

# 全球碳中和背景下中国气候与极端气候变化

蔡子怡<sup>1</sup>, 游庆龙<sup>1,2\*</sup>, 吴芳营<sup>1</sup>, 江志红<sup>3</sup>, 翟盘茂<sup>4</sup>

1. 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438
2. 极地海-冰-气系统与天气气候教育部重点实验室, 上海 200438
3. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044
4. 中国气象科学研究院, 北京 100081

**摘要** 利用第6次国际耦合模式比较计划(CMIP6)26个模式的3种共享社会经济路径(SSP)结果,选取了SSP1-2.6情景下全球大气CO<sub>2</sub>浓度达峰时间以确定全球碳中和时间,预估了未来全球碳中和时期相比于历史参考时期(1995—2014年)的中国气候与极端气候的响应变化,并与未实现碳中和的情景结果进行比较。结果表明,SSP1-2.6情景下全球达到碳中和时间为2062年左右(与中国的碳中和实现目标时间接近),相较于历史参考时期,SSP1-2.6碳中和时期中国区域平均升温(1.61±0.46)℃,降水增加(9.15±5.46)%,最大升温和增湿区域位于中国西北,增暖和增湿幅度分别达到(1.84±0.50)℃和(10.05±8.61)%;中国平均白天最高气温和夜间最低气温分别增加(1.78±0.76)℃和(1.83±0.69)℃,白天极端高温在青藏高原存在最大增幅(17.05±5.16)%,夜间极端低温在中国南方下降最为明显(-6.08±0.73)%;极端降水事件整体呈增加趋势,极端强降水在青藏高原最大增幅超过20%,最大连续干旱日数在中国北方减少而在南方增加。相比于未碳中和情景SSP2-4.5和SSP5-8.5,碳中和目标的实现可减缓未来中国的气候变化,极大防控中国大部分区域极端暖事件和极端湿事件的加剧,以及未来中国南方连续干旱日数的增加。因此,为缓解未来中国区域气候变化的加剧,需要合理控制CO<sub>2</sub>排放以实现“双碳”目标。

**关键词** 碳中和;气候变化;极端气候变化

收稿日期:2023-12-15;修回日期:2024-05-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFE0123800);上海市基础研究特区计划项目(22TQ007)

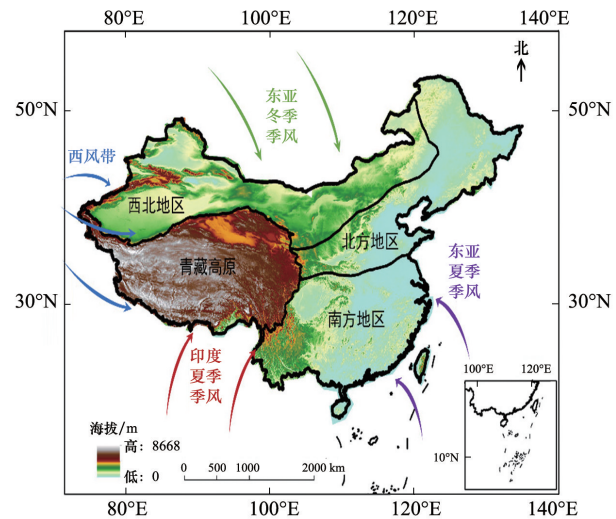
作者简介:蔡子怡,博士研究生,研究方向为气候变化诊断,电子信箱:zycai19@fudan.edu.cn;游庆龙(通信作者),教授,研究方向为气候与极端气候变化,电子信箱:qlyou@fudan.edu.cn

引用格式:蔡子怡,游庆龙,吴芳营,等.全球碳中和背景下中国气候与极端气候变化[J].科技导报,2024,42(19):73-84;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.02.00236

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第6次评估报告(AR6)指出,人类活动导致2010—2019年全球地表气温上升了 $1.07^{\circ}\text{C}$ ( $0.8^{\circ}\text{C}\sim 1.3^{\circ}\text{C}$ )。温室气体已被证实是造成全球变暖的主因,贡献了 $1.0^{\circ}\text{C}\sim 2.0^{\circ}\text{C}$ 的升温<sup>[1-3]</sup>。在全球变暖背景下,极端气候事件频发,包括热浪的增加、冷昼和冷夜的减少、极端降水事件的增加<sup>[4-7]</sup>。为控制和缓解全球气候变化,在2015年巴黎联合国气候变化大会(COP21)上,近200个缔约方一致同意通过《巴黎协定》。该协议提出了一个重要目标:将全球平均气温的增幅控制在高于工业化前水平 $2^{\circ}\text{C}$ 范围内,并努力将增幅控制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 之内<sup>[8]</sup>。2021年英国格拉斯哥联合国气候变化大会(COP26)呼吁到21世纪中叶全球实现净零排放,确保 $1.5^{\circ}\text{C}$ 的目标可以实现。2022年埃及联合国气候变化大会(COP27)进一步重申了《巴黎协定》目标,并指出与升温 $2^{\circ}\text{C}$ 相比,升温 $1.5^{\circ}\text{C}$ 时气候变化的影响将小得多。然而,研究表明全球升温的最大值将会在 $\text{CO}_2$ 开始减少约几十年后出现,且升温峰值出现的时间与排放量呈正比<sup>[9]</sup>。因此,为实现《巴黎协定》提出的全球升温控制在 $2^{\circ}\text{C}$ 和 $1.5^{\circ}\text{C}$ 的目标,必须有效控制碳排放。2020年9月,中国提出“ $\text{CO}_2$ 排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的目标。党的十九届五中全会把“双碳”目标作为“十四五”规划和2035年远景目标,以应对加剧的全球气候变化和推动全球气候行动。

中国地处东亚季风区,地形复杂,气候环境多样(图1)。在经济社会快速发展的同时,也面临着巨大的碳减排压力。伴随着全球变暖的加剧,中国的极端气候事件也在增加,给社会、经济和自然生态系统造成了巨大损失。例如,自1990年以来,极端气象灾害每年造成中国国内生产总值(GDP)损失 $2.37\%$ <sup>[10]</sup>。2013年夏季中国东部的严重热浪造成了约590亿元的直接经济损失<sup>[11]</sup>。因此预估未来中国气候和极端气候,有利于应对气候变化政策的制定。大量研究利用第五次/第六次国际耦合模式比较计划(CMIP5/CMIP6)输出结果对中国未来的气候及极端气候变化进行了预估。结果表明中国大部分地区面临增暖和增湿的加剧,且相较于全球



