

综合湿度和温度影响的中国未来热浪预估

陈曦^{1,2}, 李宁^{1,2*}, 黄承芳^{1,2}, 刘佳伟³, 张正涛⁴

1. 北京师范大学地理科学学部环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;
2. 北京师范大学地理科学学部减灾与应急管理研究院, 北京 100875;
3. 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/气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室, 南京 210044;
4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:地面空气湿度直接影响人体驱散热负荷的效率,持续高温高湿天气将会严重影响人体健康。基于综合考虑温度和湿度协同作用的热胁迫指数——湿球黑球温度(WBGT)指数定义热浪,利用参考时期(1986—2005年)中国824个气象站点逐日平均气温和逐日相对湿度资料以及CMIP5多模式相应模拟数据,论文定量描述了未来时期(2076—2095年)不同排放情景下(RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5)中国大陆地区可能遭遇的热浪事件的空间分布特征及其变化。研究结果表明:①最有效的减排情景(RCP2.6)和高排放情景(RCP8.5)下中国大陆地区的平均热浪日数分别是参考时期的3.4倍和6.6倍,平均热浪强度(一年内所有热浪事件中日均WBGT指数的最大值)也相对升高了1.6℃和4.9℃,未来时期RCP8.5情景下中国东部和南部地区的最高年均热浪强度甚至将达到40℃;②虽然青藏高原地区的热浪强度等级低,但是未来时期热浪日数的增加幅度较为显著;③华南、长江中下游以及少数西南地区是综合考虑气温和湿度协同作用对人体热舒适的影响下,未来时期可能发生热浪最严重的地区,如果不考虑湿度要素的影响,那么将极有可能低估热浪在中国华南和东部等湿度较高地区的强度和影响。

关键词:热浪;相对湿度;未来情景;湿球黑球温度;中国

全球气候正经历着以变暖为主要特征的显著变化,在全球变暖背景下,大部分陆地区域极端高温热浪事件的发生频率、持续时间和强度很可能也会不断增加^[1-3]。大多数关于热浪的研究都是选择地表温度作为唯一变量去描述热浪的强度、频率等相关特征^[1,4-6],但是考虑地面空气湿度对于定义热浪来说同样重要,因为湿度与人体和外界环境的热量交换有直接关联,它直接影响着人体对热胁迫的感知^[7-8]。一方面,当周围环境温度超过最佳身体核心温度(约37℃)时,根据热力学第二定律,人体就不能正常散热^[9]。另一方面,人体主要通过流汗来

驱散环境和代谢热负荷,如果周围环境的相对湿度较高,将会严重影响人体驱散热负荷的效率,从而导致人体内热量的集聚,甚至会造成人体热相关发病率和死亡率的上升^[10]。因此,当周围环境相对湿度较高时,即使环境温度低于身体核心温度,也有可能发生热胁迫事件。根据Mora等^[11]的研究,随着相对湿度的增加,造成致死情况的临界温度在不断降低,并且一些热相关死亡事件发生在温度相对低的环境中。

上述事实解释了一些传统的热胁迫指数综合考虑温度和湿度要素的原因,比如体感温度^[12]、湿

收稿日期:2019-01-09;修订日期:2019-03-19。

基金项目:国家重点研发计划重点专项课题(2016YFA0602403);国家自然科学基金项目(41775103);第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0906,2019QZKK0606)。[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFA0602403; National Natural Science Foundation of China, No. 41775103; The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP), No. 2019QZKK0906 and 2019QZKK0606.]

第一作者简介:陈曦(1993—),女,江苏镇江人,博士生,主要从事气候变化风险研究。E-mail: chenxi0409@mail.bnu.edu.cn

*通信作者简介:李宁(1958—),女,江苏镇江人,教授,主要从事自然灾害及风险管理研究。E-mail: ningli@bnu.edu.cn

引用格式: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[J].地理科学进展,2020,39(1):36-44.[Chen Xi, Li Ning, Huang Chengfang, et al. Projection of heatwaves by the combined impact of humidity and temperature in China. Progress in Geography, 2020, 39(1): 36-44.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.01.004

球温度^[13]、湿球黑球温度^[14]等。目前一些国家气象中心(比如美国、澳大利亚、新西兰、加拿大、德国)会定期发布这些能够表征人体热舒适的指数,也有一些国外的研究基于这些指数来研究热胁迫或热浪。Russo等^[12]利用体感温度定量描述了过去以及未来不同温升情景下的湿热灾害,结果表明湿度能使体感温度的峰值变高并增大热浪的强度;通过设定35℃为人类适应温度的阈值,Pal等^[15]预计波斯湾及附近地区的极端湿球温度在基准排放情景下会接近并且超过这一阈值;基于湿球黑球温度指数定义热胁迫, Lee等^[16]定量分析和比较了未来1.5℃和2℃增温情景下东亚地区热胁迫强度、频率和持续时间变化。也有一些研究评估了热胁迫对人体健康和劳动效率的影响^[17-18],主要是因为高温高湿环境下人体新陈代谢效率会降低^[9]。

