DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.05.014

中国极端降水和高温历史变化及未来趋势

舒章康[1,2,3,4]，李文鑫[1,3,4]，张建云[1,3,4]，金君良[1,3,4]，薛晴[1,3,4,5]，王银堂[1,3]，王国庆[1,3,4]

（1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室，南京 210029；2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室，成都 610065；3. 长江保护与绿色发展研究院，南京 210098；4. 水利部应对气候变化研究中心，南京 210029；5. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室，南京 210098）

摘要：在全球变暖背景下，我国极端事件频发，了解和掌握极端事件的时空变化，合理预估极端事件的未来趋势，可为制定区域气候变化适应策略提供理论依据。本文利用CN05.1全国网格气象数据和第六次国际耦合模式比较计划（CMIP6）的11种全球气候模式，分析了我国1975—2014年历史极端降水和高温事件的演变特征，研判了2015—2054年极端事件的变化情况，提出了应对极端事件的政策建议。结果表明：① 1975—2014年，全国强降水量呈现由西北向东南依次增加–减少–增加的空间格局，胡焕庸线以东地区极端降水风险和危险性较大；在选取的两种对比情景下，2015—2054年，我国极端降水将普遍增多趋强，其中华北和东北地区极端降水事件增幅较大，西北地区强降水量将进一步增加。② 我国1975—2014年暖夜日数和暖昼日数均呈显著增加趋势，暖夜日数增幅高于暖昼日数增幅；在选取的两种对比情景下，2015—2054年，我国极端高温事件将显著增加，西北、西南和华南等地区的高温热浪风险增幅最大。为减缓气候变化影响和应对未来极端事件风险，应进一步提升洪涝灾害和高温热浪风险应对和应急管理能力，强化国际合作并因地制宜制定相关适应气候变化战略，以防范和应对全球变暖引起的极端灾害。

关键词：气候变化；极端天气事件；CMIP6；极端灾害应对

中图分类号：P467　　**文献标识码：**A

Historical Changes and Future Trends of Extreme Precipitation and High Temperature in China

Shu Zhangkang[1,2,3,4], Li Wenxin[1,3,4], Zhang Jianyun[1,3,4], Jin Junliang[1,3,4], Xue Qing[1,3,4,5], Wang Yintang[1,3], Wang Guoqing[1,3,4]

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 4. Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 5. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Extreme events occur frequently in China against the background of global warming. Understanding the spatiotemporal

收稿日期：2020-07-28；**修回日期：**2020-09-01

通讯作者：金君良，南京水利科学研究院教授级高级工程师，研究方向为气候变化对水文水资源的影响；E-mail: jljin@nhri.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“水平衡与国土空间协调发展战略研究（一期）”(2020-ZD-20)；国家自然科学基金项目 (52121006，52279018)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

variation of extreme events and predicting their future trends can provide a theoretical basis for formulating regional strategies that adapt to climate change. Using the CN05.1 grid meteorological data and eleven global climate models based on Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), we analyzed the evolution characteristics of extreme precipitation and high temperature events in China from 1975 to 2014, predicted the evolution of extreme events from 2015 to 2054, and proposes policy suggestions for dealing with these events. The results indicate that, from 1975 to 2014, the heavy precipitation exhibited an increasing-decreasing-increasing pattern from the northwest to southeast region of China, and the risk and catastrophability of extreme precipitation in regions located to the east of the Hu Line were great. Under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 climate change scenarios, extreme precipitation in China will generally increase and become stronger by 2054, with a significant increase in North and Northeast China and a further increase in Northwest China. From 1975 to 2014, the number of warm nights and warm days in China increased significantly, and the increase in warm nights was higher than that of warm days. Under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 climate change scenarios, extreme heat events in China will increase significantly by 2054, with the greatest increase in Northwest, Southwest, and South China. To mitigate the impact of climate change and cope with the risk of extreme events in the future, China should further improve its response and emergency management capacities for dealing with flood and extreme heat risks, strengthen international cooperation, and formulate strategies adapted to local conditions.

Keywords: climate change; extreme event; CMIP6; extreme disaster response

一、前言

自工业革命以来，大气中的二氧化碳浓度显著升高，2021 年的二氧化碳年平均浓度为 414.7 ppm，相较 2020 年升高约 2.3 ppm，是现代仪器观测记录的最高值 [1]。二氧化碳等温室气体的持续排放已导致全球平均气温显著升高，增加了全球出现极端气候风险。据《全球气候风险指数 2021》 [2]显示，过去 20 年全球发生了约 11 000 次极端气象灾害事件，导致约 47.5 万人死亡，带来的经济损失近 2.56 万亿美元。由温室气体排放引发的全球变暖已显著影响区域水文大气循环过程，导致诸如极端干旱、暴雨洪涝、高温热浪、海平面上升、冰川退化和冻土消融等灾害问题的频繁发生，严重制约了区域经济社会和生态环境的平衡发展 [3,4]。

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告指出，2011—2020 年的全球平均气温相对于 1850—1900 年升高了约 1.09 ℃；在未来持续变暖的情景下，极端气候事件如极端降水、高温热浪的发生频率和强度均将有所提升 [5]。根据 Clausius-Clapeyron 热力学方程，大气显著升温将导致大气饱和水汽压增加，从而加大极端降水事件发生的频率和强度 [6]。极端降水事件的频发将引发区域洪涝问题，威胁城乡居民生命财产安全，同时因暴雨灾害带来的粮食减产问题也将加剧全球粮食危机，引发一系列次生灾害。极端高温热浪事件将加大热射病、心脑血管、呼吸道、神经系统疾病的发病率，直接威胁人体健康 [7]。为缓解全球变暖带来的影响，《巴黎协定》提出，将全球升温幅度控制在 1.5 ℃以内，并努力限制升温幅度在 2 ℃以内 [8]。已有研究指出，2011—2020 年全球平均气温上升 0.24 ℃ [9]；通过有限振幅脉冲响应（FaIR）气候模式模拟显示，在 2021 年立即停止碳排放情景下，全球平均气温在 2029 年前后仍有 42% 可能性超过 1.5 ℃温控目标 [10]；基于多种气候模式预估显示，全球升温 1.5 ℃、2.0 ℃将可能分别发生在 2030 年、2040 年前后，我国区域的温度变化将高于全球平均水平 [11]。