底图审图号: GS (2019) 1822号

图1 中国区域及分区示意

和北半球平均结果,中国气候的变暖和变湿更加明显<sup>[12-13]</sup>。在CMIP5典型浓度路径(RCP)4.5/8.5情景下,中国地表平均温度在 $1.5^{\circ}\text{C}/2^{\circ}\text{C}$ 全球温升时分别升高 $1.82^{\circ}\text{C}/1.83^{\circ}\text{C}$ 和 $2.60^{\circ}\text{C}/2.52^{\circ}\text{C}$ <sup>[14]</sup>;在CMIP6共享社会经济路径(SSP)5-8.5情景下 $1.5^{\circ}\text{C}/2^{\circ}\text{C}$ 全球温升时中国地表平均温度增加 $1.49^{\circ}\text{C}/2.21^{\circ}\text{C}$ <sup>[4]</sup>,平均降水量将增加 $(2.1\%\sim 2.9\%)/(3.2\%\sim 5.3\%)$ <sup>[12]</sup>。这说明额外的 $0.5^{\circ}\text{C}$ 升温将对气温和降水变化造成显著影响。与此同时,未来中国极端暖事件增多,极端冷事件减少<sup>[6]</sup>,极端降水事件的强度和频率以及干旱事件均将增加<sup>[4,15-16]</sup>。相较温升 $2^{\circ}\text{C}$ ,将温升控制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 可使得中国区域极端高温减少 $36\%\sim 87\%$ <sup>[17]</sup>,极端降水强度和频率减少一半<sup>[18]</sup>,干旱发生频率减少 $9\%$ <sup>[19]</sup>。因此,控制未来的全球变暖水平在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 之内,将有利于控制未来中国极端气候事件的加剧,而这需要在21世纪中叶左右达到净零碳排放<sup>[1]</sup>。

随着“双碳”目标的提出,针对碳中和背景下的中国气候变化研究也越来越多。基于RCP4.5情景和中国未来排放动态预测模型2030年排放数据的结果显示,“双碳”目标下的减排政策将极大改善未来的空气质量<sup>[20]</sup>。在中国实现“双碳”目标背景下,21世纪末全球温升可减少 $0.16\sim 0.21^{\circ}\text{C}$ <sup>[21]</sup>。邓荔等<sup>[22]</sup>聚焦CMIP6不同情景达到碳中和时的中国气

温和降水变化,发现仅 SSP1-1.9 和 SSP1-2.6 情景可在 21 世纪中叶达到碳中和,相比于历史参考时期年均温上升 1.22℃ 和 1.58℃,平均降水量增加 7.1% 和 9.9%,但增幅相比于无碳中和情景 SSP2-4.5 大大减少,尤其在冬季新疆和云南地区。就极端气候变化而言,已有结果表明碳中和情景下,到 21 世纪中叶全球平均极端热事件相较于基准情景可减少约 10%<sup>[23]</sup>。一项针对赣江流域的研究表明,相比于 1995—2014 年基准期,21 世纪“双碳”路径下赣江流域水资源更丰富且极端水文事件强度更低<sup>[24]</sup>。这些结果说明未来达到“双碳”目标对防控中国极端气候加剧有重要影响。然而,中国幅员辽阔,受不同气候系统的影响,不同区域对全球变暖的响应呈现出显著的时空差异<sup>[13-14]</sup>。因此,有必要基于不同气候分区来研究全球碳中和时期中国的气候和极端气候变化特征,为中国不同区域未来的气候行动制定提供参考。

基于此,本研究根据碳中和定义以及最新的 CMIP6 全球 CO<sub>2</sub> 的排放情景数据,结合中国碳中和时间为 2060 年前,选取 CMIP6 SSP1-2.6 情景下达到全球碳中和的时间,预估未来碳中和时期中国气候和极端气候的变化,重点关注平均气温、平均降水、极端气温和极端降水在中国不同区域的响应,并与未达到碳中和的中、高排放情景(SSP2-4.5、SSP5-8.5)结果进行比较。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

本研究使用 26 个 CMIP6 模式输出的日平均气温(Tas)、日最高气温(Tmax)、日最低气温(Tmin)和日降水(Pr)数据,情景为 Historical 情景(1850—2014 年)以及基于 3 种共享社会经济路径(SSP): SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 的未来预估情景(2015—2100 年)。其中, Historical 情景是在基于观测的、随时间变化的各种外强迫驱动下进行 1850 年以来的历史气候模拟,一般用来评估模式对气候变化的模拟能力,以及分析气候模式的辐射强迫和敏感性与观测记录的一致性。未来预估情

景根据不同社会经济路径与辐射强迫,分别选择了低、中和高 3 个层次。这 3 种未来情景分别是将 SSP1、SSP2 和 SSP5 社会经济路径添加到 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 辐射强迫情景中<sup>[25-26]</sup>。其中, SSP1-2.6 情景代表低排放情景,多模式集合平均的全球升温相比于工业革命前在 1.70℃ 左右,因此可以支持 2℃ 的升温目标。SSP2-4.5 情景代表了中等强度排放情景。SSP5-8.5 情景属于照常排放(高排放情景)发展路径,将在 2100 年人为辐射强迫达到 8.5 W/m<sup>2</sup><sup>[27]</sup>。模式基本信息如表 1 所示,同时使用 CMIP6 官网上可获取的 CMIP6 模式输出的 2015—2100 年大气中的 CO<sub>2</sub> 质量数据(单位: kg)来进行碳中和时间选取(涵盖所用 CMIP6 模式中的 9 个模式)。历史参考时期选择与 IPCC AR6 中一致的 1995—2014 年<sup>[1]</sup>。为了便于模式间的分析比较,所有模式均统一插值到 1.5°×1.5°。根据不同的地形地貌和所受的气候系统控制,将中国分为北方地区、西北地区、南方地区和青藏高原 4 个分区<sup>[13]</sup>进行研究。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 极端指标确定

本研究选用 IPCC AR6 关注的极端气候指标<sup>[1]</sup>(表 2),包括 4 个极端气温指标:白天最高温(TXx)、夜间最低温(TNn)、白天极端高温(TX90p)和夜间极端低温(TN10p); 4 个极端降水指标:降水强度(SDII)、一日最高降水量(RX1DAY)、极端强降水量(R95p)和连续干旱日数(CDD)<sup>[10]</sup>。使用 Climate Data Operators 软件(<https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/>)对数据进行质量控制并计算极端指标。为方便比较降水及极端降水强度指标,在分析时将 Pr、SDII、RX1DAY 和 R95p 单位换算成相对于历史时期的距平(%)。

