

基于 CMIP6 多模式集合的中国洪水-热浪复合极端事件特征预测

武传号^{1,2}, 逯家宝³, 周 君⁴, 黎梓涛³

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 暨南大学环境与气候学院, 广东 广州 511443; 4. 暨南大学生命科学技术学院, 广东 广州 510632)

摘要:基于 14 个 CMIP6 全球气候模式降尺度模拟结果, 预测了未来 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下中国洪水-热浪复合极端(SFHE)事件及人口暴露度的时空变化特征, 量化了气候效应、人口效应以及两者共同作用效应对人口暴露度的相对影响。结果表明: 气候变暖加剧了未来华东和华南地区 SFHE 事件发生的风险, 并导致 SFHE 事件历时及土地暴露度增长; SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下 21 世纪末中国 SFHE 事件年均频次与历史基准期(1961—2014 年)相比, 预计分别增加 0.13、0.28、0.44 次, SFHE 事件平均历时分别增长 1.4、3.9、8.1 d, 年土地暴露度分别增加 6.0%、13.8%、18.3%, 而洪水、热浪平均间隔分别缩短 0.16、0.37、0.75 d, SFHE 事件突发性更强; 未来 SFHE 事件人口暴露度增加的区域主要集中在中国东部和南部地区, 由气候变化导致人口暴露度增加的效应逐渐增强。

关键词:洪水-热浪复合极端事件; CMIP6; 气候变化; 人口暴露度; 中国

中图分类号:TV124 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)03-0020-11

Characteristic projection of successive flood-heatwave extreme events in China based on CMIP6 multi-model ensembles//WU Chuanhao^{1,2}, LU Jiabao³, ZHOU Jun⁴, LI Zitao³(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Environment and Climate, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 4. College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Based on the downscaling simulations of 14 global climate models from CMIP6, the spatiotemporal changes and population exposure degree in successive flood-heatwave extreme (SFHE) events in China under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios were projected. The relative effects of climate and population and their combined effects on the population exposure degree were quantified. The results indicate that climate warming exacerbates the risk of SFHE events in eastern and southern China in the future, and leads to the increases in the duration and land exposure degree of SFHE events. Overall, by the end of the 21st century, under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios, the annual average frequency of SFHE events in China is expected to increase by 0.13, 0.28, and 0.44 times, respectively, relative to baseline period from 1961 to 2014. The average duration of SFHE events is expected to increase by 1.4, 3.9, and 8.1 d, respectively, the annual land exposure degree is expected to increase by 6.0%, 13.8%, and 18.3%, respectively, while the average interval between flood and heatwave is expected to decrease by 0.16, 0.37, and 0.75 d, respectively, indicating a stronger suddenness of SFHE events. The areas with a significant increase of the population exposure degree are mainly concentrated in eastern and southern China, and the effect of climate change on the increase of population exposure degree is gradually strengthening over time.

Key words: successive flood-heatwave extreme event; CMIP6; climate change; population exposure degree; China

随着气候变暖和人类活动加剧,热浪、洪水等极端灾害事件在全球各地区频发,严重威胁着人类健康以及农业、经济和生态环境的安全^[1-5]。近年来,由两者叠加形成的洪水-热浪复合极端(successive

flood-heatwave extreme, SFHE)事件受到社会的广泛关注^[6]。SFHE 事件主要表现在短时间内(如 7 d)连续发生洪水和热浪灾害^[7],与单一灾害相比,这种复合灾害因其突发性与灾害叠加性,加剧了人类

社会和生态系统的灾害风险^[8-11]。1960 年以来,由于高温热浪和极端降水事件的增加,SFHE 事件发生的风险不断上升^[12]。例如:2018 年日本遭受东亚夏季风周期性活动引发的 SFHE 事件,造成 300 人死亡和 100 亿美元经济损失^[13];2020 年 6—7 月中国连续发生了洪涝和热浪事件,洪水造成 219 人死亡和失踪,直接经济损失 1 789.6 亿元,热浪则导致华南地区大范围干旱,对农业造成了严重影响^[14]。

近年来 SFHE 事件逐渐受到国内外学者的关注^[6,15-17]。Chen 等^[7]基于 2 474 个气象站点数据探讨了 1961—2018 年中国不同地区 SFHE 事件的时空变化特征,结果发现,2000 年以后中国南部、西北和东北地区 SFHE 事件发生频率增加了 5~10 倍;Khan 等^[18]研究发现 1950—2010 年美国中西部和北部高温降水极端复合事件风险升高;刘慕嘉等^[19]采用加权平均降水指数和相对阈值法,分析了 1961—2020 年中国不同地区 SFHE 事件的时空变化特征,发现长江、东南诸河、珠江及内陆河等流域的 SFHE 事件风险较其他地区偏高(最高达 33 次)。在预测方面,Gu 等^[6]基于 21 个 CMIP6 气候模式和 5 个水文模型定量评估了未来全球 SFHE 事件的变化特征,发现到 21 世纪末 SFHE 事件的暴露面积将增加 2~6 倍,且极端热浪是 SFHE 事件加剧的主导因素,特别是在热带地区;Liao 等^[17]采用 CMIP6 全球气候模式预测了 2006—2100 年中国 SFHE 事件的趋势,结果表明,到 21 世纪末中国约 90% 的地区将受到 SFHE 事件的影响。

目前大多研究主要关注 SFHE 事件频次的变化特征,很少关注其他特征,如历时、洪水和热浪事件间隔(interval between flood and heatwave, IFH)、暴露度,深入解析这些特征在未来情景下的时空变化模式,对于全面了解 SFHE 事件对气候变暖的响应机制具有重要的科学意义。此外,针对 SFHE 事件人口暴露度评估,大部分研究只关注 SFHE 事件对人口总量的风险,而忽略了气候变化、人口变化及两者共同作用的影响。

鉴于此,本文以中国及九大流域为研究区,基于 CMIP6 气候模式及观测数据,综合运用多种统计模型和方法,系统评估未来时期不同气候变化情景下中国九大流域 SFHE 事件特征(历时、IFH、暴露度)的变化趋势及不确定性范围,定量解析未来气候效应、人口效应以及两者共同作用效应对 SFHE 事件人口暴露度变化的相对影响,以期防灾减灾规划、灾害适应策略和预防措施制定提供科学参考。九大流域空间分布如图 1 所示,图中 I~IX 分别表示内

陆河流域、松辽流域、海河流域、黄河流域、淮河流域、长江流域、东南诸河流域、珠江流域、西南诸河流域。本文地图均基于审图号为 GS(2020)4630 号的标准地图制作。

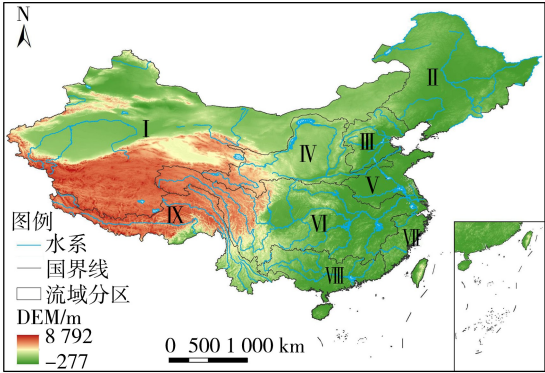


图 1 中国九大流域空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of nine major river basins in China