全球变暖已是不争的事实，气候变化将对我国资源、生态和经济社会产生重要影响。中国工程院咨询项目“水平衡与国土空间协调发展战略研究（一期）”中的子课题“重点区域水平衡关系与水循环要素演变”（2020 年），重点梳理了水平衡要素演变规律，分析了气候变化对区域水平衡的影响。其中，全球变暖下的极端事件变化直接关系我国经济社会和人民财产安全，揭示全球变暖背景下我国极端降水和高温的历史演变规律，预估未来极端气候事件的可能变化对于应对气候变化风险具有重要意义。鉴于此，本文结合 CN05.1 全国网格气象数据和第六次国际耦合模式比较计划（CMIP6）的全球气候模式模拟气候数据，重点分析我国历史极端降水和高温变化及未来趋势，研究提出应对极端事件和减缓气候变化影响的政策建议。

二、研究数据及方法

（一）研究数据

本研究采用 1975—2014 年的 CN05.1 网格气象

数据（降水量、最高气温、最低气温）作为实测信息，分析历史极端降水和高温事件的变化趋势及其空间特征。CN05.1气象数据由全国2400多个气象站的资料插值生成，由国家气候中心提供。未来降水量、最高气温、最低气温数据则采用全球气候模式预估结果，其中气候模式选自最新发布的CMIP6计划，包括ACCESS-CM2、ACCESS-ESM1-5、CanESM5、EC-Earth3、EC-Earth3-Veg、EC-Earth3-Veg-LR、GFDL-ESM4、KACE-1-0-G、MRI-ESM2-0、NorESM2-LM、NorESM2-MM共11个气候模式。这些模式在极端降水和气温模拟方面有良好的表现，且CMIP6相对于CMIP5对极端气候的模拟能力有所提升[12,13]。

CMIP6提供了1850—2014年的历史气候模拟数据和2015—2100年的未来气候预估数据，为与我国历史观测信息时间对应，本文以1975—2014年作为历史基准期，以2015—2054作为未来预估期，选取两种不同的共享社会经济路径情景（SSP1-2.6、SSP5-8.5）进行对比分析。SSP1-2.6情景表示在可持续发展路径下，2100年的辐射强迫稳定在2.6 W/m^2；SSP5-8.5情景表示在传统化石燃料为主的路径下，2100年的辐射强迫高至8.5 W/m^2。

（二）研究方法

本文涉及的历史和未来气候预估数据分辨率因有所差异，故采用双线性插值将所有历史和未来预估数据分辨率统一到0.5°×0.5°网格。气候模式预估的原始数据在区域应用时存在较大偏差，本研究以CN05.1历史数据为参考，采用日偏差矫正法（DBC）对气候模式的历史和未来数据进行偏差矫正[14]。

极端降水和高温指标选取强降水量（R95TOT）、降水强度（SDII）、暖夜日数（TN90p）及暖昼日数（TX90p）来分析极端气候事件的变化情况[15]。各极端指标含义如表1所示。其中历史时期极端事件指标阈值通过1975—2014年CN05.1数据集确定，未来极端事件指标阈值通过上文所选气候模式在不同排放情景下的1975—2014年模式数据确定。

表1　极端天气事件指标确定

指标	名称	含义
R95TOT	强降水量	日降水量大于95%分位值的年累计降水量
SDII	降水强度	年降水总量与湿日日数的比值
TN90p	暖夜日数	日最低气温大于90%分位值的日数
TX90p	暖昼日数	日最高气温大于90%分位值的日数

采用泰尔–森（Theil-Sen）趋势估计法、曼–肯德尔（MK）非参数秩次检验法[16]对1975—2014年历史极端气候指标的演变趋势及显著性进行分析。对于未来极端事件的趋势预估，以未来预估期多年平均极端指标相对历史基准期平均值的变化来表征极端事件的未来趋势，其中极端降水采用相对百分比、极端高温采用绝对变化；同时，通过不同气候模式的预估结果来考虑预估不确定性。为便于比较分析，按照省级行政区地理位置，将全国划分为西北、华北、东北、西南、华中、华东、华南七大区域，通过统计分区内网格指标变化来反映区域极端指标差异。

三、我国历史气候变化情况

（一）历史极端降水变化

图1为不同区域1975—2014年R95TOT、SDII指数的变化率以及MK趋势值的箱线图。从变化率来看，1975—2014年，R95TOT趋势变化空间格局与我国夏季降水量变化趋势的空间分布相似（见图1(a)），总体上由西北向东南依次呈现增加–减少–增加的格局特征[17]。具体表现为：西北地区超过75%的地区呈增加趋势，每10年的增加速率在0~30 mm；胡焕庸线以东的东北、华中、华东和华南等地区R95TOT增加最明显，超过75%以上地区每10年的增加速率在10~80 mm；R95TOT减少区域主要分布在华北、西南等区域，每10年的减少速率为0~40 mm。