Russo等^[12]的研究表明,一些典型地区如美国东部和中西部、中国、拉丁美洲北部和马来西亚,再分析资料和模式数据都显示这些地区较高的相对湿度加强了过去几十年发生的热浪事件的强度和等级,比如在1995年美国芝加哥热浪和2003年中国南方热浪中,湿度对于加剧热浪影响就起到了十分重要的作用。中国地域辽阔,受地理位置和区域内独特地形和地貌因素的共同影响,气温和降水的空间分布差异很大,从而造成较大的区域干湿差异。如果研究中国地区的热胁迫或热浪仅仅考虑气温要素,那么很有可能导致识别真正对人体健康产生影响的热事件的偏差,比如有可能低估了热事件在中国东部沿海等湿度较高地区的影响和强度。

受气候变暖影响,中国高温热浪袭击范围越来越广,频次明显增多^[19],大部分地区极端高温日数的增加趋势也较为明显^[20]。随着温室气体浓度的不断增加,未来情景下中国可能进一步变暖^[21-22],即便达到巴黎协定1.5℃温升目标,中国东部地区依然将遭受持续增强的极端高温事件^[23],很多研究也表明全球大部分地区的绝对湿度和水汽压表现出明显的上升趋势^[24-25]。虽然目前已经有不少学者开展了未来情景下中国高温热浪的相关研究,但大多数研究只考虑了气温这单一要素,考虑到未来更加暖湿的气候条件以及持续炎热条件下高湿度对热浪影响的放大作用^[12,26],综合气温和湿度二者协同作用评估未来情景下中国地区热浪的特征变化显得十分必要。因此,本文提出利用中国地区的历史观测资料以及全球气候模式的相关模拟数据,基于

综合气温和湿度要素的热胁迫指数定义热浪,从而定量描述未来不同排放情景下中国地区可能遭受的热浪事件的变化特征,以为气候变化影响和适应研究提供一定的基础资料。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

历史观测资料来自中国气象局国家气象信息中心提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)(<http://data.cma.cn/>),该数据集包含824个国家级基准、基本气象站1951年以来的日值观测资料,本文利用其中1986—2005年所有气象站的逐日平均气温和相对湿度数据。

气候模拟数据来自耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)提供的3个代表浓度路径(RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5)情景下19个全球气候模式(GCM)的逐日气温和近地面相对湿度模拟结果(<https://esgf-index1.ceda.ac.uk/search/cmip5-ceda/>),具体模式信息见表1。研究只利用每个模式第一个集合成员的模拟结果,即r1i1p1。时间范围选取1986—2005年(作为参考时期)以及2076—2095年(作为未来时期),研究范围为中国大陆地区31个省(市、区)。由于各模式的空间分辨率不同,为便于比较,利用双线性插值方法将模式数据统一插值到0.25°×0.25°的网格点上。

1.2 方法

依据已有的一些研究^[14,16,27-28],本文利用湿球黑球温度(WBGT)指数作为热胁迫指数。WBGT指数是综合考虑温度和湿度来衡量热胁迫的最常用指数,它是表示人体接触环境热强度的一个经验指数,最早用于美国陆军和海军陆战队集训营热相关疾病的控制^[29],并被ISO 7243标准体系认证用于量化人体舒适温度^[30]。WBGT指数综合考虑从太阳辐射吸收的热量以及与空气湿度相关的蒸发散热,组合了自然湿球温度、黑球温度和干球温度3种要素。由于黑球温度难以获取,因此本文利用简化的WBGT指数(以下简称 W)进行研究,许多学者利用 W 指数开展了对高温热浪长期变化的相关研究^[14,16,27-28], W 指数的计算只需根据干球温度以及相对湿度,其计算公式如下:

$$W = 0.567T_a + 0.393e + 3.94 \quad (1)$$

$$e = (RH/100) \times 6.105 \exp[17.27T_a / (237.7 + T_a)] \quad (2)$$

表1 文中所用的19个全球气候模式信息
Tab.1 Overview of the 19 general circulation models (GCMs) used in this study

模式名称	单位及所属国家	历史模拟	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
ACCESS1.0	CSIRO-BOM, 澳大利亚	√	-	√	√
BCC-CSM1.1	BCC, 中国	√	√	√	√
BNU-ESM	BNU, 中国	√	√	√	√
CanESM2	CCCma, 加拿大	√	√	√	√
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS, 法国	√	√	√	√
CSIRO-Mk3.6.0	CSIRO-QCCCE, 澳大利亚	√	√	√	√
GFDL-CM3	NOAA-GFDL, 美国	√	√	√	√
GFDL-ESM2G	NOAA-GFDL, 美国	√	√	√	√
GFDL-ESM2M	NOAA-GFDL, 美国	√	√	√	√
HadGEM2-CC	MOHC, 英国	√	-	√	√
HadGEM2-ES	MOHC, 英国	√	√	√	√
INMCM4.0	INM, 俄罗斯	√	-	√	√
IPSL-CM5A-LR	IPSL, 法国	√	√	√	√
IPSL-CM5A-MR	IPSL, 法国	√	√	√	√
MIROC-ESM	MIROC, 日本	√	√	√	√
MIROC-ESM-CHEM	MIROC, 日本	√	√	√	√
MIROC5	MIROC, 日本	√	√	√	√
MRI-CGCM3	MRI, 日本	√	√	√	√
NorESM1-M	NCC, NMI, 挪威	√	√	√	√