#### 1.2.2 碳中和时期确定

IPCC AR6 给出的碳中和定义为:与某一主体相关的人为 CO<sub>2</sub> 排放被人为 CO<sub>2</sub> 清除量所平衡。根据 SSP 情景设计, SSP1-2.6 可在 21 世纪中叶达到碳中和<sup>[25-28]</sup>,故选择 SSP1-2.6 作为碳中和情景。本研究碳中和时期的选择参考邓荔等<sup>[22]</sup>,即从人为 CO<sub>2</sub> 排放净零和 CO<sub>2</sub> 浓度达峰 2 个角度考虑,根据

表1 本研究使用的CMIP6数据信息

数据	国家或地区	水平分辨率 (经度×纬度)	TAS数据/°C	Pr数据/ (mm·d <sup>-1</sup> )	Tmax数据/°C	Tmin数据/°C	CO <sub>2</sub> 数据/kg
ACCESS-CM2	澳大利亚	192×144	√	√	√	√	—
ACCESS-ESM1-5	澳大利亚	192×145	√	√	√	√	—
BCC-CSM2-MR	中国	320×160	√	√	√	√	—
CanESM5	加拿大	128×64	√	√	√	√	—
CESM2	美国	288×192	√	√	√	√	√
CESM2-WACCM	美国	288×192	√	√	√	√	√
CNRM-CM6-1	法国	256×128	√	√	√	√	—
CNRM-ESM2-1	法国	256×128	√	√	√	√	—
EC-Earth3	欧盟	512×256	√	√	√	√	—
EC-Earth3-Veg	欧盟	512×256	√	√	√	√	—
FGOALS-g3	中国	188×80	√	√	√	√	—
GFDL-CM4	美国	288×180	√	√	√	√	—
GFDL-ESM4	美国	288×180	√	√	√	√	√
HadGEM3-GC31-LL	英国	192×144	√	√	√	√	—
INM-CM4-8	俄罗斯	180×120	√	√	√	√	—
INM-CM5-0	俄罗斯	180×120	√	√	√	√	—
IPSL-CM6A-LR	俄罗斯	144×143	√	√	√	√	√
MIROC6	日本	256×128	√	√	√	√	—
MIROC-ES2L	日本	128×64	√	√	√	√	—
MPI-ESM1-2-HR	德国	384×192	√	√	√	√	√
MPI-ESM1-2-LR	德国	192×96	√	√	√	√	√
MRI-ESM2-0	日本	320×160	√	√	√	√	—
NESM3	中国	192×96	√	√	√	√	—
NorESM2-LM	挪威	144×96	√	√	√	√	√
NorESM2-MM	挪威	288×192	√	√	√	√	√
UKESM1-0-LL	英国	192×144	√	√	√	√	√

表2 极端气温和极端降水指标

指标名称	缩写	说明	单位
白天最高温	TXx	年日最高温的最大值	°C
夜间最低温	TNn	年日最低温的最小值	°C
白天极端高温	TX90p	年日最高温>1961—1990年90%分位值日数的百分比	%
夜间极端低温	TN10p	年日最低温<1961—1990年10%分位值日数的百分比	%
降水强度	SDII	年总降水量除以1年中的雨季天数(降水量≥1.0 mm)	mm·d <sup>-1</sup>
一日最高降水量	RX1DAY	年一日最高降水量	mm
极端强降水量	R95p	日降水量>1961—1990年95%分位值的年总降水量	mm
连续干旱日数	CDD	年日降水量<1 mm的最大连续天数	d

SSP1-2.6情景下CO<sub>2</sub>浓度的峰值时间找出碳中和达到时间,以该年份为中心,向前取9年并向后取10年,总共20年作为本文碳中和时期。利用表1中的CO<sub>2</sub>数据,如图2所示,SSP1-2.6情景下碳达峰到达时间为2062年,这一时间与中国碳中和时间

非常接近。以20年时间段来看,碳中和时期为2053—2072年。同时,选取SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下对应的20年气候态作为未来CO<sub>2</sub>持续上升背景下的气候变化对照。采用多模式集合平均方法,预估未来SSP1-2.6情景下碳中和时期的气温、

