡献大小关系在不同分区和不同风险等级高温热浪间存在明显差异。由于SSP3情景下的人口数量增幅高于SSP2情景, 人口相关因素对SSP3-8.5情景下人口暴露度的变化量有更大的贡献。气候因素、人口因素和交叉因素对SSP2-4.5情景下全区各等级高温热浪总人口暴露度增加的贡献分别约为59%(56%~61%)、26%(23%~30%)和15%(14%~16%); 对SSP3-8.5情景下全区各等级高温热浪总人口暴露度增加的贡献分别约为38%(36%~39%)、34%(31%~36%)和29%(28%~30%)。从分风险等级来看, 气候因素对于中高风险高温热浪暴露度的变化普遍具有更大的贡献, 主导了大部分分区中高风险高温热浪人口暴露度的增加。需要指出的是, 对于人口暴露度增加最为突出的南亚温暖湿润区, 人口相关因素主导了人口暴露度的增加, 而气候因素的贡献相对较小; 但其他多数分区, 气候相关因素的贡献仍占据上风。

3 结论和讨论

3.1 结论

本研究基于ISI-MIP全球气候模式预估模拟试验结果和未来人口预估结果, 以热浪指数这一考虑了温度-湿度协同效应的指标将极端高温热浪划分为不同的健康风险等级, 预估了“一带一路”沿线区域两种典型气候-社会经济变化情景下, 21世纪末极端高温热浪发生频次及其人口暴露度的可能变化, 并进一步辨识了气候和人口相关因素对于人口暴露度变化的相对贡献大小。主要结论如下。

(1) 除青藏高原区和北亚寒冷干旱区外, 未来气候

图4 未来情景下,研究区不同风险等级热浪日数相对于基准时段的变化
Figure 4 Changes in days of each HI category in the study area under the two future scenarios, relative to the reference period

情景下“一带一路”沿线大部分区域的热浪日数呈现不同程度的增加趋势,各风险等级总热浪日数增加,且中高风险等级热浪日数占比显著提高.考虑了温度-湿度协同效应的“复合型”高温热浪在“一带一路”沿线的部

分低纬度区域增加最显著,印度半岛、中南半岛和阿拉伯半岛南部等地为热浪日数增加最突出的区域.

(2) 未来两种典型气候-社会经济情景下“一带一路”沿线区域极端高温热浪事件的人口暴露度显著增

图5 未来情景下,研究区不同风险等级极端高温的人口暴露度相对于基准时段的变化
Figure 5 Changes in population exposure to each HI category in the study area under the two future scenarios, relative to reference period

加,在SSP2-4.5(SSP3-8.5)情景下到21世纪末全区各等级高温热浪的人口暴露度总和将增加至基准时段的约2.0(3.3)倍,大大高于人口数量的增幅。越高风险等级(对人体健康威胁越大)高温热浪的人口暴露度的相对

增加越明显。人口暴露度增加突出的区域主要出现在南亚和东南亚国家。从分区来看,南亚温暖湿润区对全区人口暴露度的增加贡献最大,其次为东南亚温暖湿润区、中亚西亚和巴基斯坦干旱区,而其他区域贡献

图6 未来情景下,研究区各分区汇总的不同风险等级极端高温热浪人口暴露度相对基准时段变化量的影响因素分析

Figure 6 Analysis of factors affecting changes in regional aggregated population exposure to each HI category in subregions of the study area under future scenarios

很小。

(3) 总体上气候因素对“一带一路”沿线区域未来高温热浪人口暴露度的增加贡献最大,但各种因素的贡献相对大小关系存在明显的区域差异。气候因素对于中高风险高温热浪人口暴露度的变化普遍具有更大的贡献。