1 数据来源

日最高、最低气温和径流预测数据来自 CMIP6 的 14 个全球气候模式,包括 1961—2014 年历史基准期和 2015—2100 年 3 种共享社会经济路径情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5)的 r1i1p1f1(表示模型的第一次运行,使用第一种初始条件、第一种物理模式和第一种强迫模式)模拟结果。14 个 CMIP6 全球气候模式的基本信息如表 1 所示。

表 1 14 个 CMIP6 全球气候模式基本信息
Table 1 Basic information of 14 CMIP6 global climate models

序号	模式名称	覆盖范围 (经度×纬度)/(°)	机构/国家
1	ACCESS-CM2	192×144	CSIRO-ARCCSS/澳大利亚
2	ACCESS-ESM1-5	192×145	CSIRO/澳大利亚
3	BCC-CSM2-MR	320×160	BCC/中国
4	CanESM5	128×64	CCCma/加拿大
5	CMCC-ESM2	288×192	CMCC/意大利
6	EC-Earth3	362×292	EC-Earth-Consortium/欧盟
7	INM-CM4-8	180×120	INM/俄罗斯
8	INM-CM5-0	180×120	INM/俄罗斯
9	IPSL-CM6A-LR	144×143	IPSL/法国
10	MIROC6	256×128	MIROC/日本
11	MPI-ESM1-2-HR	384×192	MPI-M/德国
12	MPI-ESM1-2-LR	192×96	MPI-M/德国
13	MRI-ESM2-0	320×160	MRI/日本
14	NorESM2-LM	144×96	NCC/挪威

日最高和最低气温观测数据来自中国科学院气候变化研究中心 CN05 格点化数据集^[20-21]。该数据集基于中国 2 400 多个台站的观测资料,使用距平逼近法,由气候场和距平场分别插值后叠加得到^[21]。日径流数据来自 GLDAS-2.0 驱动 CLSM

(catchment land surface model) 生成的数据集^[22] (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GLDAS_CLSM025_D_2.0/), CLSM 模拟由陆地-大气相互作用驱动, 已被广泛应用于洪水研究^[23-24], 该数据集主要用于校准 CMIP6 气候模式下模拟的径流数据。以上两种数据的研究时段均为 1961—2014 年。

人口数据来自国家大气研究中心的人口预测数据集^[25] (<https://www.cgd.ucar.edu/>)。该数据集基于 2000 年人口数据, 与 5 个共享社会经济路径 (SSP1~5) 相结合, 以 10 a 为时间步长, 涵盖了 2000—2100 年的人口预测情景。本文以 2000 年人口数据为历史基准期数据, 预测 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下 2070—2100 年人口数据, 分析未来 SFHE 事件人口暴露度的变化特征。研究之前, 采用线性插值方法, 将人口数据和 CMIP6 气候模式下数据统一插值为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的空间分辨率 (与 CN05 格点数据一致)。

2 研究方法

2.1 SFHE 事件识别

热浪和洪水事件均通过相对阈值方法在网格尺度上进行识别, 其中热浪事件定义为日最高或最低气温至少连续 3 d 超过历史基准期 (1961—2014 年) 的第 95 百分位数^[26]; 洪水事件定义为日径流深至少持续 1 d 超过历史基准期 (1961—2014 年) 的第 99 百分位数^[27]。

SFHE 事件指 7 d 内连续发生洪水和热浪事件^[7]。本文采用事件巧合率分析的方法^[28], 在网格尺度上识别 SFHE 事件, 计算公式为

$$F = \sum_{j=1}^{N_F} \theta \left[\sum_{i=1}^{N_H} I(t_{Hi} - t_{Fj}) \right] \quad (1)$$

其中 $\theta(x) = \begin{cases} 0 & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}$ $I(x) = \begin{cases} 0 & x \notin [0, \Delta T] \\ 1 & x \in [0, \Delta T] \end{cases}$

式中: F 为 SFHE 事件频次; t_{Hi} ($i = 1, 2, \dots, N_H$)、 t_{Fj} ($j = 1, 2, \dots, N_F$) 分别为热浪和洪水事件的序列集; N_H 、 N_F 分别为洪水和热浪事件的频次; $\Delta T = 7$ d, 如 7 d 内发生多场洪水或热浪事件, 则只考虑第一次洪水或热浪事件, 以避免重复计算^[7]。

文中 SFHE 事件频次为在特定时间段内发生 SFHE 事件的总次数, 年土地暴露度为一年内至少发生一次 SFHE 事件的网格数在总网格数中的占比, 总历时为 SFHE 事件从开始到结束的持续时间, IFH 为热浪开始和洪水结束日期的时间差。

2.2 气候模式降尺度校准

分位数映射偏差校准是目前应用较为广泛的统计降尺度方法, 该方法基于频率分布, 通过建立模拟

值和观测值之间的传递函数, 对模拟值进行校准^[29-31]。Li 等^[32]在分位数映射偏差校准基础上开发了基于等距累积分布函数匹配 (equidistant cumulative distribution function matching, EDCDFM) 的偏差校准方法, 目前已被证明具有较好的校准效果^[33-35]。本文利用 EDCDFM 方法对 CMIP6 气候模式下模拟的日最高、最低气温数据进行校准^[36]。Delta 方法是美国国家评价中心推荐, 应用于未来气候情景数据的校准方法, 具有计算和操作简便等优势, 目前已被广泛应用于气候模式校准^[29, 37-38]。本文基于 GLDAS-2.0 径流数据, 采用 Delta 方法对 CMIP6 气候模式下模拟的径流数据进行校准。将校准数据分为 1961—1987 年和 1988—2014 年两个时段, 通过 k 折分块交叉验证评估气温和径流校准的准确性^[39-40]。

2.3 人口暴露度

人口暴露度为暴露在 SFHE 事件中的人口数量^[41]。本文以 2000 年的人口数据为历史基准数据, 利用 2070 年、2080 年、2090 年、2100 年的人口预测结果, 计算未来时期 (2070—2100 年) SFHE 事件平均人口暴露度 E_p :

$$E_p = \sum_{i=1}^N D_i P_i / N \quad (2)$$

式中: D_i 为第 i 年发生 SFHE 事件的天数; P_i 为第 i 年人口数量; N 为年数。

进一步将人口暴露度变化归因为气候效应、人口效应和两者共同作用效应^[42]。气候效应是将人口固定在历史基准期水平, 预测气候变化对人口暴露度的影响; 人口效应是将气候固定在历史基准期水平, 预测人口变化对人口暴露度的影响。人口暴露度变化可分解为

$$\Delta E_p = P_1 \Delta C + D_1 \Delta P + \Delta D \Delta P \quad (3)$$

式中: ΔE_p 为人口暴露度变化; D_1 、 P_1 分别为历史基准期 (2000 年) SFHE 事件发生天数和人口数量; ΔD 、 ΔP 分别为未来时期 (2070—2100 年) 相对于历史基准期 SFHE 事件发生天数和人口数量的变化。

3 结果与分析

3.1 CMIP6 多模式校准评估

图 2 为 14 个 CMIP6 全球气候模式下中国日最高和最低气温、日径流深降尺度校准前后的标准化泰勒图, 图中灰色虚线表示集中均方根误差 (centered root mean square error, CRMSE)。从图 2 可以看出, 日最高气温校准前后相对标准差分别为 0.75~1.25 和 0.75~1, 校准前后相关系数均为 0.9~0.99, CRMSE 均约为 0.3; 日最低气温校准后