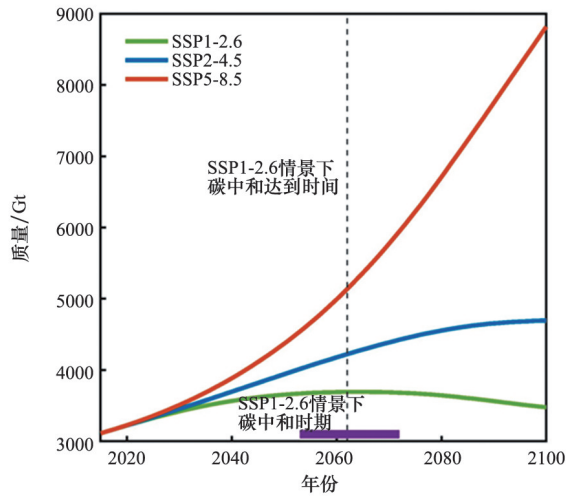


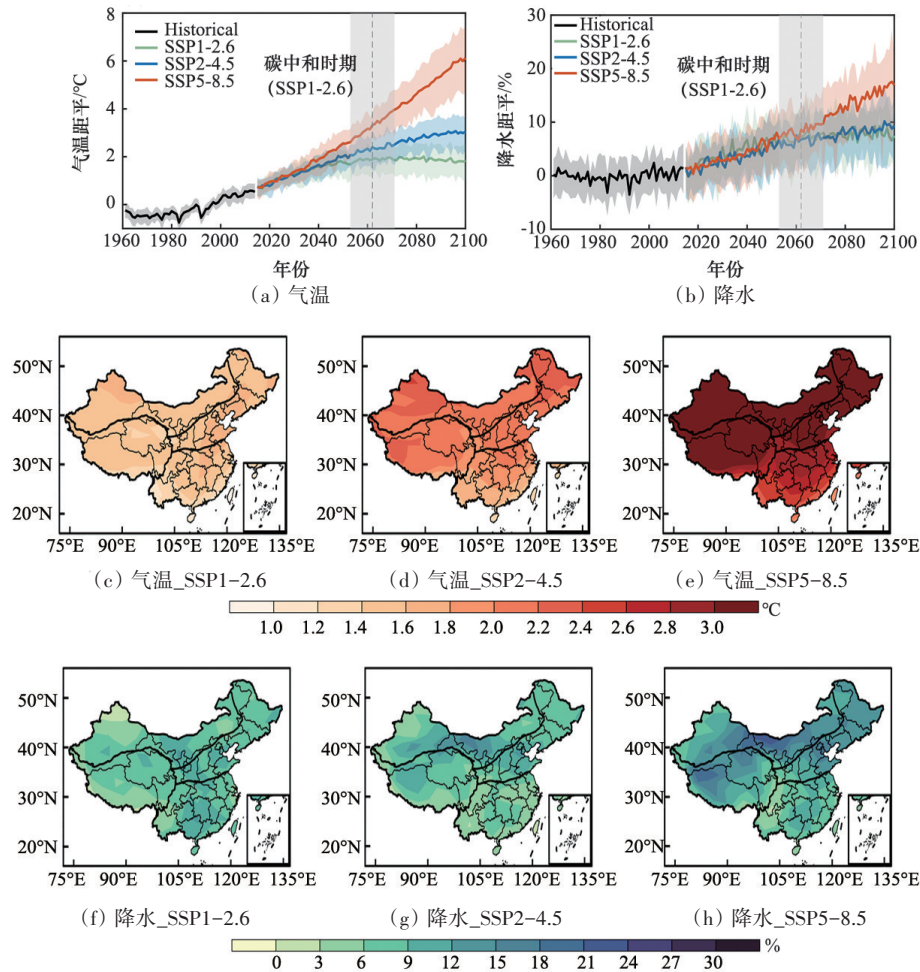
图2 SSP1-2.6、SSP2-4.5与SSP5-8.5情景下CO<sub>2</sub>的变化

降水、极端气温和极端降水较历史参考时期(1995—2014年)的变化,并与未达到碳中和的SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下的结果进行比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 碳中和目标下中国气温与降水的变化预估

如图3所示,未来中国气温和降水将持续增加。在SSP1-2.6情景下,在达到碳中和时期之后上升速率减缓甚至略有下降。在SSP2-4.5情景下,年均温到21世纪末速率才放缓,年降水量变化与SSP1-2.6类似。然而,在SSP5-8.5情景下,年均温和年降水量都将持续快速上升(图3(a)、(b))。



底图审图号: GS (2019) 1822号

(a)(b)为气温和降水相对于历史参考期(1995—2014年)变化的时间序列。灰色虚线为SSP1-2.6情景下CO<sub>2</sub>浓度达峰时间,灰色阴影为碳中和时期。(c)~(h)为碳中和时期SSP1-2.6情景下以及对应时间SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下中国区域年平均气温和降水相对历史参考期变化的空间分布

图3 未来SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下中国区域气温和降水变化

图3(c)~(h)展现了碳中和时期中国年均温和降水相对于参考时期的变化,显示了碳中和时期中国区域整体均明显升温。在SSP1-2.6情景下中国区域平均升温( $1.61\pm 0.46$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,降水增加( $9.15\pm 5.46$ )%。气温和降水增加大值区均位于中国西北地区,增幅分别可达( $1.84\pm 0.50$ ) $^{\circ}\text{C}$ 和( $10.05\pm 8.61$ )%,此外北方地区也出现升温大值区,平均增幅可达( $1.77\pm 0.54$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,降水增加也较为明显,达到( $9.41\pm 7.59$ )%。

相较于大气中 $\text{CO}_2$ 浓度持续上升的SSP2-4.5和更高排放情景SSP5-8.5,SSP1-2.6碳中和情景下的升温 and 降水增加均得到了一定控制。由图3(d)(e)可见,2个未碳中和情景显示出与碳中和情景类似的增暖空间分布,但幅度更大。中国年平均气温相比于参考时期的增幅分别比碳中和情景下增加 $0.53^{\circ}\text{C}$ 和 $1.57^{\circ}\text{C}$ 。在SSP5-8.5情景下,中国北方、西北地区和青藏高原增暖显著,相比于历史时期分别增加( $3.36\pm 0.81$ ) $^{\circ}\text{C}$ 、( $3.58\pm 0.75$ ) $^{\circ}\text{C}$ 和( $2.93\pm 0.70$ ) $^{\circ}\text{C}$ 。就降水而言,SSP2-4.5情景下的降水变化与碳中和情景类似,但在SSP5-8.5情景下中国平均降水相比于碳中和情景平均增加了4.65%。中国西北地区和青藏高原地区平均降水在SSP5-8.5情景下分别增加( $18.34\pm 10.27$ )%和( $15.07\pm 8.55$ )%,比碳中和情景下多了8.30%和6.33%(图3(g)(h))。

总体而言,未来碳中和时期中国面临明显的升温 and 降水增加,但相比于未碳中和情景,拥有碳中和时期的SSP1-2.6情景下的气温和降水变化幅度大幅降低,这在中国北方、西北和青藏高原地区更为明显。