3.2 讨论

目前已发表的许多研究都指出区域极端高温热浪将随着全球增暖的加剧而显著增加^[8,50-52],传统的高温热浪方面的预估研究仅单独考虑了温度这一变量,可能低估了未来情景下低纬度地区极端高温热浪事件的潜在影响^[17,18,52-55]。与仅考虑温度因素的研究相比^[20-22],本研究结果也突出了低纬度的印度半岛、中南半岛、印尼群岛等地是中高风险极端高温热浪(及其影响)增加的“热点”区域;部分中高纬度地区在未来气候情景下虽然出现了仅以温度衡量的极端高温热浪事件的增加,但对应的健康风险等级不高,并非“热点”区域。在全球增暖的背景下,低纬度地区的平均气温增幅小于高纬度地区^[51,56](相对而言对全球增暖不太敏感),但低纬度地区对人体健康具有较大威胁的极端高温热浪事件的强度和频率却具有显著的增加趋势(对全球增暖比较敏感),而且这类极端事件可能产生严重的社会经济影响^[1-3,11,52],在气候变化及其影响的预估研究中须加以重视。

近年来,一些研究还指出全球增暖导致的极端气候热浪增加对发展中国家影响最大^[57-59],本研究结果表明印度、孟加拉国和巴基斯坦等国的极端高温热浪日数和人口暴露度增加较快,尤其是人口暴露度的增

幅可达基准时段的数倍。对于这些发展中国家,未来一段时期内人口数量仍将快速增长,而基础设施相对落后,未来情景下极端高温热浪事件人口暴露度的大幅增加是这些国家可持续发展进程中的潜在威胁,这也从一个侧面印证了上述观点。“一带一路”沿线区域气候类型多样,气象因子导致的各类自然灾害频发,且该区域人口密集,防灾减灾能力薄弱,自然灾害对本区人民的生命和财产安全构成较大的威胁^[23,24,26]。本研究对于未来气候-社会经济情景下极端高温热浪灾害风险的预估可以为“一带一路”沿线不同自然地理背景和社会经济发展水平的国家防灾减灾相关对策提供亟需的科学参考。

需要指出,气象要素和人体健康风险之间的关系非常复杂,在相关研究中使用的体感温度的指标并不唯一^[11,12,53]。除温度、湿度外,风速和辐射也可能对体感温度产生影响,相应的指标包括有效温度指数(effective temperature, ET)^[18,60,61]和通用热气候指数(universal thermal climate index, UTCI)^[62,63]等。本研究使用的HI没有考虑风速和辐射的影响,在某些极端情况下(例如户外的强太阳辐射)可能低估热环境对人体的不利影响^[16],但总体上辐射和风速对体感温度的影响相对而言不显著^[12]。本研究采用的划分不同风险等级的HI阈值尽管在业务中常用,但存在一定的主观性,因为它忽视了年龄、性别、健康状况、衣着、劳动强度和个体耐受性等方面的差异,不能完全准确地反映不同人群对于热环境适应能力的差异。未来的研究可进一步考虑人口/社会经济发展对于极端高温热浪的脆弱性差异^[64],对未来情景下极端高温热浪导致的灾害风险进行更准确、合理的预估。

除上述问题外,本研究还存在以下不确定性:(1)

分辨率较粗的GCM难以准确捕捉到区域尺度上的气候特征, 尽管本研究采用的数据经过统计降尺度, 较GCM原始输出结果有一定改进, 但这种方法缺乏物理基础。在未来的区域气候变化(尤其是极端气候事件方面)的研究中应加强区域气候模式动力降尺度集合预估方法

的应用^[18,65]。(2) 本研究采用的全球人口预估数据集未能充分考虑到各国不同的人口政策(例如中国近年来实施的二孩政策)^[66,67], 可能导致部分区域的预估结果出现系统性偏差, 进而影响到人口暴露度预估结果的准确性。