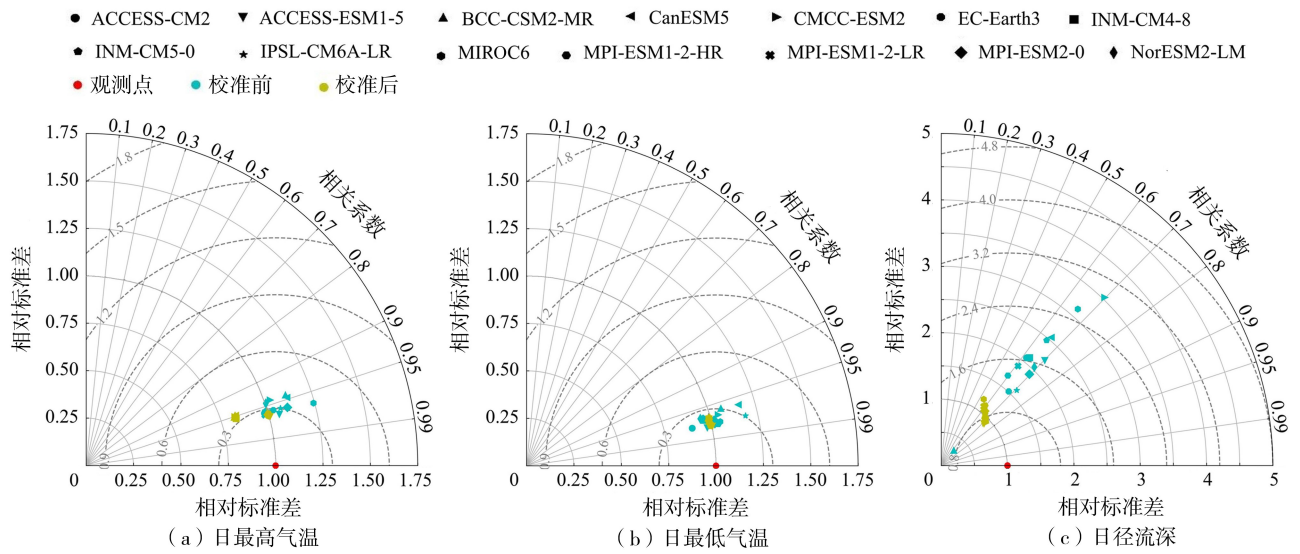


图2 日最高和最低气温、日径流深校准前后的标准化泰勒图

Fig.2 Standardized Taylor plots of daily maximum and minimum temperatures, as well as daily runoff depth before and after bias correction

相对标准差更接近于1,校准前后相关系数均为0.95~0.99,CRMSE均约为0.3;日径流深校准前相对标准差范围为0~4,校准后约为1,CRMSE从校准前的0.8~3.2下降到约0.8。综上,校准后气温模拟值更接近观测值,径流也更接近GLDAS-2.0产品数据,表明校准效果较佳。

从1961—2014年14个CMIP6全球气候模式下中国日最高和最低气温、日径流深校准前后年际变化来看(图3),校准前全球气候模式下模拟的日最高气温存在严重的低估现象,而模拟的日径流深存在严重的高估现象。校准后准确度均得到大幅提升,更接近于观测值。需要指出的是,校准后的结果仍未能较好改善年际波动偏小的现象。

3.2 未来热浪和洪水特征预测

图4为SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下2071—2100年中国热浪特征较历史基准期(1961—2014年)变化的空间分布。从图4(a)~(c)可以看出,3种情景下热浪的频次呈现不同程度

的增加趋势,SSP5-8.5和SSP1-2.6情景下分别增加最多和最少。从空间上看,长江流域上游以及珠江、西南诸河和东南诸河流域的热浪频次增加最为显著,SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下的增幅分别为每10a增加40~70、50~100、60~120次;长江流域中下游以及海河、淮河、松辽和内陆河流域的热浪频次增幅相对较小,SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下每10a分别增加10~40、10~50、10~60次。

从图4(d)~(f)可以看出,热浪历时整体呈现增长的态势,且排放情景越高增幅越显著。SSP5-8.5情景下,内陆河、西南诸河、东南诸河和珠江流域热浪历时增幅相对较大(增幅为14~30d),其他流域的增幅为6~14d;SSP1-2.6和SSP2-4.5情景下热浪历时增幅分别小于10d和14d,其中SSP2-4.5情景下,增幅较大的区域仍集中在内陆河、西南诸河、东南诸河和珠江流域(增幅为8~14d)。

从图4(g)~(i)可以看出,SSP1-2.6情景下,热

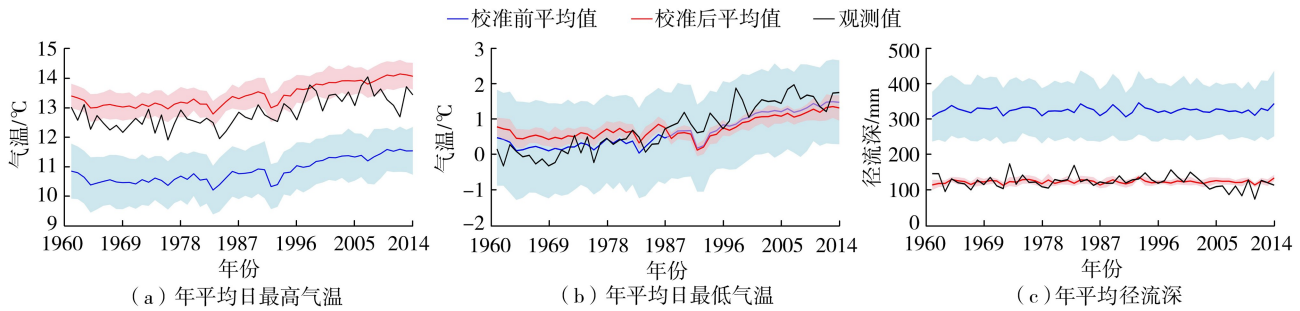


图3 校准前后日最高和最低气温、径流深模拟值与观测值的年际变化对比

Fig.3 Comparison of interannual variability of simulated and observed daily maximum and minimum temperatures, as well as runoff depth before and after bias corrections