从MK空间趋势显著性来看，我国大部分地区R95TOT指标变化不显著，置信水平低于95%（MK值介于±1.96）的区域约占研究区的81.4%（见图1(b)）。R95TOT显著升高的区域面积约占总面积的17.2%，多数分布于西北和东北地区，其中胡焕庸线以东的人口稠密区强降水量普遍增加，极端暴雨风险和危害性较大；R95TOT显著降低的区域面积不足总面积的2%，分布于西南地区。

对于SDII指数，其变化情况与R95TOT呈现出相似特征，总体上呈现出“两增一减”的空间格局（见图1(c)）。具体来看，东北、华东和华南等地呈上升趋势的地区较多，华北和华中呈下降趋势的地

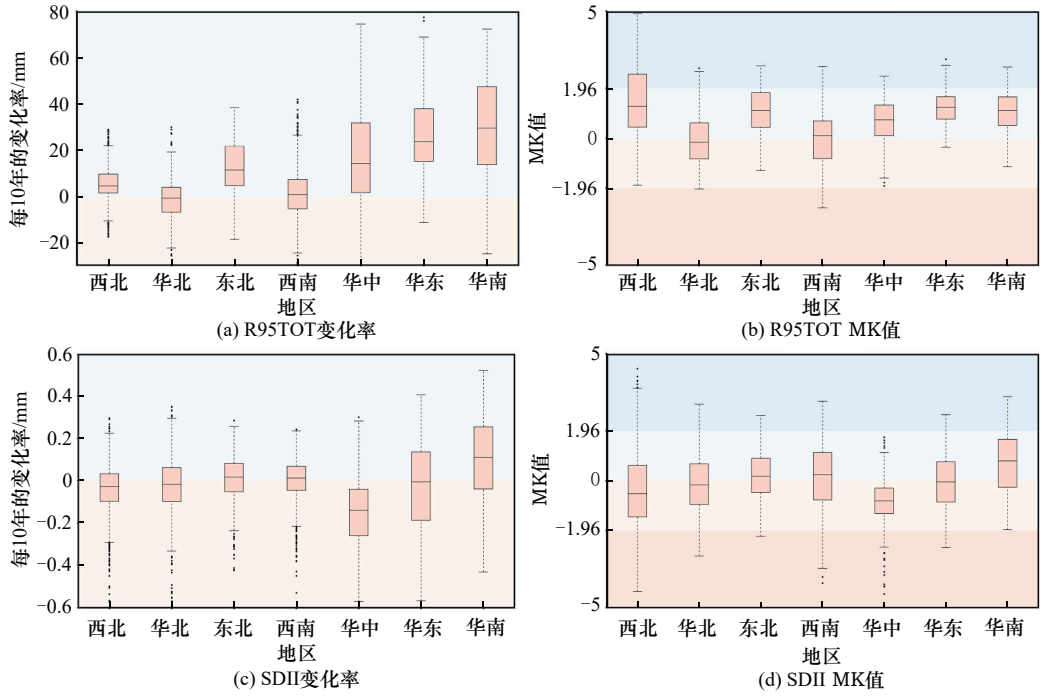

图1 1975—2014年我国极端降水R95TOT、SDII指数变化率及MK值

注：1. 置信水平95%对应的MK趋势显著性临界值为±1.96，MK值为负表示下降趋势，反之为上升趋势，下同。2. 每个地区箱体由该地区网格统计结果组成，箱体分布代表了该地区的空间差异性，下同。

区较多。SDII呈现上升趋势的面积约占全国总面积的47.0%，其中每10年的变化率超过0.2 mm/d的区域面积约占总面积的5.1%，每10年的变化率低于−0.2 mm/d的区域面积约占总面积的10.9%。从MK趋势值来看，全国大部分地区SDII变化趋势不显著，MK值介于±1.96的区域面积约占研究区总面积的85.5%（见图1(d)）。SDII显著升高的区域面积约占总面积的6.3%，显著减少的区域面积约占总面积的8.2%。总体上，我国东部沿海人口稠密区极端降水强度和总量均有所增加，极端降水风险和危险性较大，这与已有研究[18]基本一致。

（二）历史极端高温变化

图2为1975—2014年我国不同分区TN90p、TX90p指数的变化率及MK值的箱线图。TN90p、TX90p指数的变化分别表征了研究时段夜晚、白昼极端高温事件出现频率的变化。从变化率来看，全国绝大部分地区TN90p与TX90p指数均有不同程度的增加，二者呈上升趋势的面积占比分别达到99.4%、97.3%。TN90p与TX90p的变化率空间分布总体相似，均表现为西北、华北、西南及华南地区变化率较大，华中和华东地区变化率较小。TN90p的变化率总体上高于TX90p，我国TN90p每10年的平均变化率为5.9 d，TX90p每10年的平均变化率为4.0 d。TN90p和TX90p变化率的空间特征与已有研究[19]一致：西北、青藏和西南等地TN90p变化率较大，川渝甘陕和沿海一带TX90p变化率较大。

从MK趋势值来看，TN90p与TX90p显著性水平同趋势变化的速率大小具有一致性，变化率越大，显著性水平越高；二者呈显著上升趋势的地区分别占82.8%与72.2%。值得注意的是，两类极端高温指数在新疆西北部地区同整个西北地区的总体趋势具有较大差异，这些地区TN90p与TX90p每10年的变化率范围分别为0~5 d和–2~3 d，远小于西北地区每10年的平均变化率（TN90p、TX90p变化率上升范围分别为5~13 d、3~7 d），且少数区域TX90p指数呈显著下降趋势（见图2(d)）。