致谢 文中涉及的地图经自然资源部地图技术审查中心审查, 审图号为GS(2021)607号。

参考文献

- 1 Mora C, Dousset B, Caldwell I R, et al. Global risk of deadly heat. *Nat Clim Chang*, 2017, 7: 501–506
- 2 Dunne J P, Stouffer R J, John J G. Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nat Clim Chang*, 2013, 3: 563–566
- 3 Sun Q, Miao C, Hanel M, et al. Global heat stress on health, wildfires, and agricultural crops under different levels of climate warming. *Environ Int*, 2019, 128: 125–136
- 4 Ye D X, Yin J F, Chen Z H, et al. Spatiotemporal change characteristics of summer heatwaves in China in 1961–2010 (in Chinese). *Clim Chang Res*, 2013, 9: 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: 15–20]
- 5 Perkins S E, Alexander L V, Nairn J R. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. *Geophys Res Lett*, 2012, 39: L20714
- 6 Sun Y, Zhang X, Zwiers F W, et al. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China. *Nat Clim Chang*, 2014, 4: 1082–1085
- 7 Mitchell D, Heaviside C, Vardoulakis S, et al. Attributing human mortality during extreme heat waves to anthropogenic climate change. *Environ Res Lett*, 2016, 11: 074006
- 8 Meehl G A, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 2004, 305: 994–997
- 9 Li D, Zhou T, Zou L, et al. Extreme high-temperature events over East Asia in 1.5°C and 2°C warmer futures: Analysis of NCAR CESM low-warming experiments. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 1541–1550
- 10 Sun Y, Hu T, Zhang X. Substantial increase in heat wave risks in China in a future warmer world. *Earth Future*, 2018, 6: 1528–1538
- 11 Kjellstrom T, Briggs D, Freyberg C, et al. Heat, human performance, and occupational health: A key issue for the assessment of global climate change impacts. *Annu Rev Public Health*, 2016, 37: 97–112
- 12 Willett K M, Sherwood S. Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature. *Int J Climatol*, 2012, 32: 161–177
- 13 Chen X, Li N, Zhang Z T, et al. Estimation of future global population exposure to heatwaves—Based on the heat stress index (in Chinese). *Clim Chang Res*, 2020, 16: 424–432 [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. 气候变化研究进展, 2020, 16: 424–432]
- 14 Chen X, Li N, Huang C F, et al. Projection of heatwaves by the combined impact of humidity and temperature in China (in Chinese). *Prog Geogr*, 2020, 39: 36–44 [陈曦, 李宁, 黄承芳, 等. 综合湿度和温度影响的中国未来热浪预估. 地理科学进展, 2020, 39: 36–44]
- 15 Pal J S, Eltahir E A B. Future temperature in southwest Asia projected to exceed a threshold for human adaptability. *Nat Clim Chang*, 2015, 6: 197–200
- 16 Sylla M B, Faye A, Giorgi F, et al. Projected heat stress under 1.5°C and 2°C global warming scenarios creates unprecedented discomfort for humans in West Africa. *Earth Future*, 2018, 6: 1029–1044
- 17 Russo S, Sillmann J, Sterl A. Humid heat waves at different warming levels. *Sci Rep*, 2017, 7: 7477
- 18 Gao X J, Wu J, Shi Y, et al. Future changes in thermal comfort conditions over China based on multi-RegCM4 simulations. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2018, 11: 291–299
- 19 Wu S H, Gao J B, Deng H Y, et al. Climate change risk and methodology for its quantitative assessment (in Chinese). *Progr Geogr*, 2018, 37: 28–35 [吴绍洪, 高江波, 邓浩宇, 等. 气候变化风险及其定量评估方法. 地理科学进展, 2018, 37: 28–35]
- 20 Dong W, Liu Z, Liao H, et al. New climate and socio-economic scenarios for assessing global human health challenges due to heat risk. *Clim Change*, 2015, 130: 505–518
- 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. *Sci Rep*, 2017, 7: 43909
- 22 Chen J, Liu Y, Pan T, et al. Global socioeconomic exposure of heat extremes under climate change. *J Clean Prod*, 2020, 277: 123275
- 23 Wang H J, Tang G L, Chen H S, et al. The Belt and Road region climate change: Facts, impacts and possible risks (in Chinese). *Trans Atmos Sci*,