式中: T_a 表示干球温度(°C), e 表示水汽压(hPa), RH 表示相对湿度(%). 该简化的 WBGT 指数忽略了风和太阳辐射对于热胁迫的影响, 根据 Willett 等^[14]的研究, 风和太阳辐射对于热胁迫变化趋势的影响可忽略不计。

在气候学中, 一次热浪事件的发生通常被定义为至少连续3天高温日的出现^[31-32]。本文也将一次热浪事件定义为至少连续3天日平均 W 数值(以下简称 \bar{W}_d) 超过参考时期内第95个 \bar{W}_d 百分位值的均值, 并且从热浪日数和强度两方面分析中国地区参考时期和未来时期的热浪变化特征。为了减小年际变化和单个模式模拟局限性的影响, 对于参考时期和未来时期的热浪特征, 本文都选取了20 a 的多模式集合平均(MME)进行分析。

2 结果分析

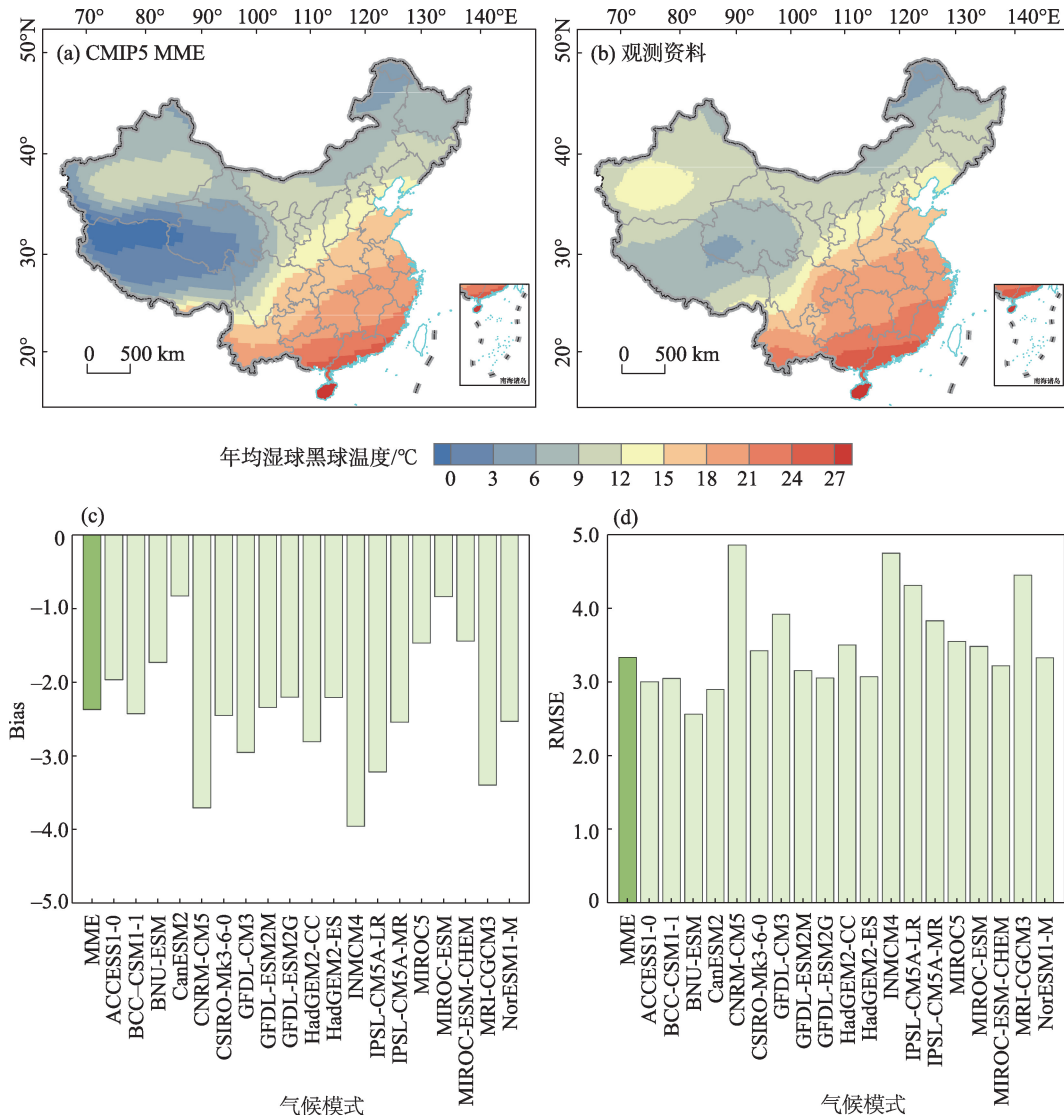
2.1 模式模拟结果分析

在分析未来热浪特征变化之前, 本文首先评估了19个气候模式的模拟能力。总体来说模式能够较好模拟出中国地区参考时期内年均 W (以下简称 \bar{W}_a) 的分布特点(图1), 尤其体现在高、低值中心和等值线数值分布, 但模式模拟结果在新疆和青藏高