四、我国未来极端事件预估

（一）未来极端降水预估

图3展示了我国不同区域未来R95TOT和SDII相对基准期的变化百分比，百分值由模式集合50%分位数确定，图中每个箱体由区域内各个网格的

50%分位数预估结果组成。由图3可知，在不同情景下，我国未来R95TOT将呈现增加态势，且大多数区域均显示了这一增多信号。在SSP1-2.6情景下，2015—2054年，我国西北和西南青藏高原地区R95TOT增幅最大，多数地区增幅达到15%以上；其次是我国华北和东北等地区，R95TOT增幅为10%~20%；华中地区增幅为5%~15%；华东和华南地区R95TOT增幅为0~10%，其中云南、广西和广东等地强降水量增幅最小，为0~5%。

SSP5-8.5情景预估的R95TOT强降水量变化空间模态与SSP1-2.6情景基本一致，总体上呈现出西北、华北、东北和西南青藏高原地区增幅较大，南

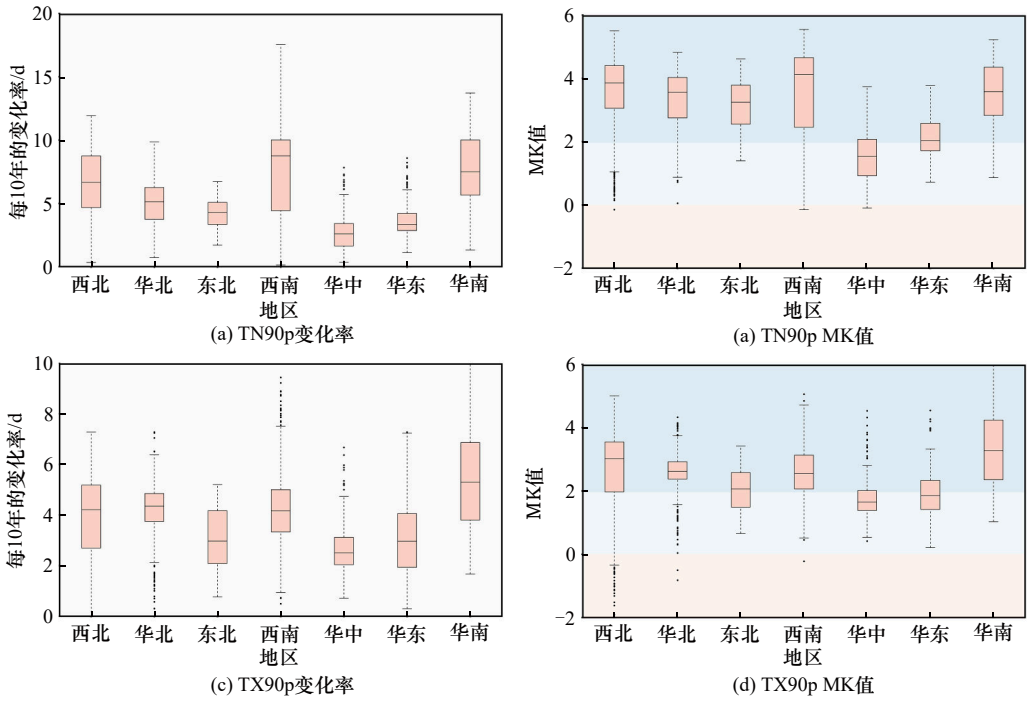

图2　1975—2014年我国TN90p、TX90p指数变化率及MK值

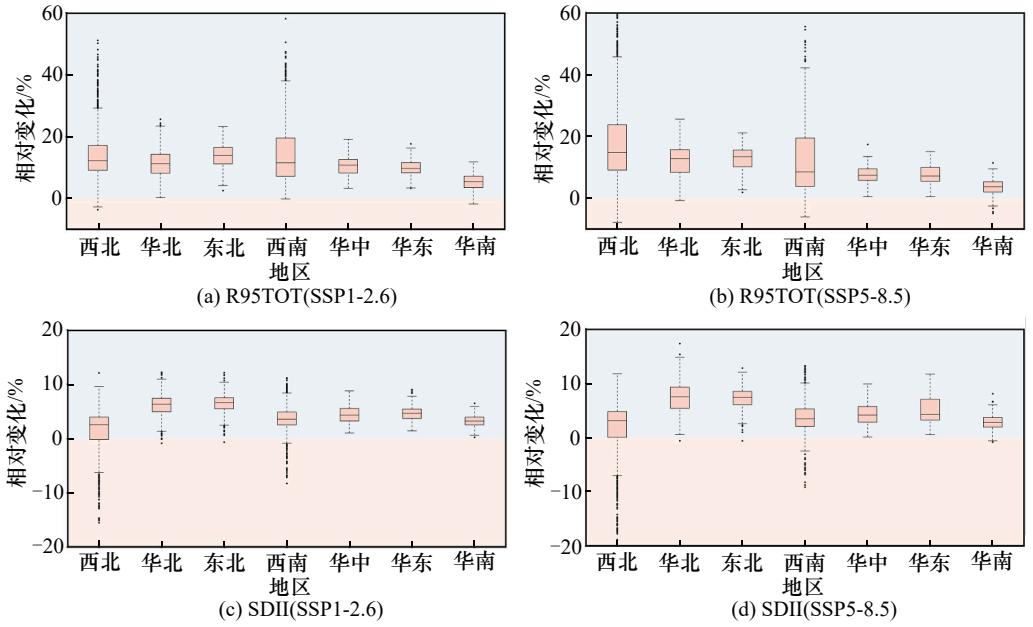

图3　SSP1-2.6和SSP5-8.5情景下2015—2054年我国极端降水相对变化百分比（相对于1975—2014年）

方地区增幅较小的分布特征。相较于SSP1-2.6情景，SSP5-8.5情景下我国北方地区的极端强降水将进一步增加，尤其是西北、青藏、东北等寒冷干旱地区增幅明显。这也表明高碳排放将进一步加剧极端事件发生风险，威胁我国寒旱生态脆弱区和经济核心区安全。