## 2.2 碳中和目标下中国极端气温变化

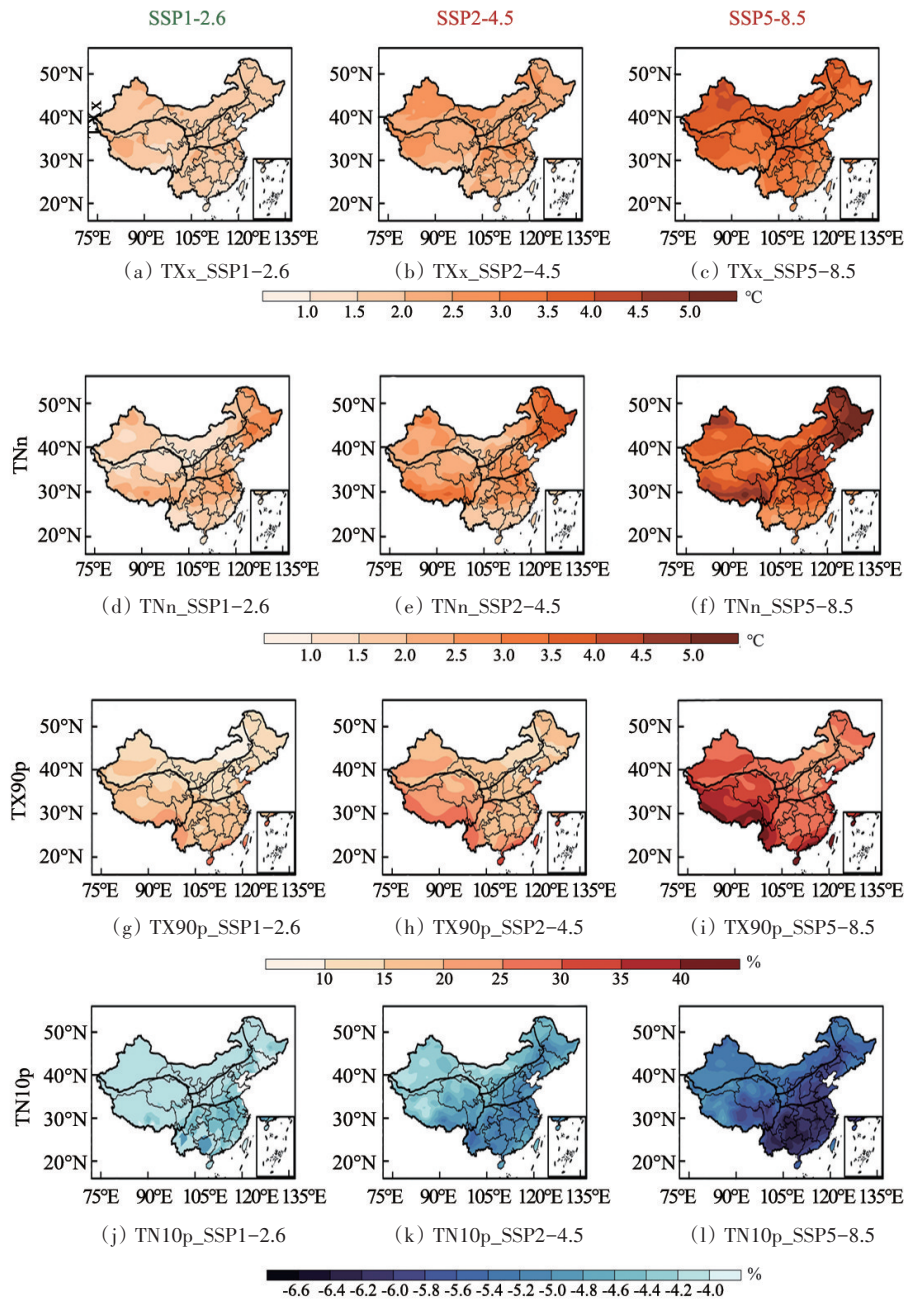
图4显示了SSP1-2.6情景下未来碳中和时期4种极端气温指标变化的空间格局。白天最高温和夜间最低温均上升,中国区域平均上升幅度分别达到( $1.77\pm 0.54$ ) $^{\circ}\text{C}$ 和( $1.83\pm 0.69$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,且夜间最低温上升幅度要高于白天最高温。白天最高温上升大值区位于长江中下游地区和青藏高原西北部。夜间最低温上升大值区在中国北方地区、长江中下游地区和青藏高原南部(图4(a)(d))。与此同时,白天

极端高温发生频率也整体上升,在中国南方地区和青藏高原较为明显,相比于历史参考时期的增幅分别达到( $17.04\pm 5.45$ )%和( $17.06\pm 5.16$ )%。夜间极端低温发生频率则明显下降,尤其在中国南方地区下降幅度为( $-4.54\pm 0.84$ )%(图4(g)(j))。

将SSP1-2.6达到碳中和时期的结果与SSP2-4.5和SSP5-8.5两种未达到碳中和的情景结果进行比较,发现碳中和情景可大大控制一些区域极端暖事件的强度和发生频率变化。例如,在SSP2-4.5/SSP5-8.5情景下,白天最高温、夜间最低温和白天极端高温发生频率增幅在青藏高原均为大值区(图4),相比于碳中和情景增幅将分别高出 $0.53^{\circ}\text{C}/1.64^{\circ}\text{C}$ 、 $0.86^{\circ}\text{C}/2.02^{\circ}\text{C}$ 和 $6.07\%/18.18\%$ 。这说明控制 $\text{CO}_2$ 排放以实现碳中和并将极大降低青藏高原的极端暖事件加剧程度。此外,相比于SSP2-4.5和SSP5-8.5情景,SSP1-2.6碳中和情景还将较大程度减少东北地区和西北新疆地区白天最高温、夜间最低温和白天极端高温事件的增加幅度,但青藏高原南部和南方地区夜间极端低温事件的减少幅度也有所降低(图4)。由此可见,实现碳中和目标可以有效控制未来中国面临的极端暖事件,尤其在西北和青藏高原等生态环境脆弱区,对于这些地区未来提高人类居住舒适度以及生态环境的可持续发展至关重要。

## 2.3 碳中和目标下中国极端降水变化

未来SSP1-2.6情景下碳中和时期极端降水指标变化结果显示出未来中国整体极端降水增加的特征(图5)。中国平均降水强度,一日最高降水量和极端强降水量在整个中国都有明显上升幅度,相比于参考时期平均增幅分别达到( $6.49\pm 3.08$ )%、( $10.11\pm 7.16$ )%和( $12.13\pm 5.31$ )%(图6)。在空间特征上,极端强降水量在青藏高原西部和横断山脉附近存在大值区,增幅超过20%(图5(g))。降水强度和一日最高降水量在内蒙古自治区和中国南方地区存在大值区(图5(a)、(d))。最大连续干旱日数则存在南北差异,未来碳中和时期最大连续干旱日数在中国北方明显减少,在中国南方则明显增加(图5(j))。这说明未来碳中和背景下中国北方主要体现为极端湿事件增加,而中国南方极端湿事件