原地区略低于观测资料计算结果, 这与全球气候模式对于复杂下垫面物理特性的反映存在局限性有很大关系^[33]。此外, 观测资料本身也存在不确定性, 如青藏高原地区大部分气象台站位于海拔较低的河谷地区, 观测数据的代表性较差。从中国地区平均 \bar{W}_a 来看, MME 与观测计算结果的偏差(Bias)为 -2.37 °C, 二者之间的均方根误差(RMSE)为 3.33 °C, 造成偏差的主要原因是新疆和青藏高原地区的模拟误差, 不同模式的计算结果见图1。

2.2 热浪日数

热浪日数表示的是一年内发生的所有热浪事件的总天数。从图2可以发现参考时期全国所有地区的年均热浪日数都低于30 d, 3个RCP情景下未来时期的年均热浪日数都表现为增加趋势, 尤其是高排放情景RCP8.5情景下增加幅度更为显著。RCP2.6情景下, 中国大部分地区未来时期的年均热浪日数基本在30~60 d, 西南和华南部分地区超过了60 d。RCP4.5情景下, 中国北方地区的年均热浪日数多低于60 d, 西南、华南和长江中下游大部分地区的热浪日数为60~90 d, 云南、广西、广东和福建部分地区的年均热浪日数已经超过90 d, 海南省年均热浪日数最高(大于120 d)。RCP8.5情景下, 年均热浪日数的整体分布趋势与RCP4.5情景下的分



注: 本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作, 底图无修改。下同。

图1 参考时期 $\bar{w}_{\text{年}}$ 的空间分布(CMIP5模式集合平均、气象站点资料插值结果)及二者之间的平均偏差和平均均方根误差

Fig.1 Spatial distribution of \bar{w}_{year} during the reference period from MME of CMIP5 historical runs (a), interpolation of meteorological station data (b), area mean bias (c), and RMSE (d)

布类似,但是热浪日数明显更多,北方地区的年均热浪日数基本为60~90 d,新疆西部达到了90~120 d,西南、华南和长江中下游大部分地区的热浪日数也达到了90~120 d,云南、广西、广东和海南部分地区的热浪日数已经超过150 d,最高值出现在海南,约为183 d。多模式模拟数据计算结果表明(图3),参考时期中国地区年平均共遭遇14 d的热浪, RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下未来时期中国年平均热浪总日数为48 d、59 d和93 d,分别是参考时期热浪日数的3.4倍、4.2倍和6.6倍。

2.3 热浪强度

除了持续时间,热浪事件的强度大小对热浪造

成危害的影响也十分重要。相关研究表明,高温热浪的炎热程度及持续时间比瞬时最高气温对人体死亡率的影响更显著^[34]。本文用一年内所有热浪事件中 $\bar{w}_{\text{日}}$ 的最大值来表征该地区该年的热浪强度。结果表明,不论是参考时期还是未来时期的年均热浪强度,基本都有从东向西和从南向北递减的空间分布趋势(图4)。参考时期华南、长江中下游以及部分西南和华北地区的年均热浪强度为30~35 °C,东北和部分西北及西南地区的热浪强度为25~30 °C,新疆部分地区、甘肃、四川中部和云南北部为20~25 °C,青藏高原地区年均热浪强度基本低于15 °C。RCP2.6情景下中国的年均热浪强度分布基本和参