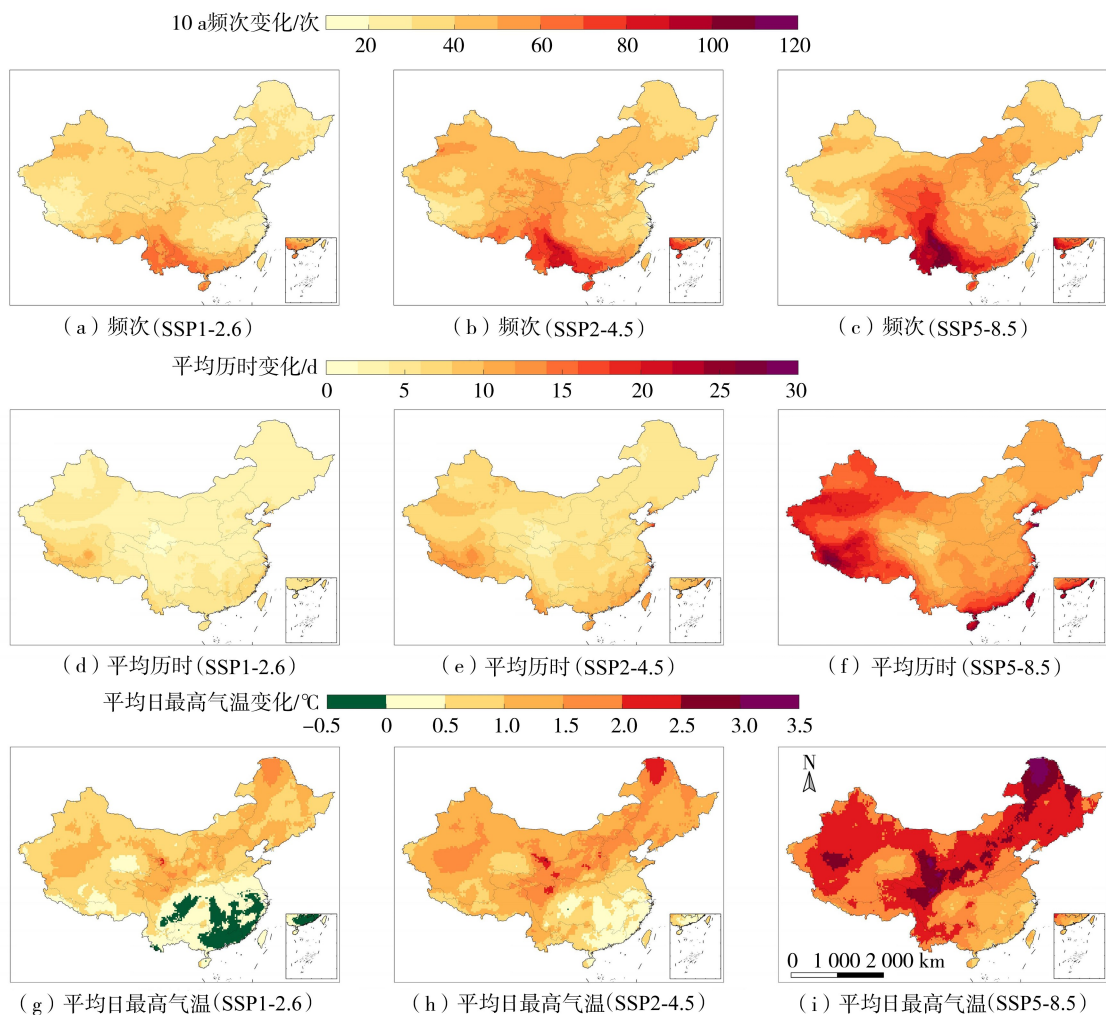


图 4 2071—2100 年热浪特征相对于历史基准期变化的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of changes in heatwave characteristics during 2071-2100 relative to baseline period

浪平均日最高气温在长江中下游、珠江下游和东南诸河流域部分区域呈下降态势(降幅小于 0.5°C),其他地区呈升温态势。SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下,平均日最高气温在内陆河、松辽、黄河、海河、淮河和西南诸河流域以及长江流域西部上升幅度较大,分别为 $1.0\sim 2.5^{\circ}\text{C}$ 和 $1.5\sim 3.5^{\circ}\text{C}$,而长江下游以及珠江和东南诸河流域部分区域上升幅度较小,分别小于 1°C 和 1.5°C 。

图 5 为 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下 2071—2100 年洪水特征较历史基准期(1961—2014 年)变化的空间分布。从图 5(a)~(c)可以看出,SSP1-2.6 和 SSP2-4.5 情景下洪水频次的变化分布大致相同,增加的区域集中在内陆河、松辽、海河和淮河流域(每 10 a 增幅分别小于 30、40 次);减少的区域主要集中在松辽流域东部、黄河流域西南部、长江流域大部分区域以及西南诸河、珠江和东南诸河流域,其中,西南诸河流域和长江流域西南部洪水频次每 10 a 减少 10~20 次。SSP5-8.5 情景下洪水频次在西南诸河流域、长江流域、黄河流域南部、

东南诸河流域和珠江流域北部部分区域呈减少态势(每 10 a 降幅小于 20 次),其他地区均呈增加趋势,其中内陆河流域南部和长江流域西部增加最为显著(每 10 a 增幅为 30~60 次)。

从图 5(d)~(f)可以看出,SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下洪水历时的空间变化分布大致相同,在内陆河流域北部和中部、黄河流域西部、长江流域西部和西南诸河流域西部呈缩短趋势(降幅小于 2 d),其他地区均呈增长趋势,其中内陆河流域南部增长最为显著(增幅小于 3 d)。从图 5(g)~(i)可以看出,平均径流深在内陆河流域中部部分区域、长江流域西部和东部、珠江流域上游以及西南诸河和东南诸河流域呈减少趋势(降幅为 15 mm),其他地区均呈增加趋势,尤其是松辽流域南部以及海河和淮河流域的增幅可达 10~40 mm。

3.3 未来 SFHE 事件特征预测

图 6 为 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下 2071—2100 年 SFHE 事件特征相对历史基准期(1961—2014 年)变化的空间分布。从图 6(a)~

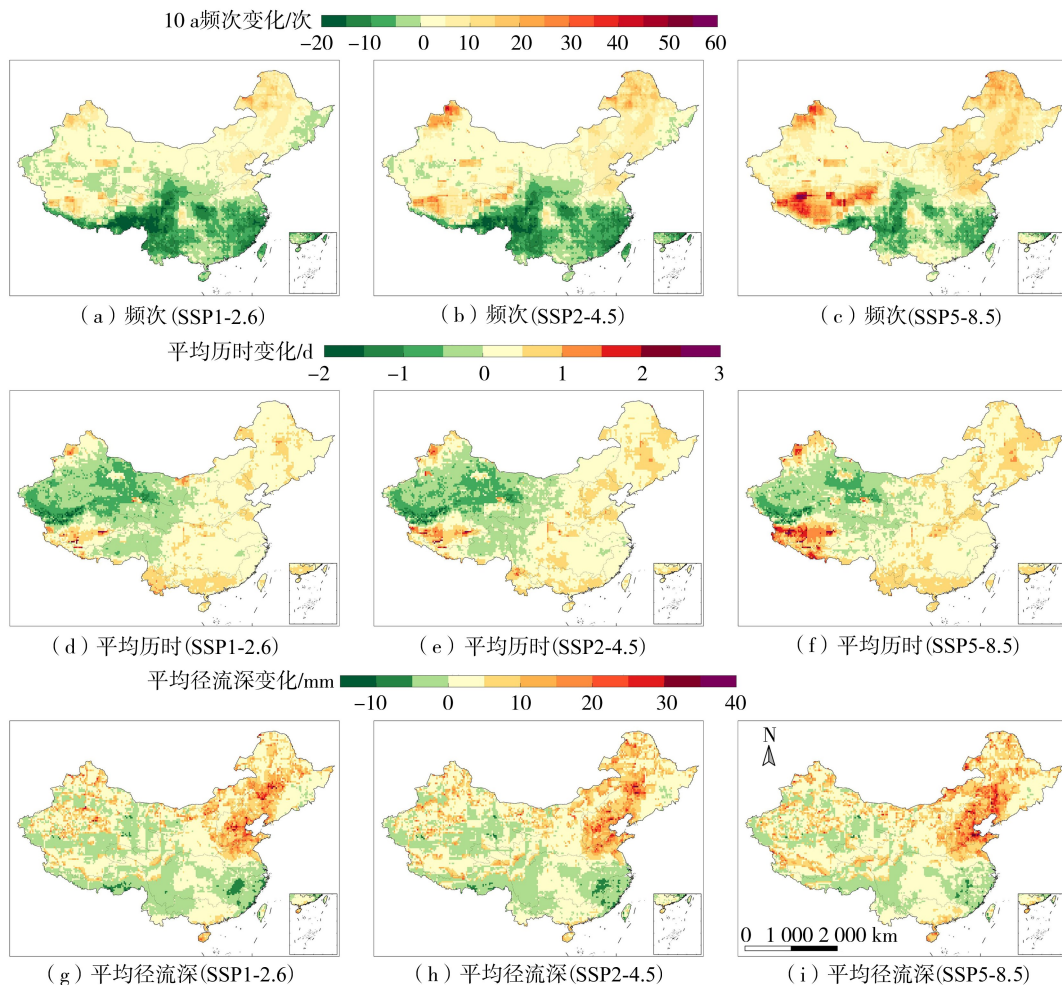


图5 2071—2100 洪水特征相对于历史基准期变化的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of changes in flood characteristics during 2071-2100 relative to baseline period