对于SDII指数，不同发展情景下我国大多数地区未来降水强度将呈现增加态势，仅西北和西南局部地区呈现减少态势。SSP1-2.6情景显示，2015—2054年，我国华北和东北地区SDII增幅最大，幅度约为6%~12%；其次是华中和华东等地区，增幅为2%~6%；华南地区增幅最小，幅度为0~4%。SSP5-8.5情景预估的SDII降水强度变化空间模态与SSP1-2.6情景基本一致，总体上呈现华北和东北地区增幅较大、华南增幅最小、西北局部地区减少的分布特征。相比SSP1-2.6情景，SSP5-8.5情景下我国北方地区的降水强度将进一步增大，西北局部地区的SDII的减少态势也更为明显，但不同气候模式在西北地区预估的结果差异较大，预估存在较大的不确定性。

近年来，相关观测资料显示，西北地区呈现出一定的暖湿化趋势，西北西部自1961年以来持续变湿，西北东部于1997年由干化趋势转为湿润趋势，这与21世纪以来西风环流东亚夏季风环流协同增强有关[20]。气候模式模拟也显示，未来西北地区将持续暖湿化，降水事件将增多趋强。已有研究表明，在全球升温2.0 ℃下，我国西北地区连续干日将显著减少，尤其是塔里木和柴达木盆地等地区[21]。SDII为年降水总量与湿润日数的比值，由于西北地区本就干旱少雨，降水事件稀少，但受全球气候变化影响，西北降水事件和超95%分位数阈值事件将明显增多，因而导致未来西北局部地区降水强度相对基准期有所降低。

（二）未来极端高温预估

图4显示了2015—2054年不同情景极端高温指数（TN90p和TX90p）相对于基准期的绝对变化。由图4可知，不同情景下我国未来TN90p将呈增加态势，且全国各地均显示了这一增加信号。SSP1-2.6情景显示，我国西南和华南地区TN90p增幅最大，多数地区增幅将超过40 d；其次是西北、华北和华中等地区，TN90p增幅为20~45 d；东北和华东等地区增加幅度最小，为20~30 d。

SSP5-8.5情景预估的TN90p变化空间模态与SSP1-2.6情景基本一致，总体上呈现华南、西南、西北、华北和华中增幅较大的空间特征。相较于

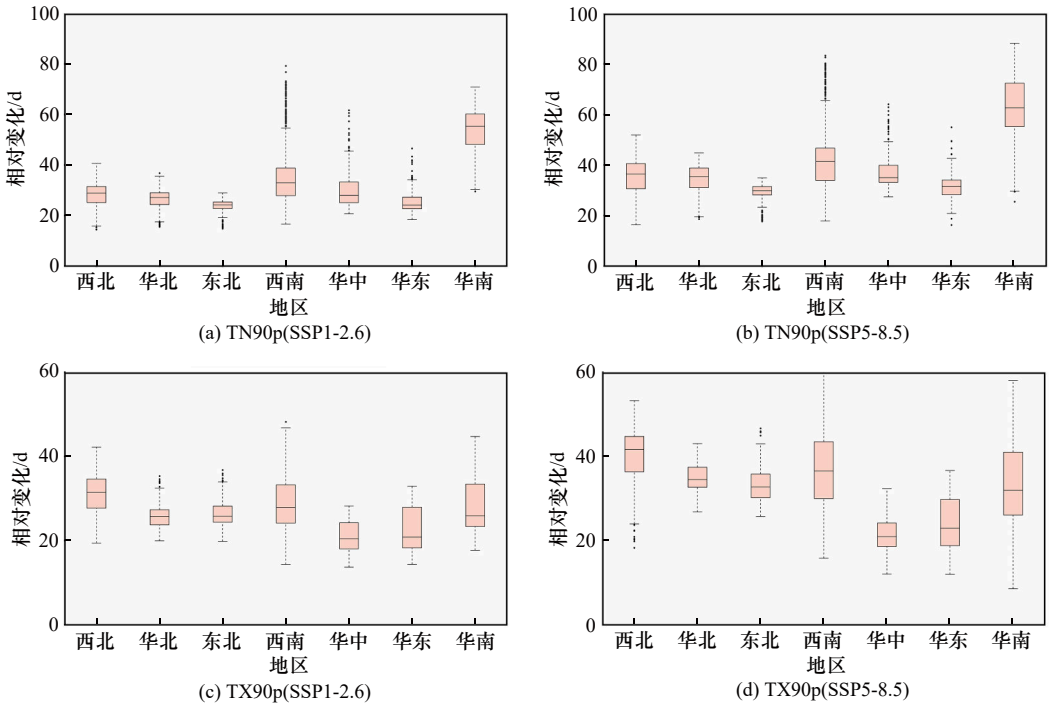

图4 SSP1-2.6和SSP5-8.5情景下2015—2054年我国极端高温指数相对变化（相对于1975—2014年）

SSP1-2.6情景，SSP5-8.5情景下我国夜间极端高温将进一步加剧，夜间高温风险将显著增加。

对于暖昼日数TX90p，不同发展情景下我国全域未来暖昼日数将呈现增加态势。SSP1-2.6情景显示，2015—2054年，我国西北、西南和华南地区TX90p增幅最大，幅度约在20~45 d；其次是华北、东北等地区，暖昼日数增加约20~30 d。华中和华东等地区增幅最小，约为15~30 d。相较于SSP1-2.6情景，SSP5-8.5情景预估的TX90p空间模态与SSP1-2.6情景基本一致，均显示华中和华东等地区暖昼日数增加幅度最低。相对于SSP1-2.6情景，SSP5-8.5情景下我国白天极端高温风险将进一步加大，尤其是西南和华南等地局部暖昼日数将增加超过50 d。