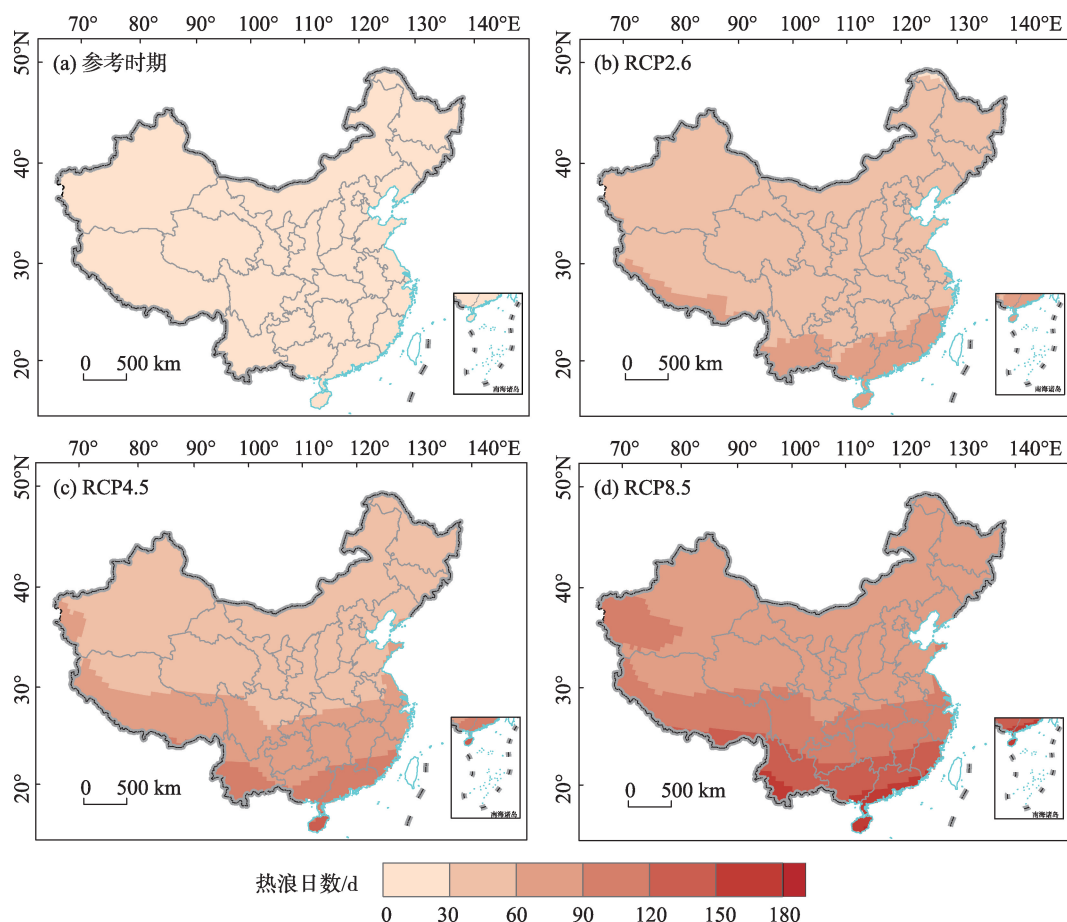


图2 参考时期和未来时期3个RCP情景下年均热浪日数的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of heatwave days per year during the reference period and the future period under the three RCP scenarios

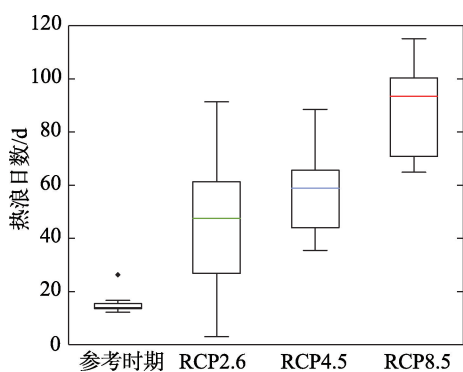


图3 参考时期和未来时期3个RCP情景下中国平均年均热浪日数

Fig.3 Number of annual mean heatwave days in China during the reference period and the future period under the three RCP scenarios

考时期一致,但是出现了超过了 35°C 的热浪强度,主要分布在山东、安徽、湖北及周边地区、广西和广东南部交界处和海南省,此外,热浪强度在 $30\sim 35^{\circ}\text{C}$ 这一等级的分布范围也扩大到了东北和部分西北

地区。RCP4.5情景下最高等级的2个热浪强度范围出现向周围地区扩大的趋势,最低等级的热浪强度范围在不断缩小。RCP8.5情景下热浪强度等级最低的青藏高原地区,强度也达到 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$,热浪强度为 $30\sim 35^{\circ}\text{C}$ 的分布范围已经延伸至整个内蒙古和部分新疆地区,而长江中下游、华南及部分西南和华北地区的年均热浪强度已超过 35°C ,甚至连东北地区也出现了热浪强度超过 35°C 的趋势。多模式计算结果表明(图5),参考时期全国平均热浪强度大约为 24.3°C ,RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下的平均年均热浪度相对于参考时期分别升高了 1.3 、 2.7 和 4.9°C 。