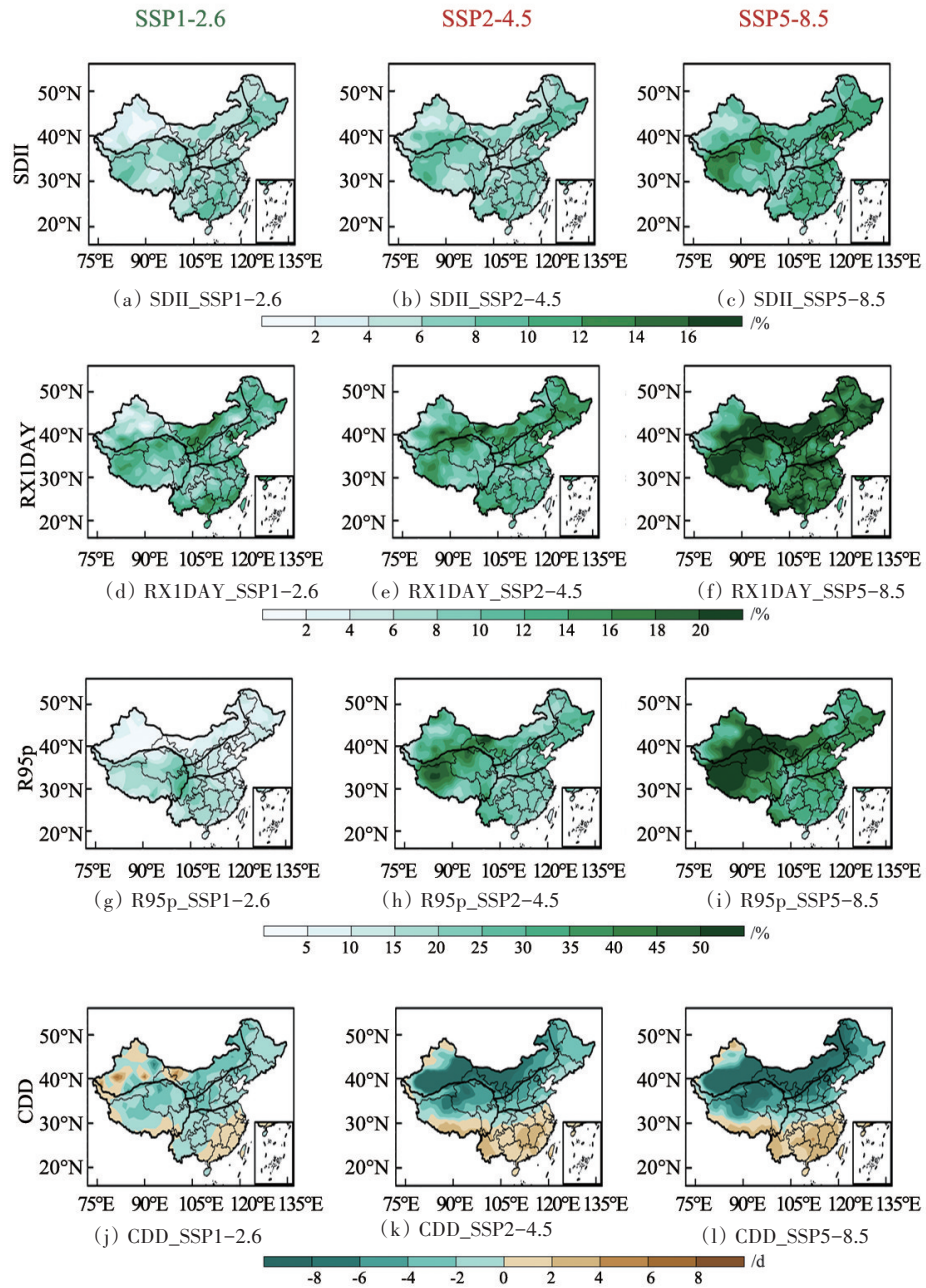
底图审图号: GS (2019) 1822号

图4 碳中和时期SSP1-2.6情景下以及对应时间SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下中国区域TXx(°C)、TNn(°C)、TX90p(%) 和 TN10p(%)相对历史参考期变化的空间分布

和极端干事件同时增加。

在2个未达到碳中和的情景下极端降水事件变化幅度更为明显,尤其在CO<sub>2</sub>持续上升的SSP5-8.5情景下。尽管在SSP5-8.5情景下极端降水变化的空间格局与SSP1-2.6类似,但中国平均降水强度,一日最高降水量和极端强降水量相比于SSP1-

2.6碳中和时期的增幅增加了3.77%、7.28%和29.16%(图6(g)~(i))。在该情景下,青藏高原西北部以及中国西北部存在极端增湿大值区,其中极端强降水量增幅可达50%以上。相比于SSP1-2.6的碳中和时期,中国北方平均最大连续干旱日数增幅减少了3.29 d,而中国南方地区平均最大连续干旱