对比不同情景下的TN90p、TX90p可知，不同情景下TN90p的增温幅度明显大于TX90p的增温幅度，这与历史极端高温的变化规律基本一致。在高碳排放的SSP5-8.5情景下，极端高温升温更明显，这意味着在全球变暖背景下我国夜间升温幅度明显高于白天升温幅度。已有研究表明，历史最低气温相对于最高气温升温更显著，升温速率更快[22]。这也从侧面显示，全球变暖对区域最低气温的影响更为明显，而昼夜极端高温风险的同步增加和温室气体的持续高排放将更大程度地加剧未来高温热浪风险，进一步威胁人类生存和地球生态[23]。

五、极端降水、高温事件的应对与减缓建议

在全球气候变化背景下，我国极端降水和高温事件呈现一定时空差异性。研究结果显示，1975—2014年，我国强降水量总体呈现两增一减的空间格局，即由西北向东南呈现出增加–减少–增加；我国西北天山以北、东北、华东和华南等地区的降水强度和强降水量均呈增加态势。2015—2054年，受全球变暖的影响，我国极端降水情况将进一步增多趋强。对于极端高温事件，1975—2014年，全国昼夜极端高温事件发生频率普遍增多，其中北方和西南地区暖昼和暖夜日数变化率较大，高温热浪事件显著增强；2015—2054年，我国昼夜极端高温事件将进一步增多趋强，高温热浪事件发生风险增加，尤其是昼夜极端高温的同步增加将进一步加剧未来极端气候事件的灾害程度。

全球变暖加剧了区域极端降水和高温事件的发生概率，从而导致洪涝灾害和高温热浪灾害频发。一方面，对于洪涝和热浪极端灾害的应对，可从工程措施（基础建设）和非工程措施（信息化建设、应急管理）两个角度开展。另一方面，气候变化深刻影响着全球气候，是全人类共同面临的难题，其引发的灾害链对人类社会产生着巨大影响，应对气候变化更需要国家与国家、地区与地区之间协同合作，共同应对。因此，本研究结合具体的工程和非工程措施，从应对洪涝灾害、应对高温热浪灾害和应对气候变化3个角度提出以下建议（见图5）。

（一）提升洪涝风险应对和应急管理能力

全球气候变化将加大区域极端暴雨事件的发生概率，导致流域超标准洪水、水库溃坝、山洪滑坡、城市内涝等多灾并发风险加大，威胁国家水安全和公共安全。针对洪涝灾害，首先应加强工程设计、流域防洪工程建设和城市防洪基础建设等工程措施；其次，应加强流域、城市和工程灾害防御信息化和流域安全管理等非工程措施，全面建设韧性

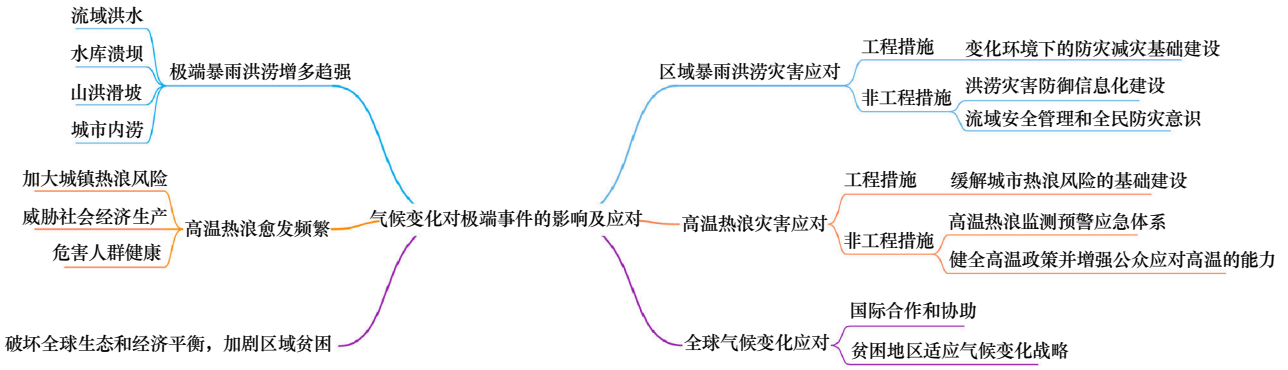

图5　极端降水、高温事件的影响和应对建议

流域和韧性城市。

一是加强变化环境下的防灾减灾基础建设。① 加强变化环境下工程水文计算基础研究，全面复核水库大坝设计洪水；在工程设计中，考虑极端暴雨和高温事件对水利工程的影响，提高工程设计标准。② 立足流域和城乡整体，加快推进大江大河防洪控制性工程和流域蓄滞洪区建设，强化中小河流治理和山洪灾害防治，针对已建水库，加快推进病险水库除险加固工作。③ 推进新老城区海绵城市建设，通过扩大绿地面积、建设人工湿地等措施充分调动城市蓄水能力，在生态保底的同时，实现源头减排和暴雨径流调蓄 [24]。全面排查解决疏通排洪堵点，针对超标准城市洪涝灾害，建设大型排水设施和城市深邃工程，提升城市排水除涝能力。