3 结论与讨论

本文基于综合考虑气温和湿度要素影响的热胁迫指数——湿球黑球温度(WBGT)指数来研究未来时期不同排放情景下中国地区热浪特征的空间

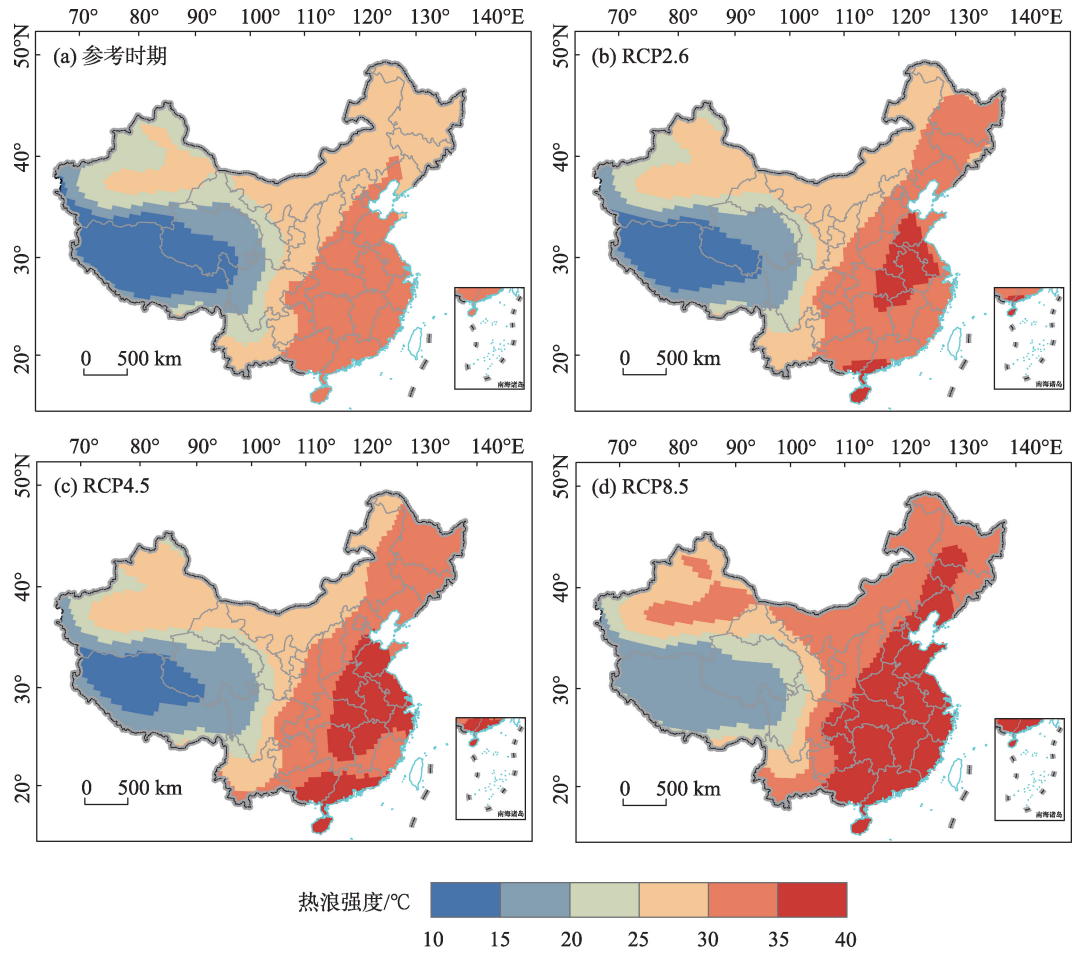


图4 参考时期和未来时期3个RCP情景下热浪强度的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of heatwave intensity during the reference period and the future period under the three RCP scenarios

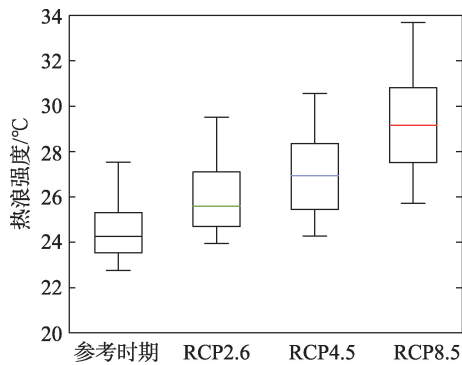


图5 参考时期和未来时期3个RCP情景下中国平均热浪强度

Fig.5 Average heat wave intensity in China during the reference period and the future period under the three RCP scenarios

分布和变化,结果表明,从热浪日数和强度这两个热浪特征来看,华南、长江中下游以及少数西南地区是未来时期可能发生热浪最严重的地区,这些地区

未来需要重点加强高温预警和资源调配等风险防范措施。虽然青藏高原地区的热浪强度等级最低,但是作为全球气候变化影响的敏感地区^[35],未来时期青藏高原地区热浪日数的增加幅度较为显著,因此也需要格外关注和研究未来热浪增加对高原环境和生态系统造成的影响。

虽然目前已经有不少研究探讨了未来不同情景下中国地区高温热浪的特征及其变化,但绝大多数研究只考虑温度这个单一要素,比如贺山峰等^[36]选取高温日数和热浪日数2个指标,对未来中国高温致灾危险性时空格局进行了预估;李柔珂^[37]利用CMIP5多模式温度模拟数据计算年均日最高气温最高值以及高温日数,并预估和分析了RCP4.5和RCP8.5情景下中国21世纪这两个高温指数不同重现期的分布;徐新创等^[38]分析了不同排放情景下未来中国的年高温日、强危害性高温日、热浪日数及高温极值的时空变化。这些研究结果都显示中国

西北地区尤其是西北西部地区是极端高温热浪指数的高值区,未来出现高温致灾的可能性最大。然而本文除了考虑温度要素,也同时考虑了湿度对极端高温事件的影响,更加关注那些直接影响人体热舒适感受和生命健康的热浪事件,因此虽然新疆地区的极端温度高,但较低的相对湿度一定程度上减小了WBGT指数,而暖湿的华南和长江中下游地区将极有可能成为未来中国热浪对人体健康影响最严重的地区。

当环境WBGT指数越接近人体皮肤温度时,人体的散热就变得越困难^[27]。本文对热浪的定义考虑了温度和湿度二者的协同影响,以热浪强度为例,未来时期RCP8.5情景下中国东部和南部地区的年均热浪最高 \bar{W}_d 已经超过35℃,最大值甚至达到40℃左右,已经高于人体最佳核心温度(约37℃),可以预计这些地区的日最高 W 将远超过37℃,这必然会严重影响人体健康尤其是户外劳动力的健康和生命安全。Coffel等^[13]基于湿球温度评估了未来全球热浪的人口暴露度,结果显示考虑湿度要素的年均热浪日数在30°N~30°S内的大部分地区为25~250 d,但如不考虑湿度影响则只有25~150 d。本文识别出未来热浪对人可能影响最严重的地区大多在中国华南和东部等湿度较高的地区,与Coffel等^[13]研究结果中中国热浪日数的高值区比较一致,表明如果不考虑湿度要素的作用,那么将会低估未来热浪在中国一些高湿度地区的强度和影响。