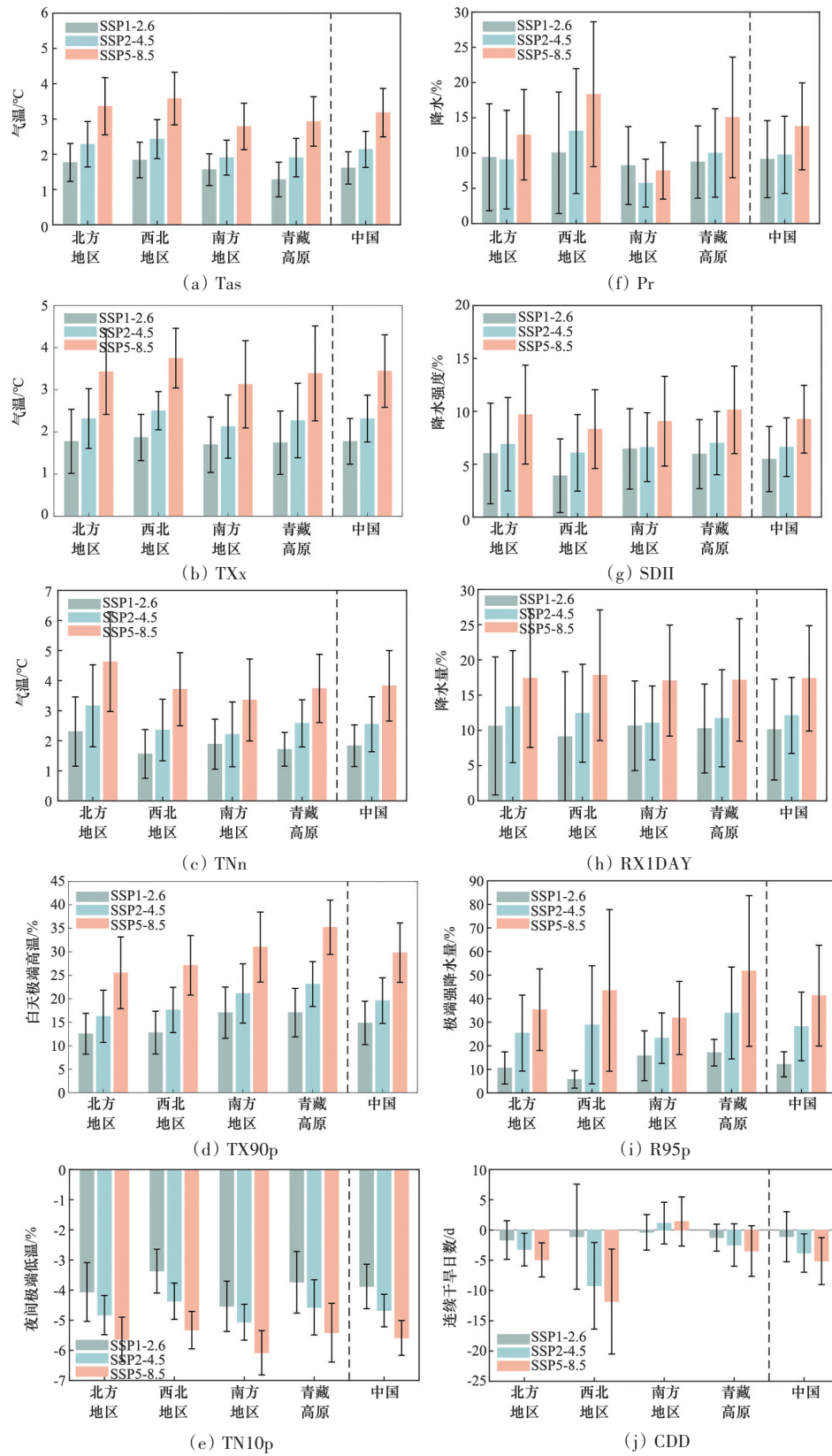
底图审图号: GS (2019) 1822号

注:SDII、RX1DAY、R95p单位转化为距平百分比:[(未来时期-历史时期)/历史时期]×100%。

图5 碳中和时期SSP1-2.6情景下以及对应时间SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下中国区域SDII(%),RX1DAY(%), R95p(%)和CDD(d)相对历史参考期变化的空间分布

日数增加了1.79 d(图6(j))。这说明碳中和目标的实现可使得未来极端降水发生强度和概率相比于无碳中和情景大大降低,控制了中国北方地区极端湿事件的加剧,这将有利于减少中国北方,西北和青藏高原地区洪涝、山体滑坡和泥石流等自然灾害的风险,同时减少了未来南方地区所面临的干旱风险。

此外值得注意的是,如图6的误差棒所示,模式对于未来极端降水变化的模拟还存在较大的模式间不一致性,尤其在中国西北地区对于最大连续干旱日数的模拟还出现模式间符号不一致的情况。因此未来还需要结合更多的数据和分析手段,降低这种不确定性带来的未来预估误差。



注:SDII、RX1DAY、R95p单位转化为距平百分比:[(未来时期-历史时期)/历史时期]×100%。

图6 未来中国及其4个分区在SSP1-2.6情景下碳中和时期以及对应时间的SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下的区域平均气温、极端气温和极端降水相对于历史参考时期(1995—2014年)的变化(误差棒表示±1个标准差范围)

### 3 讨论

利用 CMIP6 SSP1-2.6 情景作为未来碳中和情景,确定了 SSP1-2.6 情景下全球碳中和时期为 2053—2072 年。预估了未来 SSP1-2.6 情景下碳中和时期中国及其 4 个子分区相对于历史参考时期的气候变化。将未来中排放情景 SSP2-4.5 和高排放情景 SSP5-8.5 作为对照情景,比较 SSP1-2.6 有碳中和情景与这 2 个无碳中和情景气候和极端气候响应的差异。研究结果强调了在未来中国暖、湿加剧,极端气候事件增加的背景下,碳中和目标的实现对中国区域气候和极端气候变化具有积极影响,极大降低了中国北方、西北和青藏高原区域极端暖事件和极端湿事件的增幅,同时极大防控了未来南方地区极端低温事件和干旱事件的发生。

不同于前人仅针对碳中和时期气温和降水的变化研究<sup>[22]</sup>,本研究更加关注碳中和目标实现对中国多个气候变化热点区域的极端气候变化的影响<sup>[10]</sup>。例如,青藏高原对于未来气候变化的响应比周边地区更强,未来全球变暖背景下极端气候事件加剧<sup>[29-30]</sup>,面临极大的冰冻圈和生态系统失衡风险<sup>[31-32]</sup>。然而,碳中和目标实现可以有效控制青藏高原未来极端高温事件和极端降水事件的增加,这对于该区域未来的生态环境保护和可持续发展具有重要意义。西北干旱区由于地处内陆,未来极端气温事件的加剧使得该区域存在土地退化和荒漠化的风险<sup>[33-34]</sup>,同时极端降水事件在更暖背景下也将成倍加剧<sup>[35]</sup>,碳中和目标的实现可降低未来这些风险的增加。东部季风区的江淮地区是中国主要人口聚集地且城市众多,未来极端湿事件和连续干旱日数均将增加<sup>[4, 36]</sup>,但在碳中和目标背景下,极端湿事件和最大连续干旱日数的加剧均可被较大程度控制,将缓解该地区未来居住舒适度的降低,减少未来极端气候事件造成的社会经济损失。

此外,研究结果还表明相比于中低排放情景,高排放情景下我国的暖、湿程度以及极端气候强度和发生频率将成倍增加,这在中国西北和青藏高原等生态脆弱区尤为明显。该结果表明控制 CO<sub>2</sub> 排放的紧迫性,相关部门需采取更加强有力的政策与

措施,如积极开发新能源,促进产业低碳化,和倡导践行绿色低碳生活等,力争尽早实现碳中和。同时,需努力提高生态脆弱地区适应未来气候变化和气候风险的水平,建立和完善气候风险评估防范机制,加强气候风险管理,助力未来可持续发展。

### 4 结论

1) 未来中国暖湿加剧,相比于未达到碳中和的 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景,SSP1-2.6 碳中和情景可缓解未来中国的暖湿加剧,尤其在中国北方和西北地区。