二是加强洪涝灾害防御信息化建设 [25]。① 提升水利信息化水平，应用先进传感、通信等现代信息技术，建立空天地立体水文气象防汛抗旱系统；应用大数据、人工智能技术，联合流域梯级水库多目标联合优化调度，开发复杂流域防洪预报调度一体化系统，构建集成预报、预警、预案、预演于一体的“四预”指挥体系。② 健全城市极端天气研判机制，实现城市极端暴雨洪涝全过程动态监测，建立集成城市暴雨内涝预报预警云平台，强化预报预警信息发布能力。③ 加快水利工程安全监测的信息化建设，做到监测实时，上报及时。提升通信、计算、控制水平，结合大数据系统搭建大型水利工程的数字孪生平台，实现水利工程管理监督平台信息化，强化水库大坝安全保障能力，提升水库大坝抗暴雨承灾和应灾能力。

三是提升流域安全管理和全民防灾意识。① 加强水库大坝日常管理，提升应急抢险水平，加强防洪除涝紧急预案编制。以“安全第一、预防为主、全面抢险”为基本原则，提前规避风险并提升应对突发灾害事件的能力，全方位降低可能的灾后影响。② 加强适应洪水思想的城市规划建设，超前规避和限制洪涝灾害易发区的开发建设，提升通信、交通、供电、供水等生命线的防灾和抢修能力，保障城市的正常运转及抢险救灾的通畅性。③ 加强日常防灾减灾科普宣传工作，提升全民防灾意识。

（二）加强高温热浪的缓解和应对措施

温室气体的持续排放导致全球气温显著升高，引发大气环流异常，致使天气系统的高温热浪事件频发，加之城镇建设引起的热岛效应推波助澜，使人口集中的城镇地区在热浪灾害下具有更高的热暴露度和危险性，所引发的生命财产威胁远高于其他极端事件。应对高温热浪灾害，首先，应在优化城镇布局和降低城市热暴露风险的工程措施上着手；其次，应加强热浪监测预警信息化水平和健全高温政策等非工程措施。

一是加强缓解城市热浪风险的基础建设 [26]。① 合理规划城市建设布局，控制人口和建筑物密度；科学规划城市通风廊道，向城区引入郊外冷空气。② 提高城市绿化覆盖率，降低城市热暴露度；构建环市水系，调节市区气候；创新建筑结构设计，推广公共区集中供冷技术。③ 减少人为散热，提高能源利用效率，开发利用新清洁能源，改善建筑物隔热材料性能。

二是构建高温热浪监测预警应急体系 [27]。① 全面布局高温天气观测网，构建高温天气多源监测信息通道，实现一般地区全面化、重点地区精细化的全方位覆盖监测预警。② 建立精准实时的高温预报预警一体化系统，加强城市高温预报能力，提升农业高温预报及时性。③ 开拓高温预报信息的多源宣传渠道，发挥网络技术、通信技术的传播能力，做到监测全面细致、预报精准及时、传播迅速广泛。

三是健全高温政策并增强公众应对高温的能力。① 健全高温热浪期间的劳动保障和防暑补贴体系，减少高温热浪期间因户外劳作带来的热暴露，完善保障人体健康的高温政策。② 加强高温热浪危害的宣传教育，科学普及热疾病防御方法和自救互救措施，尤其加强对高温场所工作人员的科普宣传力度。③ 做好保健工作，加强个人耐热锻炼，提高自身应对极端高温的适应能力。

（三）全球气候变化应对和减缓

气候变化是全球面临的共同挑战，关乎人类生存和发展。气候变化带来的极端事件影响了全球生态环境和经济社会的平衡，通过对农牧业、渔业和农业的连锁影响，导致贫困地区生计成本增加，受气候变化影响最为严重 [28]。应对全球变暖，首先要从国家对国家的角度出发，加强国际合作与协助；其次应从地区对地区角度出发，针对气候变化

的脆弱区，建立其适应气候变化战略。

一是加强国际合作和协助。① 应对气候变化需要国际社会共同努力，构建全球命运共同体，积极推进巴黎协定目标，强化应对气候变化的共同担当。② 发达国家是全球气候变化及历史碳排放的主要责任国，发展中国家则处于高碳排放发展的必经阶段，发达国家要更多履行国际责任，加强与发展中国家的协作与帮助，同时要提高国际合作的有效性与持续性。

二是提升贫困地区适应气候变化的能力。① 积极推进“一带一路”，加强“南南合作”，提升贫困地区经济水平，加速能源转型，提升气候变化应对能力。② 开展气象信息服务共享机制，输送和培训应对气候变化及气象预报相关人才，提升贫困地区极端天气预报预警能力。③ 为贫困地区提供节水高效农业新思路、可再生能源技术及水资源管理开发方案，提升节能减排能力。

参考文献

[1] Blunden J, Boyer T. State of the climate in 2021 [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103(8): 1–475.

[2] Eckstein D, Künzel V, Schäfer L. Global climate risk index 2021 [EB/OL]. (2021-01-25) [2022-07-20]. https: //www. germanwatch. org/en/19777.

[3] Blöschl G, Hall J, Viglione A, et al. Changing climate both increases and decreases European river floods [J]. Nature, 2019, 573 (7772): 108–111.

[4] Kraaijenbrink P D A, Bierkens M F P, Lutz A F, et al. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia’s glaciers [J]. Nature, 2017, 549(7671): 257–260.

[5] 翟盘茂, 周佰铨, 陈阳, 等. 气候变化科学方面的几个最新认知 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 629–635.
Zhai P M, Zhou B Q, Chen Y, et al. Several new understandings in the climate change science [J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 629–635.

[6] 尹家波, 郭生练, 顾磊, 等. 中国极端降水对气候变化的热力学响应机理及洪水效应 [J]. 科学通报, 2021, 66(33): 4315–4325.
Yin J B, Guo S L, Gu L, et al. Thermodynamic response of precipitation extremes to climate change and its impacts on floods over China [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(33): 4315–4325.