- 2020, 43: 1–9 [王会军, 唐国利, 陈海山, 等. “一带一路”区域气候变化事实、影响及可能风险. 大气科学学报, 2020, 43: 1–9]
- 24 Jiang T, Tan K, Wang Y J, et al. Spatial-temporal variation of meteorological disasters in the “Belt and Road” regions (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2020, 38: 57–65 [姜彤, 谈科, 王艳君, 等. “一带一路”区域气象灾害时空变化特征. 科技导报, 2020, 38: 57–65]
- 25 Han T, Chen H, Hao X, et al. Projected changes in temperature and precipitation extremes over the Silk Road Economic Belt regions by the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 multi-model ensembles. *Int J Climatol*, 2018, 38: 4077–4091
- 26 Wu S H, Liu L L, Liu Y H, et al. Geographical patterns and environmental change risks in terrestrial areas of the Belt and Road (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2018, 73: 1214–1225 [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. 地理学报, 2018, 73: 1214–1225]
- 27 Zhou B T, Xu Y, Han Z Y, et al. CMIP5 projected changes in mean and extreme climate in the Belt and Road region (in Chinese). *Trans Atmos Sci*, 2020, 43: 255–264 [周波涛, 徐影, 韩振宇, 等. “一带一路”区域未来气候变化预估. 大气科学学报, 2020, 43: 255–264]
- 28 Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Am Meteorol Soc*, 2011, 93: 485–498
- 29 van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: An overview. *Clim Change*, 2011, 109: 5–31
- 30 Hempel S, Frieler K, Warszawski L, et al. A trend-preserving bias correction—The ISI-MIP approach. *Earth Syst Dynam*, 2013, 4: 219–236
- 31 Frieler K, Lange S, Piontek F, et al. Assessing the impacts of 1.5°C global warming—Simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b). *Geosci Model Dev*, 2017, 10: 4321–4345
- 32 Rosenzweig C, Arnell N W, Ebi K L, et al. Assessing inter-sectoral climate change risks: The role of ISIMIP. *Environ Res Lett*, 2017, 12: 010301
- 33 Chen H, Sun J. Increased population exposure to precipitation extremes in China under global warming scenarios. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2020, 13: 63–70
- 34 Yang Y, Jin C, Ali S. Projection of heat wave in China under global warming targets of 1.5°C and 2°C by the ISIMIP models. *Atmos Res*, 2020, 244: 105057
- 35 Wu S, Liu L, Gao J, et al. Integrate risk from climate change in China under global warming of 1.5 and 2.0°C. *Earth Future*, 2019, 7: 1307–1322
- 36 Wu S H, Pan T, Liu Y H, et al. Comprehensive climate change risk regionalization of China (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2017, 72: 3–17 [吴绍洪, 潘韬, 刘燕华, 等. 中国综合气候变化风险区划. 地理学报, 2017, 72: 3–17]
- 37 Zhang X Z, Li X X, Xu X C, et al. Ensemble projection of climate change scenarios of China in the 21st century based on the preferred climate models (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2017, 72: 1555–1568 [张学珍, 李侠祥, 徐新创, 等. 基于模式优选的21世纪中国气候变化情景集合预估. 地理学报, 2017, 72: 1555–1568]
- 38 Cucchi M, Weedon G P, Amici A, et al. WFDE5: Bias-adjusted ERA5 reanalysis data for impact studies. *Earth Syst Sci Data*, 2020, 12: 2097–2120
- 39 O'Neill B C, Kriegler E, Riahi K, et al. A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Clim Change*, 2014, 122: 387–400
- 40 Zhang J, Cao L G, Li X C, et al. Advances in Shared Socio-economic Pathways in IPCC AR5 (in Chinese). *Clim Chang Res*, 2013, 9: 225–228 [张杰, 曹丽格, 李修仓, 等. IPCC AR5中社会经济新情景(SSPs)研究的最新进展. 气候变化研究进展, 2013, 9: 225–228]
- 41 Jones B, O'Neill B C. Spatially explicit global population scenarios consistent with the Shared Socioeconomic Pathways. *Environ Res Lett*, 2016, 11: 084003
- 42 Wu J, Han Z, Li R, et al. Changes of extreme climate events and related risk exposures in Huang-Huai-Hai river basin under 1.5–2°C global warming targets based on high resolution combined dynamical and statistical downscaling dataset. *Int J Climatol*, 2021, 41: 1383–1401
- 43 Wang F, Zhang J T. Response of precipitation change in Central Asia to emission scenarios consistent with the Paris Agreement (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2017, 75: 25–40 [王芳, 张晋韬. 《巴黎协定》排放情景下中亚地区降水变化响应. 地理学报, 2020, 75: 25–40]
- 44 van Vuuren D P, Kriegler E, O'Neill B C, et al. A new scenario framework for Climate Change Research: Scenario matrix architecture. *Clim Change*, 2014, 122: 373–386
- 45 O'Neill B C, Kriegler E, Ebi K L, et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Glob Environ Change-Human Policy Dimens*, 2017, 42: 169–180
- 46 Rothfus L P. The Heat Index “Equation”. National Oceanic and Atmospheric Administration, 1990, SR90-23
- 47 Steadman R G. The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *J Appl Meteorol*, 1979, 18: 861–873
- 48 Jacklitsch B, Williams W J, Musolin K, et al. U.S. NIOSH Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Heat and Hot Environments. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, and National Institute for Occupational Safety and Health, 2016
- 49 Jones B, O'Neill B C, McDaniel L, et al. Future population exposure to US heat extremes. *Nat Clim Chang*, 2015, 5: 652–655
- 50 Huang D P, Zhang L, Gao G. Changes in population exposure to high temperature under a future scenario in China and its influencing factors (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2016, 71: 1189–1200 [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: 1189–1200]
- 51 Collins M, Knutti R, Arblaster J, et al. Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G