目前对人体热舒适没有一个统一量化的方法,有许多热胁迫指数可以用来评估热舒适性,本文仅选取了其中一个指数即WBGT来识别自然条件下可能对人体产生影响的热浪。但人体热舒适性不仅取决于外界自然因素,如温度和湿度,也受到诸如年龄、性别、健康状况、衣着、个体耐受性等因素的影响^[14]。本文仅仅考虑未来情景下,综合温度和湿度协同作用来衡量自然条件下热浪本身的特征,并未考虑承灾体暴露的数量和脆弱性,未来可以在本文研究的基础上,结合暴露度、脆弱性进一步开展热浪风险的相关研究。

参考文献(References)

- [1] Cowan T, Purich A, Perkins S, et al. More frequent, longer, and hotter heat waves for Australia in the twenty-first century [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27: 5851-5871.
- [2] Grize L, Huss A, Thommen O, et al. Heat wave 2003 and mortality in Switzerland [J]. *Swiss Medical Weekly*, 2015, 135(13-14): 200-205.
- [3] Spinoni J, Lakatos M, Szentimrey T, et al. Heat and cold waves trends in the Carpathian region from 1961-2010 [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(4): 4197-4209.
- [4] Anderson G B, Bell M L. Heat waves in the United States: Mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U.S. communities [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, 119(2): 210-218.
- [5] Lau N C, Nath M J. A model study of heat waves over North America: Meteorological aspects and projections for the twenty-first century [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25: 4761-4784.
- [6] 郑雪梅, 王怡, 吴小影, 等. 近20年福建省沿海与内陆城市高温热浪脆弱性比较 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(10): 1197-1205. [Zheng Xuemei, Wang Yi, Wu Xiaoying, et al. Comparison of heat wave vulnerability between coastal and inland cities of Fujian Province in the past 20 years. *Progress in Geography*, 2016, 35(10): 1197-1205.]
- [7] Basu R, Samet J M. Relation between elevated ambient temperature and mortality: A review of the epidemiologic evidence [J]. *Epidemiologic Reviews*, 2002, 24(2): 190-202.
- [8] Kovats R S, Hajat S. Heat stress and public health: A critical review [J]. *Annual Review of Public Health*, 2008, 29: 41-55.
- [9] Sherwood S C, Huber M. An adaptability limit to climate change due to heat stress [J]. *PNAS*, 2010, 107(21): 9552-9555.
- [10] Ostro B D, Roth L A, Green R S, et al. Estimating the mortality effect of the July 2006 California heat wave [J]. *Environmental Research*, 2009, 109(5): 614-619.
- [11] Mora C, Dousset B, Caldwell I R, et al. Global risk of deadly heat [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 501-506.
- [12] Russo S, Sillmann J, Sterl A. Humid heat waves at different warming levels [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 7477. doi: 10.1038/s41598-017-07536-7.
- [13] Coffel E D, Horton R M, Sherbinin A D. Temperature and humidity based projections of a rapid rise in global heat stress exposure during the 21st century [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13: 014001. doi: 10.1088/1748-9326/aaa00e.
- [14] Willett K M, Sherwood S. Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature [J]. *International of Journal of Climatology*, 2012, 32(2): 161-177.
- [15] Pal J S, Eltahir E A B. Future temperature in Southwest