(c)可以看出,3 种情景下,SFHE 事件频次在华东地区呈增加趋势,而在西部部分区域呈减少态势。SSP1-2.6 情景下,长江流域中部和珠江流域增加较为显著(每 10 a 增幅分别为 2~10、2~8 次),减少的区域主要集中在内陆河流域中部、黄河流域西部、长江流域西部和西南诸河流域西部部分区域(每 10 a 降幅小于 4 次);SSP2-4.5 与 SSP1-2.6 情景大致相同,但 SFHE 事件频次增加的区域呈扩大趋势,增幅加大(每 10 a 增幅小于 14 次);SSP5-8.5 情景下 SFHE 事件频次减少的区域最少,主要集中在内陆河流域部分区域和黄河流域西部小部分区域(每 10 a 降幅小于 2 次),增加最显著的区域集中在西南诸河流域、长江流域中部地区和珠江流域(每 10 a 增幅为 8~16 次)。对比热浪和洪水频次可以发现,SFHE 事件频次增加主要与热浪频次增加有关,而 SFHE 事件频次减少主要由洪水频次减少导致。

从图 6(d)~(f)可以看出,SFHE 事件历时在大部分地区呈增长趋势,而在西部部分区域呈缩短趋势。SSP1-2.6 情景下,历时增长的区域主要集中在华东和华南(增幅小于 15 d),缩短的区域集中在内

陆河流域中部、黄河流域西部、长江流域西部等区域,主要由洪水历时缩短所致;SSP2-4.5 情景下,西南诸河流域南部以及珠江和东南诸河流域历时增长最显著(增幅为 5~20 d);相比其他情景,SSP5-8.5 情景下历时增幅最大,其中增幅较大的地区主要集中在珠江和东南诸河流域(增幅为 15~40 d)。综合对比来看,SFHE 事件历时增长由洪水和热浪历时增长共同导致,但其缩短与洪水历时缩短高度相关。

从图 6(g)~(i)可以看出,IFH 在内陆河流域北部和中部、松辽流域中部部分区域、海河流域西部部分区域、黄河流域中部和西南诸河南部区域呈增长的态势(增幅小于 4 d);在内陆河流域南部部分区域、松辽流域部分区域、黄河流域上游、淮河流域、长江流域、西南诸河流域西部、珠江流域和东南诸河流域呈缩短的态势(降幅小于 4 d),表明未来这些地区 SFHE 事件呈加速爆发趋势。

从时间序列来看(图 7),3 种情景下中国 SFHE 事件频次、历时和年土地暴露度均,且呈显著增加趋势。2040 年后 3 种情景下 SFHE 事件频次的差异逐渐增大,到 2100 年,SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-

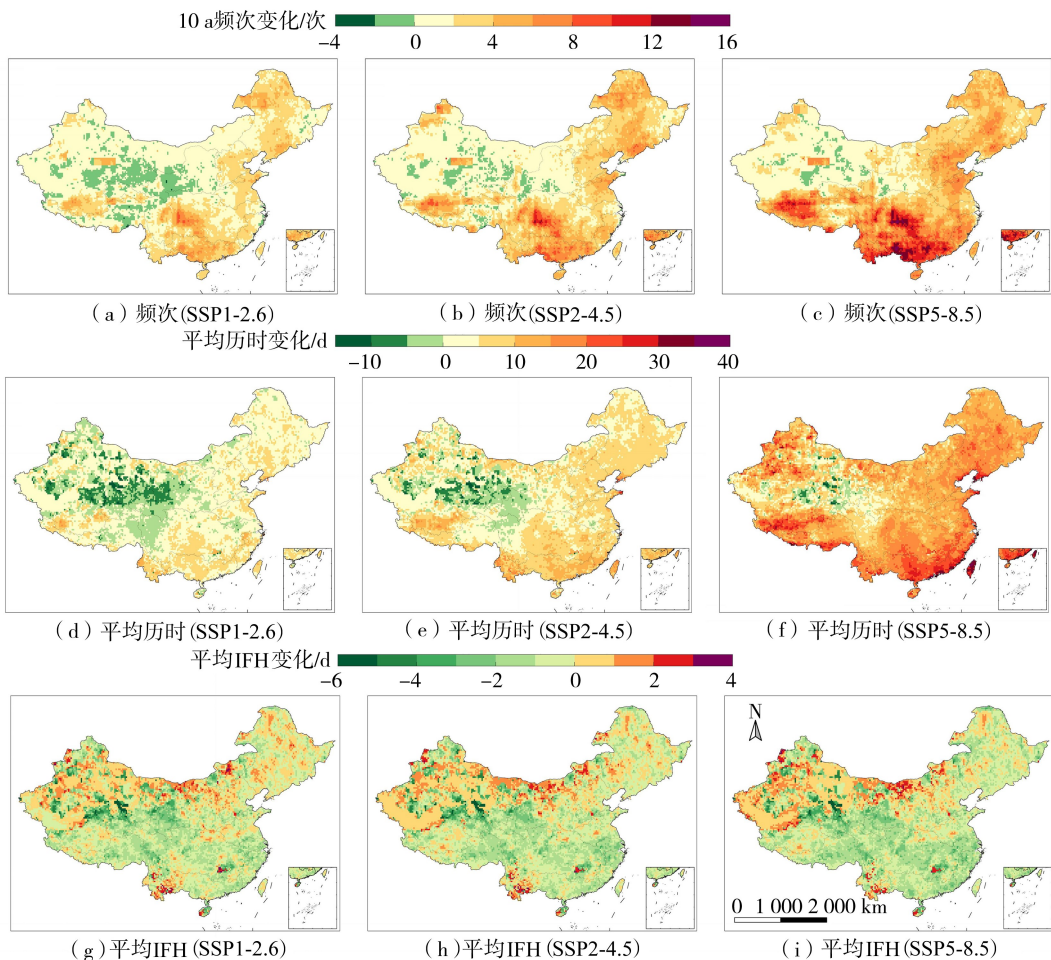


图 6 2071—2100 年 SFHE 事件特征相对于历史基准期变化的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of changes in SFHE event characteristics during 2071-2100 relative to baseline period