[7] Wang Y, Wang A, Zhai J, et al. Tens of thousands additional deaths annually in cities of China between 1.5 ℃ and 2.0 ℃ warming [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1–7.

[8] The United Nations, The United Nations Framework Convention on Climate Change(UNFCCC). Adoption of the Paris agreement [EB/OL]. (2015-12-12) [2022-07-20]. https: //unfccc. int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf.

[9] Samset B H, Zhou C, Fuglestvedt J S, et al. Earlier emergence of a temperature response to mitigation by filtering annual variability [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1–9.

[10] Dvorak M T, Armour K C, Frierson D M W, et al. Estimating the timing of geophysical commitment to 1.5 and 2.0 ℃ of global warming [J]. Nature Climate Change, 2022, 12: 547–552.

[11] 庄园煌, 张井勇, 梁健. 1.5 ℃与2 ℃温升目标下“一带一路”主要陆域气温和降水变化的CMIP6多模式预估 [J]. 气候与环境研究, 2021, 26(4): 374–390.
Zhuang Y H, Zhang J Y, Liang J. Projected temperature and precipitation changes over major land regions of the Belt and Road initiative under the 1.5 ℃ and 2 ℃ climate targets by the CMIP6 multi-model ensemble [J]. Climatic and Environmental Research, 2021, 26 (4): 374–390.

[12] Luo N, Guo Y, Gao Z, et al. Assessment of CMIP6 and CMIP5 model performance for extreme temperature in China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2020, 13(6): 589–597.

[13] 王予, 李惠心, 王会军, 等. CMIP6全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与CMIP5的比较 [J]. 气象学报, 2021, 79(3): 369–386.
Wang Y, Li H X, Wang H J, et al. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021, 79(3): 369–386.

[14] Yin J, Guo S, Gu L, et al. Projected changes of bivariate flood quantiles and estimation uncertainty based on multi-model ensembles over China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 585(3): 124760.

[15] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾 [J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55–63, 84.
Zhai P M, Liu J. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background [J]. Strategic Study of CAE, 2012, 14(9): 55–63, 84.

[16] Yue S, Wang C Y. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series [J]. Water Resources Management, 2004, 18(3): 201–218.

[17] 任国玉, 任玉玉, 战云健, 等. 中国大陆降水时空变异规律——II. 现代变化趋势 [J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 451–465.
Ren G Y, Ren Y Y, Zhan Y J, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: II: Recent trend [J]. Advances in Water Sciences, 2015, 26(4): 451–465.

[18] 江洁, 周天军, 张文霞. 近60年来中国主要流域极端降水演变特征 [J]. 大气科学, 2022, 46(3): 707–724.
Jiang J, Zhou T J, Zhang W X. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the main river basins of China in the past 60 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(3): 707–724.

[19] 杨阳, 赵娜, 岳天祥. 1980—2018年中国极端高温事件时空格局演变特征 [J]. 地理科学, 2022, 42(3): 536–547.
Yang Y, Zhao N, Yue T X. Spatio-temporal variations of extreme high temperature event in China from 1980 to 2018 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(3): 536–547.

[20] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征 [J]. 科学通报, 2021, 66(Z2): 3757–3771.
Zhang Q, Zhu B, Yang J H, et al. New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(Z2): 3757–3771.

[21] 朱欢欢, 姜胜, 江志红. 基于可靠性集合平均方法的全球 1.5/2.0 ℃变暖下中国极端气候的未来预估 [J]. 地球科学进展, 2022, 37(6): 612–626.
Zhu H H, Jiang S, Jiang Z H. Projection of climate extremes over China in response to 1.5/2.0 ℃ global warming based on the reliability ensemble averaging [J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(6): 612–626.

[22] 舒章康, 张建云, 金君良, 等. 1961—2018 年中国主要江河枯季径流演变特征与成因 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(3): 340–351.
Shu Z K, Zhang J Y, Jin J L, et al. Evolution characters and causes of the dry season runoff for the major rivers in China during 1961—2018 [J]. Climate Change Research, 2021, 17 (3): 340–351.

[23] Vicedo-Cabrera A M, Scovronick N, Sera F, et al. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change [J]. Nature Climate Change, 2021, 11(6): 492–500.

[24] 孔锋. 透视变化环境下的中国城市暴雨内涝灾害: 形势、原因与政策建议 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(10): 42–52.
Kong F. Perspective on urban rainstorm waterlogging disaster in China under changing environment: situation, causation and policy suggestion [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(10): 42–52.

[25] 张建云, 刘九夫, 金君良. 关于智慧水利的认识与思考 [J]. 水利水运工程学报, 2019 (6): 1–7.
Zhang J Y, Liu J F, Jin J L. Understanding and thinking about smart water conservancy [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019 (6): 1–7.

[26] 黄群芳. 城市空间形态对城市热岛效应的多尺度影响研究进展 [J]. 地理科学, 2021, 41(10): 1832–1842.
Huang Q F. Effects of urban spatial morphology on urban heat island effect from multi-spatial scales perspectives [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(10): 1832–1842

[27] 程顺祺, 王少谷, 陈晨, 等. 整体性政府视角下高温热浪应急管理的协同联动机制研究 [J]. 灾害学, 2019, 34(3): 160–166.
Cheng S Q, Wang S G, Chen C, et al. A study on the collaborative-linkage mechanism for high temperature heat wave—Based on the holistic government theory [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 160–166.

[28] 曹志杰, 陈绍军. 气候风险视阈下气候贫困的形成机理与演变态势 [J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2016, 18(5): 52–59, 91.
Cao Z J, Chen S J. Formation mechanism and evolution trend of climate poverty from the perspective of climate rish [J]. Journal of Hohani University(Philosophy and Social Sciences), 2016, 18(5): 52–59, 91.