- Asia projected to exceed a threshold for human adaptability [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 6: 197-200.
- [16] Lee S M, Min S K. Heat stress changes over East Asia under 1.5 °C and 2.0 °C global warming targets [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31: 2819-2831.
- [17] Kjellstrom T, Kovats R S, Lloyd S J, et al. The direct impact of climate change on regional labour productivity [J]. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 2009, 64(4): 217-227.
- [18] Dunne J P, Stouffer R J, John J G. Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 563-566.
- [19] 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 [J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(1): 15-20. [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.]
- [20] 高荣, 王凌, 高歌. 1956—2006年中国高温日数的变化趋势 [J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(3): 177-181. [Gao Rong, Wang Ling, Gao Ge. The trend of variation in high temperature days during 1956–2006 in China. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(3): 177-181.]
- [21] 周天军, 李立娟, 李红梅. 气候变化的归因与预估模拟研究 [J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 906-922. [Zhou Tianjun, Li Lijuan, Li Hongmei. Progress in climate change attribution and projection studies. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 906-922.]
- [22] 姜大膀, 张颖, 孙建奇. 中国地区1~3 °C变暖的集合预估分析 [J]. *科学通报*, 2009, 54(24): 3870-3877. [Jiang Dabang, Zhang Ying, Sun Jianqi. Ensemble projection of 1–3 °C warming in China. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(24): 3870-3977.]
- [23] Liu J W, Xu H M, Luo J J, et al. Distinctive evolutions of Eurasian warming and extreme events before and after global warming would stabilize at 1.5 °C [J]. *Earth's Future*, 2019, 7: 151-161.
- [24] New M, Hulme M, Jones P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: development of 1901–1996 monthly grids of terrestrial surface climate [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13: 2217-2238.
- [25] Willett K M, Jones N P, Throne P W, et al. A comparison of large-scale changes in surface humidity over land in observations and CMIP3 general circulation models [J]. *Environmental Research Letters*, 2010, 5: 1-13.
- [26] Fischer E, Knutti R. Robust projections of combined humidity and temperature extremes [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 126-130.
- [27] Knutson T R, Ploshay J J. Detection of anthropogenic influence on a summertime heat stress index [J]. *Climatic Change*, 2016, 138: 25-39.
- [28] Chen X, Li N, Liu J W, et al. Global heat wave hazard considering humidity effects during the 21st century [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(9): 1513. doi:10.3390/ijerph16091513.
- [29] Budd G M. Wet-bulb globe temperature (WBGT): Its history and its limitations [J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2008, 11(1): 20-32.
- [30] ISO. Hot environments: Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT index [S]. International Organization for Standardization 7243, 1989.
- [31] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: 1042-1063.
- [32] Perkins S E, Alexander L V. On the measurement of heat waves [J]. *Journal of Climate*, 2012, 26(13): 4500-4517.
- [33] 张艳武, 张莉, 徐影. CMIP5模式对中国地区气温模拟能力评估与预估 [J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(1): 10-19. [Zhang Yanwu, Zhang Li, Xu Ying. Simulations and projections of the surface air temperature in China by CMIP5 models. *Advances in Climate Change Research*, 2016, 12(1): 10-19.]
- [34] 谈建国, 黄家鑫. 热浪对人体健康的影响及其研究方法 [J]. *气候与环境研究*, 2004, 9(4): 680-686. [Tan Jianguo, Huang Jiaxin. The impacts of heat waves on human health and its research methods. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 9(4): 680-686.]
- [35] 姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(5): 459-464. [Yao Tandong, Zhu Liping. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5): 459-464.]
- [36] 贺山峰, 戴尔卓, 葛全胜, 等. 中国高温致灾危险性时空格局预估 [J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(2): 91-97. [He Shanfeng, Dai Erfu, Ge Quansheng, et al. Pre-estimation of spatiotemporal pattern of extreme heat hazard in China. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19(2): 91-97.]
- [37] 李柔珂. CMIP5模式对气候变化背景下中国地区未来气候灾害风险预估研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Li Rouke. Projection of climate hazard and risk in China considering climate change by CMIP5 models. Lanzhou, China: Lanzhou University, 2017.]
- [38] 徐新创, 闫军辉, 刘光旭, 等. CMIP 5不同典型浓度情景下中国极端高温的时空变化 [J]. *华中师范大学学报*

(自然科学版), 2017, 51(4): 548-554. [Xu Xinchuang, Yan Junhui, Liu Guangxu, et al. Temporal and spatial variations of extremely high temperature in China under

different emission scenarios of CMIP 5. Journal of Hua-Zhong Normal University (Natural Sciences), 2017, 51 (4): 548-554.]

Projection of heatwaves by the combined impact of humidity and temperature in China

CHEN Xi^{1,2}, LI Ning^{1,2*}, HUANG Chengfang^{1,2}, LIU Jiawei³, ZHANG Zhengtao⁴

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD) / Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME) / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Humidity is a significant factor contributing to heat stress but it is not fully considered in studies quantifying heat stress or in heat risk assessment. It is directly related to human body heat exchange and the occurrence of consecutive hot and humid days during a heatwave can strongly affect human health. In this study, wet-bulb globe temperature (WBGT) considering both temperature and humidity effects was utilized as a heat index to define heatwaves. Using daily mean air temperature and relative humidity data from 824 meteorological stations for the reference period (1986–2005) and the corresponding CMIP5 multi-model simulations, spatial distribution characteristics and change of heatwaves that would occur in China's mainland were analyzed for the future period (2076–2095) under different greenhouse gas emission scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5). Our analysis suggests that the average number of heatwave days in a year would be 3.4 and 6.6 times of that for the reference period under the most aggressive mitigation scenario (RCP2.6) and high emission scenario (RCP8.5), respectively. Average heatwave amplitude (as defined by the peak daily WBGT in the hottest heatwave in a year) would increase 4.9 °C under RCP8.5 as opposed to about 1.6 °C under RCP2.6. In the future period, the highest annual heatwave amplitude of eastern and southern China would reach 40 °C under the RCP8.5 scenario, which is higher than the optimum body core temperature (near 37 °C). Although the Tibet Plateau has low heat amplitude, increase in the annual total heatwave days is rather significant in the future period. Heatwaves in the future would be most serious over southern China, the middle and lower reaches of the Yangtze River and parts of southwestern China considering both temperature and humidity effects on human thermal comfort. It suggests that without taking surface air humidity into consideration, there could likely be an underestimation of intensity and influences of heatwaves over areas with high humidity (such as southern and eastern China).

Keywords: heatwave; relative humidity; future scenarios; wet-bulb globe temperature (WBGT); China