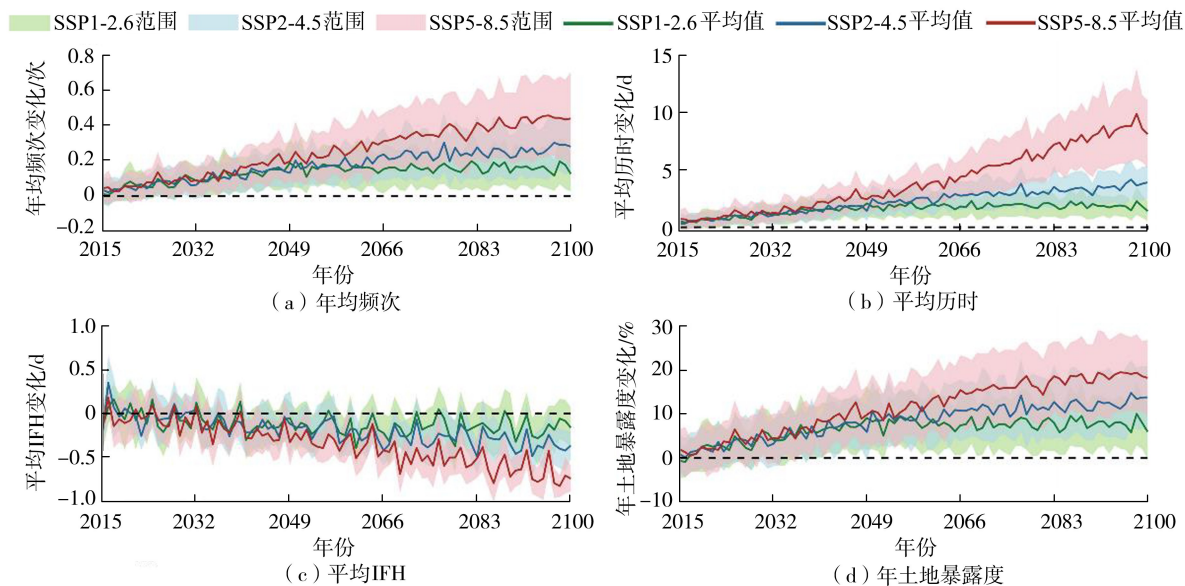


图 7 不同情景下 2015—2100 年 SFHE 事件特征相对于历史基准期的年际变化

Fig. 7 Interannual variability of SFHE event characteristics during 2015-2100 under different scenarios relative to baseline period

8.5 情景下年均频次较历史基准期分别增加 0.13、0.28、0.44 次；3 种情景下平均历时和年土地暴露度在 2050 年前差异较小，但 2050 年后差异逐渐增大，

到 2100 年，SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下平均历时预计分别增长 1.40、3.91、8.14 d，年土地暴露度预计分别增加 6.02%、13.84%、18.27%。相

比之下,平均 IFH 在大部分时间呈缩短态势,预计到 2100 年,SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下分别缩短 0.16、0.37、0.75 d。

3.4 SFHE 事件人口暴露度预测

图 8 为未来时期(2070—2100 年)SFHE 事件人口暴露度相对于历史基准期(2000 年)变化的空间分布。SSP1-2.6 情景下,人口暴露度在中国东部大部分区域呈增加趋势(增幅大于 5 万人·d),而减少的区域主要集中在内陆河流域南部部分区域、黄河流域西部、长江流域西部、西南诸河流域西部(降幅小于 0.25 万人·d);SSP2-4.5 情景下人口暴露度增幅大于 SSP1-2.6 情景,最大增幅可达到 10 万人·d;与其他两种情景相比,SSP5-8.5 情景下人口暴露度增幅最大,增幅较大的区域主要集中在海河流域东南部、淮河流域、长江流域中部和东部、珠江流域和东南诸河流域(增幅最大可达 100 万人·d),人口暴露度减少的区域主要集中在内陆河流域南部、西南诸河流域西部和长江流域西部小部分区域(降幅小人口暴露度变化/(万人·d)

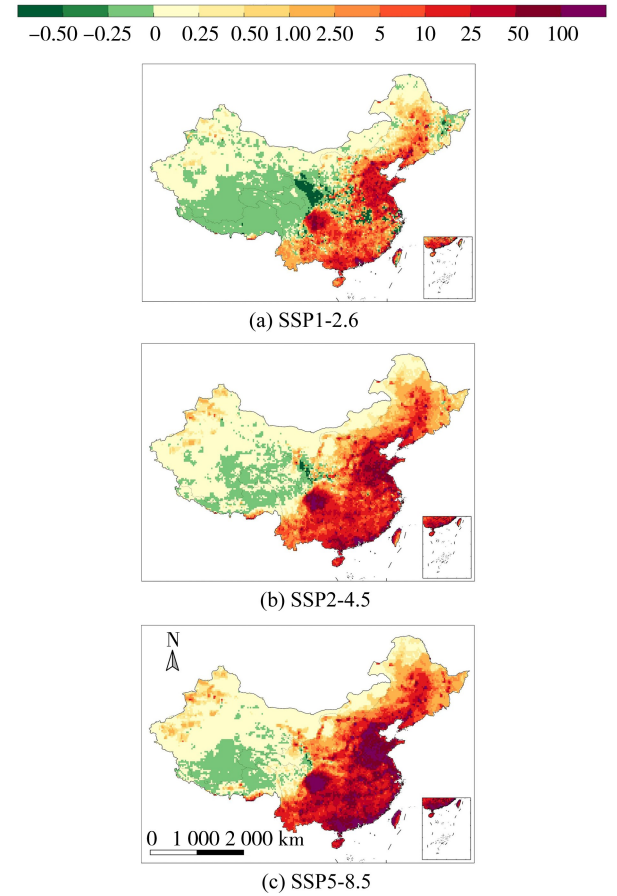


图 8 未来时期(2070—2100)SFHE 事件人口暴露度相对于历史基准期变化的空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of changes in population exposure degree of SFHE events in future period (2070-2100) relative to baseline period

于 0.25 万人·d)。

为了进一步探究中国及九大流域人口暴露度及其驱动因素,对 3 种情景下人口暴露度及其组分变化进行分析,结果如图 9 所示。整体来看,SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下,未来时期(2070—2100 年)中国人口暴露度较历史基准期分别增加 4.36 万、10.32 万、22.43 万人·d;气候效应为正,导致人口暴露度分别增加 9.55 万、16.64 万、38.15 万人·d;人口效应为负,导致人口暴露度分别减少-1.40 万、-1.12 万、-1.37 万人·d;两者的共同作用效应为负,导致人口暴露度分别减少-3.79 万、-5.20 万、-14.36 万人·d,主要由 SFHE 事件历时增长和人口数量减少导致。以上分析表明,随着排放情景升高,人口总暴露度增加主要是气候效应的贡献,但总的负效应影响也在增大。

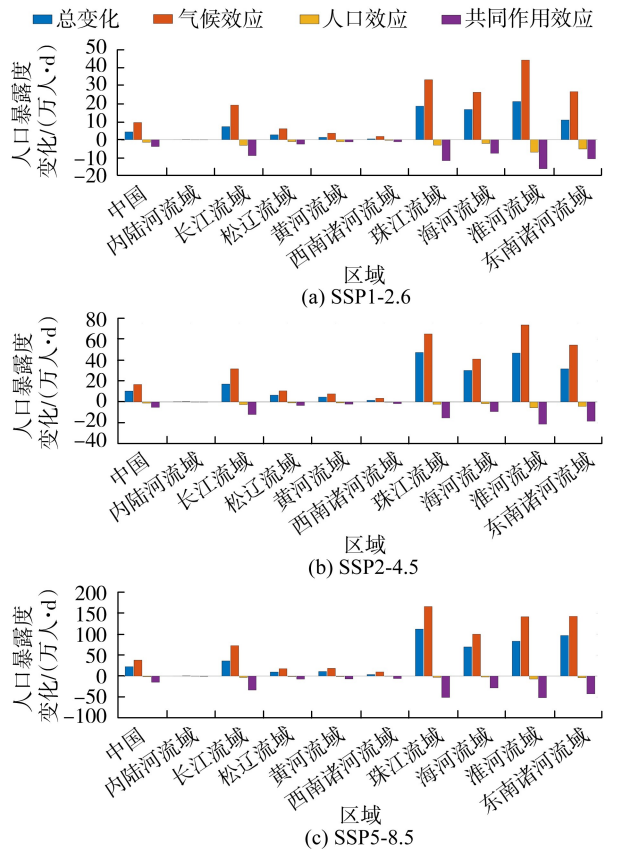


图 9 未来时期 SFHE 事件人口暴露度相对于历史基准期变化的分解

Fig. 9 Decomposition of changes in population exposure degree of SFHE events in future period relative to baseline period