- K, et al., eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- 52 Perkins S E. A review on the scientific understanding of heatwaves—Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. *Atmos Res*, 2015, 164: 242–267
- 53 Horton R M, Mankin J S, Lesk C, et al. A review of recent advances in research on extreme heat events. *Curr Clim Change Rep*, 2016, 2: 242–259
- 54 Coffel E D, Horton R M, de Sherbinin A. Temperature and humidity based projections of a rapid rise in global heat stress exposure during the 21st century. *Environ Res Lett*, 2018, 13: 014001
- 55 Im E S, Pal J S, Eltahir E A B. Deadly heat waves projected in the densely populated agricultural regions of South Asia. *Sci Adv*, 2017, 3: e1603322
- 56 Hu T, Sun Y, Zhang X B. Temperature and precipitation projection at 1.5 and 2°C increase in global mean temperature. *Chin Sci Bull*, 2018, 14: 228–236 [胡婷, 孙颖, 张学斌. 全球1.5和2°C温升时的气温和降水变化预估. *科学通报*, 2017, 62: 3098–3111]
- 57 Ahmadalipour A, Moradkhani H, Kumar M. Mortality risk from heat stress expected to hit poorest nations the hardest. *Clim Change*, 2019, 152: 569–579
- 58 Kjellstrom T, Freyberg C, Lemke B, et al. Estimating population heat exposure and impacts on working people in conjunction with climate change. *Int J Biometeorol*, 2018, 62: 291–306
- 59 Russo S, Sillmann J, Sippel S, et al. Half a degree and rapid socioeconomic development matter for heatwave risk. *Nat Commun*, 2019, 10: 136
- 60 Wu J, Gao X, Giorgi F, et al. Changes of effective temperature and cold/hot days in late decades over China based on a high resolution gridded observation dataset. *Int J Climatol*, 2017, 37: 788–800
- 61 Wu J, Gao X J, Han Z Y, et al. Analysis of the change of comfort index over Yunnan Province based on effective temperature (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2017, 32: 174–186 [吴佳, 高学杰, 韩振宇, 等. 基于有效温度指数的云南舒适度变化分析. *地球科学进展*, 2017, 32: 174–186]
- 62 Kong Q Q, Zheng J Y, Wang X G. Spatial pattern and temporal variation in thermal comfort in China from 1979 to 2014 (in Chinese). *Resour Sci*, 2016, 38: 1129–1139 [孔钦钦, 郑景云, 王新歌. 1979–2014年中国气候舒适度空间格局及时空变化. *资源科学*, 2016, 38: 1129–1139]
- 63 Kong Q Q, Ge Q S, Zheng J Y. Spatio-temporal changes in extreme UTCI indices in China (in Chinese). *Geogr Res*, 2017, 36: 1171–1182 [孔钦钦, 葛全胜, 郑景云. 中国极端通用热气候指数的时空变化. *地理研究*, 2017, 36: 1171–1182]
- 64 Zhong S, Huang C R. Climate change and human health: Risks and responses (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2002–2010 [钟爽, 黄存瑞. 气候变化的健康风险与卫生应对. *科学通报*, 2019, 64: 2002–2010]
- 65 Giorgi F, Gao X J. Regional earth system modeling: Review and future directions. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2018, 11: 189–197
- 66 Jiang T, Zhao J, Jing C, et al. National and provincial population projected to 2100 under the shared socioeconomic pathways in China (in Chinese). *Clim Chang Res*, 2017, 13: 128–137 [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: 128–137]
- 67 Huang J, Qin D, Jiang T, et al. Effect of fertility policy changes on the population structure and economy of China: From the perspective of the Shared Socioeconomic Pathways. *Earth Future*, 2019, 7: 250–265