在流域尺度上(图 9),与历史基准期相比较,SSP1-2.6 情景下未来时期人口总暴露度在淮河流域增幅最大,为 21.30 万人·d;其次是珠江流域和海河流域,增幅分别为 18.70 万、16.86 万人·d;内陆河流域增幅最低,为 0.02 万人·d。SSP2-4.5 情景下人口

总暴露度增幅在珠江流域增幅最大,为 47.24 万人·d;其次是淮河流域和东南诸河流域,增幅分别为 46.64 万、31.53 万人·d,内陆河流域增幅最小,为 0.12 万人·d。SSP5-8.5 情景下人口总暴露度增幅在珠江流域最高,为 112.08 万人·d;其次是东南诸河流域和淮河流域,分别为 96.77 万、83.26 万人·d;内陆河流域依然增幅最小,为 0.24 万人·d。总的来看,九大流域的气候变化均产生正效应,人口变化和两者共同作用产生负效应,这表明气候效应导致人口暴露度增加,而人口效应和两者共同作用效应导致暴露度减小。对比各大流域可以发现,SFHE 事件人口暴露度在珠江、淮河、东南诸河和海河流域的增幅较大,而在内陆河、松辽、黄河和西南诸河流域的增幅较小,与图 8 结果一致。

3.5 讨论

本文基于径流深数据,采用相对阈值方法识别洪水事件,在数据和方法上存在一定的局限性。一方面,虽然极端径流是表征洪水事件的有效指标^[43],但受流域下垫面和人类活动双重因素影响,并不是所有极端径流会演化成洪水事件,这可能会高估洪水频次(如中国西部地区);另一方面,基于网格的相对阈值,洪水识别方法无法区分江河、城市等不同类型的洪水事件,限制了对不同类型洪水对未来气候变暖响应机制的理解。针对以上问题,未来可使用具有物理机制的大尺度水动力模型模拟流域出口断面的洪水事件^[44],以提高对 SFHE 事件特征识别的稳健性。

气候变化影响评估中的主要不确定性来源于全球气候模式结构、排放情景以及降尺度方法等^[45]。本文使用多模式集合平均方法减少了不同气候模式之间的差异,表征了不同 SSP 情景下气候模式的不确定性范围。研究结果发现,气候模式和排放情景是 SFHE 事件预测中不可忽略的不确定性来源,且 SSP 情景和气候模式的不确定性均有随时间增大的趋势(图 7),但本文没有量化两者的不确定性贡献。未来可采用更先进的敏感性分析方法,如基于层级制的全局敏感性分析方法^[29]精确量化气候模式、排放情景、降尺度方法等多种不确定性的相对贡献,为进一步降低 SFHE 事件预测的不确定性提供科学参考。

4 结论

a. 气候变暖导致中国热浪风险上升,其中西南地区热浪频次增加最为明显,与历史基准期(1961—2014 年)相比,未来时期(2071—2100 年)

每 10a 增幅大于 40 次,热浪历时在西部地区和华南部分区域增长显著,且排放情景越高,增幅越大;未来洪水风险加剧主要集中在中国西北部和华北地区,洪水频次每 10a 增幅小于 60 次,洪水历时增长则集中在华东和华南等地区。

b. 未来华南和华东地区 SFHE 事件频次和历时增长,且 SFHE 事件突发性增强。SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下,与历史基准期(1961—2014 年)相比,21 世纪末中国 SFHE 事件年均频次预计分别增加 0.13、0.28、0.44 次,平均历时分别增长 1.4、3.9、8.1 d,年土地暴露度分别增加 6.0%、13.8%、18.3%,平均 IFH 分别缩短 0.16、0.37、0.75 d。

c. 未来时期(2070—2100 年)SFHE 事件人口暴露度在东部和南部地区呈增加态势,与历史基准期(2000 年)相比,增幅大于 5 万人·d,而西部部分区域呈减少态势。气候效应导致人口暴露度增加,且排放情景越高,人口暴露度增加的效应越强;而人口效应及其与气候效应的共同作用导致人口暴露度减小。

参考文献:

[1] GLAGO F J. Flood disaster hazards; causes, impacts and management; a state-of-the-art review[M]//FARSANGI E N. Natural Hazards-Impacts Adjustments and Resilience. London: Intech Open, 2021: 29-37.

[2] DUTTA P, DEKA S. A novel approach to flood risk assessment: synergizing with geospatial based MCDM-AHP model, multicollinearity, and sensitivity analysis in the Lower Brahmaputra Floodplain, Assam [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 467: 142985.

[3] 谢志高, 贾文豪, 王霞雨, 等. 西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (6): 128-136. (XIE Zhigao, JIA Wenhao, WANG Xiayu, et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (6): 128-136. (in Chinese))

[4] 张长征, 沈婷, 徐慎晖, 等. 极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究[J]. 水利经济, 2023, 41 (1): 55-61. (ZHANG Changzheng, SHEN Ting, XU Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41 (1): 55-61. (in Chinese))

[5] CAMPBELL S, REMENYI T A, WHITE C J, et al. Heatwave and health impact research: a global review[J]. Health & Place, 2018, 53: 210-218.

- [6] GU Lei, CHEN Jie, YIN Jiabo, et al. Global increases in compound flood-hot extreme hazards under climate warming[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(8) : e2022GL097726.
- [7] CHEN Yang, LIAO Zhen, SHI Yan, et al. Detectable increases in sequential flood-heatwave events across China during 1961-2018 [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(6) : e2021GL092549.
- [8] LEONARD M, WESTRA S, PHATAK A, et al. A compound event framework for understanding extreme impacts[J]. WIREs Climate Change, 2014, 5 (1) : 113-128
- [9] RIDDER N N, PITMAN A J, WESTRA S, et al. Global hotspots for the occurrence of compound events [J]. Nature Communications, 2020, 11(1) : 5956.
- [10] 郝增超, 张璇, 郝芳华, 等. 2022 年夏季长江流域复合高温干旱事件的影响及应对[J]. 水资源保护, 2023, 39 (6) : 46-52. (HAO Zengchao, ZHANG Xuan, HAO Fanghua, et al. Impacts and coping strategies of compound hot extremes and droughts during summer of 2022 in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6) : 46-52. (in Chinese))
- [11] 程玉佳, 张珂, 晁丽君. 青藏高原复合干热事件及其对植被的影响 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (4) : 52-58. (CHENG Yujia, ZHANG Ke, CHAO Lijun. Compound dry-hot events on Qinghai-Tibet Plateau and their effects on vegetation [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (4) : 52-58. (in Chinese))
- [12] HAO Zengchao. Compound events and associated impacts in China [J]. iScience, 2022, 25(8) : 104689.
- [13] WANG S S Y, KIM H, COUMOU D, et al. Consecutive extreme flooding and heat wave in Japan: are they becoming a norm? [J]. Atmospheric Science Letters, 2019, 20(10) : e933
- [14] YE Yangbo, QIAN Cheng. Conditional attribution of climate change and atmospheric circulation contributing to the record-breaking precipitation and temperature event of summer 2020 in southern China [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(4) : 044058.
- [15] LI Haochuan, GU Ziyi, CHEN Jie, et al. Severe socioeconomic exposures due to enhanced future compound flood-heat extreme hazards in China [J]. Atmosphere, 2022, 13(12) : 2089.
- [16] 郝增超, 陈阳. 地球系统视角下的多圈层复合极端事件研究进展与展望 [J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54 (2) : 360-393. (HAO Zengchao, CHEN Yang. 2024. Research progresses and prospects of multi-sphere compound extremes from the earth system perspective [J]. Science China Earth Sciences, 2024, 54(2) : 360-393. (in Chinese))
- [17] LIAO Zhen, CHEN Yang, LI Wei, et al. Growing threats from unprecedented sequential flood-hot extremes across China [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48 (18) : e2021GL094505.
- [18] KHAN M, BHATTARAI R, CHEN Liang. Elevated risk of compound extreme precipitation preceded by extreme heat events in the Upper Midwestern United States [J]. Atmosphere, 2023, 14(9) : 1440.
- [19] 刘慕嘉, 杨秀芹, 姚飞, 等. 1961—2020 年中国洪水-热浪复合极端事件时空变化特征 [J]. 中国农村水利水电, 2023(4) : 167-176. (LIU Mujia, YANG Xiuqin, YAO Fei, et al. Spatial-temporal changes in compound extreme flood-heatwave events over China during 1961-2020 [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023 (4) : 167-176. (in Chinese))
- [20] XU Ying, GAO Xuejie, SHEN Yan, et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(4) : 763-772.
- [21] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(4) : 1102-1111. (WU Jia, GAO Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4) : 1102-1111. (in Chinese))
- [22] LI Bailing, RODELL M, SHEFFIELD J, et al. Long-term, non-anthropogenic groundwater storage changes simulated by three global-scale hydrological models [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1) : 10746.
- [23] YAN Xiao, ZHANG Bao, YAO Yibin, et al. Jointly using the GLDAS 2. 2 model and GRACE to study the severe Yangtze flooding of 2020 [J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127927.
- [24] ALFALOJI M. Water budget estimation using remote sensing observations and GLDAS CLSM for Limpopo River Basin [J]. Advanced Remote Sensing, 2022, 2(2) : 85-93.
- [25] JONES B, O' NEILL B C. Spatially explicit global population scenarios consistent with the shared socioeconomic pathways [J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(8) : 084003.
- [26] 李娇, 任国玉, 战云健. 浅谈极端气温事件研究中阈值确定方法 [J]. 气象科技进展, 2013, 3(5) : 36-40. (LI Jiao, REN Guoyu, ZHAN Yunjian. Discussion on threshold determination in defining extreme temperature indices [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2013, 3(5) : 36-40. (in Chinese))
- [27] YIN Jiabo, GENTINE P, ZHOU Sha, et al. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes [J]. Nature Communications, 2018, 9(1) : 4389.
- [28] HE Xiaogang, SHEFFIELD J. Lagged compound occurrence of droughts and pluvials globally over the past

- seven decades[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47 (14): e2020GL087924.
- [29] WU Chuanhao, YE H P J F, JU Jiali, et al. Assessing the spatiotemporal uncertainties in future meteorological droughts from CMIP5 models, emission scenarios, and bias corrections[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34 (5): 1903-1922.
- [30] 雷华锦, 马佳培, 李弘毅, 等. 基于分位数映射法的黑河上游气候模式降水误差订正[J]. *高原气象*, 2020, 39 (2): 266-279. (LEI Huajin, MA Jiabei, LI Hongyi, et al. Bias correction of climate model precipitation in the upper Heihe River basin based on quantile mapping method[J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39 (2): 266-279. (in Chinese))
- [31] MARAUN D. Bias correction, quantile mapping, and downscaling: revisiting the inflation issue[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(6) : 2137-2143.
- [32] LI Haibin, SHEFFIELD J, WOOD E F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115 (D10): D10101.
- [33] WATANABE S, KANAE S, SETO S, et al. Intercomparison of bias-correction methods for monthly temperature and precipitation simulated by multiple climate models [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117 (D23): D23114.
- [34] GUO Lianyi, JIANG Zhihong, CHEN Deliang, et al. Projected precipitation changes over China for global warming levels at 1. 5° C and 2° C in an ensemble of regional climate simulations: impact of bias correction methods[J]. *Climatic Change*, 2020, 162(2) : 623-643.
- [35] LYU Mingcong, GAO Xueping, LIU Yin Zhu, et al. The impact of using different probability representations in application of equidistant quantile matching for bias adjustment of daily precipitation over the Daqing River Basin, North China [J]. *International Journal of Climatology*, 2022, 42(2) : 777-796.
- [36] WANG Lin, CHEN Wen. A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(6) : 2059-2078.
- [37] 赵芳芳, 徐宗学. 统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河源区气候情景的比较分析[J]. *气象学报*, 2007, 65 (4): 653-662. (ZHAO Fangfang, XU Zongxue. Comparative analysis on downscaled climate scenarios for headwater catchment of Yellow River using SDS and Delta methods [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65 (4): 653-662. (in Chinese))
- [38] 鞠琴, 吴金雨, 王兴平, 等. 机器学习算法在降水和气温多模式集成中的应用[J]. *水资源保护*, 2024, 40(3) : 106-115. (JU Qin, WU Jinyu, WANG Xingping, et al. Application of machine learning algorithms in multimodal integration of precipitation and temperature [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40 (3): 106-115. (in Chinese))
- [39] 贾玉雪, 张奇, 曾冰茹, 等. 湘江流域多源降水与气温产品组合的径流极值模拟精度评价[J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2023, 51(2) : 8-16. (JIA Yuxue, ZHANG Qi, ZENG Bingru, et al. Accuracy evaluation of runoff extremum simulation for the product combination of multi-source precipitation and temperature in the Xiangjiang River Basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(2) : 8-16. (in Chinese))
- [40] JIANG Shanhu, WEI Linyong, REN Liliang, et al. Evaluation of IMERG, TMPA, ERA5, and CPC precipitation products over Chinese mainland: spatiotemporal patterns and extremes [J]. *Water Science and Engineering*, 2023, 16(1) : 45-56.
- [41] JONES B, O' NEILL B C, MCDANIEL L, et al. Future population exposure to US heat extremes [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(7) : 652-655.
- [42] LIU Zhao, ANDERSON B, YAN Kai, et al. Global and regional changes in exposure to extreme heat and the relative contributions of climate and population change [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1) : 43909.
- [43] ZHOU Jun, WU Chuanhao, YE H P J F, et al. Anthropogenic climate change exacerbates the risk of successive flood-heat extremes: multi-model global projections based on the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 889: 164274.
- [44] UDDIN S, REVEL M, MODI P, et al. Quantifying the relative contributions of climate change and ENSO to flood occurrence in Bangladesh [J]. *Environmental Research Letters*, 2023, 18(10) : 104027.
- [45] JU Jiali, DAI Heng, WU Chuanhao, et al. Quantifying the uncertainty of the future hydrological impacts of climate change: comparative analysis of an advanced hierarchical sensitivity in humid and semiarid basins [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2021, 22(3) : 601-621.

(收稿日期: 2024 - 10 - 09 编辑: 施业)