Summary for “‘一带一路’沿线区域21世纪极端高温热浪风险预估”

Projected changes in risk of heat waves throughout Belt and Road Region in the 21st century

Fang Wang^{1*}, Jintao Zhang^{1,2}, Quansheng Ge¹ & Zhixin Hao¹¹ Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;² Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China* Corresponding author, E-mail: wangf@igsnrr.ac.cn

The “Belt and Road Initiative”, an important national measure undertaken during the reform and opening-up policy of China, includes the Silk Road Economic Belt and 21st Century Maritime Silk Road. The Belt and Road Initiative involves over four billion people from more than 60 countries; therefore, it is imperative to make accurate projections of future climate changes for improved mitigation planning at the national level. Extreme heat waves may have significant impacts on several aspects of natural ecosystems and society, prompting considerable concern; thus, research is necessary with respect to potential changes in the frequency and intensity of heat waves in the context of global warming. Increasing heat wave related disasters in a potentially warmer future may pose threats to the sustainable development of the Belt and Road Region (BRR)—A region with various complex climates and a weak economic foundation. Heat wave disasters that are accompanied by high temperatures and humidity can threaten human health. Traditional research on heat waves focuses on the effects of temperature; however, taking the comprehensive effect of temperature-humidity into consideration can better explain heat stress on the human body in a high-temperature environment and better measure the intensity of heat waves. Therefore, we adopted a heat wave index (a widely used indicator for the synergistic effect of temperature and humidity) developed by the National Oceanic and Atmospheric Administration to characterize the health risks associated with heat waves, as well as to further project the changes in areal and population exposure to heat waves in the 21st century at different risk levels throughout the BRR under two typical climatic-socioeconomical scenarios (SSP2-4.5 and SSP3-8.5). Our analysis was based on state-of-the-art global climate models that are a part of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project and a population projection dataset developed by the National Center for Atmospheric Research and the City University of New York’s Institute for Demographic Research. Our results indicated that the intensity and frequency of heat waves in most areas throughout the BRR showed various increasing trends. Under the SSP2-4.5 and SSP3-8.5 scenarios, the sum of the population exposure to all levels of extreme heat waves in the BRR will increase to 2.0 and 3.3 times, respectively, by the end of the 21st century compared with that of the reference period (1986–2005). Furthermore, the relative increase in population exposure will be more remarkable for heat waves associated with higher risk levels; namely, the population exposure to heat waves at low, medium, and high risk levels will increase to 1.3, 2.1, and 8.9, respectively, under SSP2-4.5 and 1.5, 2.9, and 28.2 times, respectively, under SSP3-8.5 compared with that of the reference period. Developing countries in South Asia and Southeast Asia with large populations will suffer the most prominent increase in population exposure to heat waves. Typically, climatic factors play a major role in the increase of overall population exposure and dominate the increase in population exposure to heat waves at higher risk levels. However, the relative magnitude of the contribution of climatic and demographic factors varied across the regions. Our results indicated that unlike the air temperature, changes in the heat-humidity indices were significantly greater at lower latitudes, where only slight increases in the mean may be required to substantially enhance the frequency of dangerous conditions. Future construction of the Belt and Road must establish an early warning system for high-risk areas based on risk evaluations for extreme heat wave events. Additionally, it will be necessary to strengthen the vulnerability assessments for different areas and industries in the BRR and to establish an effective technical system to cope with extreme events.

extreme high-temperature, heat wave index, the Belt and Road Region, exposure, climate changedoi: [10.1360/TB-2020-1171](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1171)