2) 极端气温在碳中和时期显示出暖事件加剧和冷事件减少的特征,且夜间最低气温增幅要高于白天最高温。极端暖事件如白天最高气温和白天极端高温发生频率增幅大值区位于青藏高原和中国北方地区。极端冷事件如夜间极端低温在中国南方地区下降较为明显。相比于未碳中和情景,SSP1-2.6 碳中和情景使得中国北方和西北地区的白天最高温以及夜间最低温增幅降低,同时将较大程度控制青藏高原白天极端高温事件的加剧。

3) 未来碳中和时期中国平均降水强度,一日最高降水量和极端强降水量在整个中国相比于历史参考时期都有明显上升幅度,其中增幅大值区位于青藏高原和横断山脉附近。最大连续干旱日数变化呈现明显的南北反向变化。相比于未碳中和情景,SSP1-2.6 碳中和情景预估的未来极端降水强度和发生频率的增幅被大大降低,同时明显控制了未来南方地区所面临的干旱事件的加剧。

### 参考文献 (References)

- [1] IPCC. Summary for policymaker[R]//Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Allen M R, Frame D J, Huntingford C, et al. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne[J]. Nature, 2009, 458(7242): 1163-1166.
- [3] Stocker B D, Roth R, Joos F, et al. Multiple greenhouse-

- gas feedbacks from the land biosphere under future climate change scenarios[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(7): 666–672.
- [4] Zhu H H, Jiang Z H, Li L. Projection of climate extremes in China, an incremental exercise from CMIP5 to CMIP6 [J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(24): 2528–2537.
- [5] Aihaiti A, Jiang Z H, Zhu L H, et al. Risk changes of compound temperature and precipitation extremes in China under 1.5°C and 2°C global warming[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 264: 105838.
- [6] Shi C, Jiang Z H, Chen W L, et al. Changes in temperature extremes over China under 1.5°C and 2°C global warming targets[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2018, 9(2): 120–129.
- [7] Guo X J, Huang J B, Luo Y, et al. Projection of precipitation extremes for eight global warming targets by 17 CMIP5 models[J]. *Natural Hazards*, 2016, 84(3): 2299–2319.
- [8] UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement[R]. Geneva: United Nations Office at Geneva SU, 2015.
- [9] Zickfeld K, Herrington T. The time lag between a carbon dioxide emission and maximum warming increases with the size of the emission[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(3): 031001.
- [10] You Q L, Jiang Z H, Yue X, et al. Recent frontiers of climate changes in East Asia at global warming of 1.5°C and 2°C [J]. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2022, 5: 80.
- [11] Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, et al. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(12): 1082–1085.
- [12] 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[J]. *科学通报*, 2017, 62(26): 3098–3111.
- [13] You Q L, Cai Z Y, Wu F Y, et al. Temperature dataset of CMIP6 models over China: Evaluation, trend and uncertainty[J]. *Climate Dynamics*, 2021, 57(1): 17–35.
- [14] Wu F Y, You Q L, Zhang Z Y, et al. Changes and uncertainties of surface mean temperature over China under global warming of 1.5 and 2°C[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(Suppl 1): 410–427.
- [15] Wang G, Zhang Q, Yu H Q, et al. Double increase in precipitation extremes across China in a 1.5°C/2.0°C warmer climate[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 746: 140807.
- [16] Li H X, Chen H P, Wang H J, et al. Future precipitation changes over China under 1.5°C and 2.0°C global warming targets by using CORDEX regional climate models[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640/641: 543–554.
- [17] Zhang G W, Zeng G, Yang X Y, et al. Future changes in extreme high temperature over China at 1.5°C–5°C global warming based on CMIP6 simulations[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(2): 253–267.
- [18] Li W, Jiang Z H, Zhang X B, et al. Additional risk in extreme precipitation in China from 1.5°C to 2.0°C global warming levels[J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(4): 228–234.
- [19] Chen H P, Sun J Q. Increased population exposure to extreme droughts in China due to 0.5°C of additional warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(6): 064011.
- [20] 徐北瑶, 王体健, 李树, 等. “双碳”目标对我国未来空气污染和气候变化的影响评估[J]. *科学通报*, 2022, 67(8): 784–794.
- [21] Chen J W, Cui H J, Xu Y Y, et al. Long-term temperature and sea-level rise stabilization before and beyond 2100: Estimating the additional climate mitigation contribution from China’s recent 2060 carbon neutrality pledge[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(7): 074032.
- [22] 邓荔, 朱欢欢, 江志红. 不同情景达到碳中和下中国区域气候变化的预估[J]. *大气科学学报*, 2022, 45(3): 364–375.
- [23] Zhang J T, You Q L. Avoidable heat risk under scenarios of carbon neutrality by mid-century[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 892: 164679.
- [24] 杨晨辉, 王艳君, 苏布达, 等. SSP “双碳”路径下赣江流域径流变化趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(2): 177–187.
- [25] Gidden M J, Riahi K, Smith S J, et al. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century[J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(4): 1443–1475.
- [26] O’Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6[J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(9): 3461–3482.
- [27] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 519–525.
- [28] Tebaldi C, Debeire K, Eyring V, et al. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6[J]. *Earth System Dy-*

- namics, 2021, 12(1): 253–293.
- [29] You Q L, Zhang Y Q, Xie X Y, et al. Robust elevation dependency warming over the Tibetan Plateau under global warming of 1.5°C and 2°C[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(3): 2047–2060.
- [30] You Q L, Chen D L, Wu F Y, et al. Elevation dependent warming over the Tibetan Plateau: Patterns, mechanisms and perspectives[J]. *Earth–Science Reviews*, 2020, 210: 103349.
- [31] Yao T D, Bolch T, Chen D L, et al. The imbalance of the Asian water tower[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 618–632.
- [32] Yao T D, Thompson L, Chen D L, et al. Reflections and future strategies for Third Pole Environment[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 608–610.
- [33] Ge J, Qiu B, Wu R Q, et al. Does dynamic downscaling modify the projected impacts of stabilized 1.5°C and 2°C warming on hot extremes over China? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(6): e2021GL092792.
- [34] Huang J P, Yu H P, Dai A G, et al. Drylands face potential threat under 2°C global warming target[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 417–422.
- [35] Zhang M, Yu H P, King A D, et al. Greater probability of extreme precipitation under 1.5°C and 2°C warming limits over East–Central Asia[J]. *Climatic Change*, 2020, 162(2): 603–619.
- [36] Guo L Y, Jiang Z H, Ding M, et al. Downscaling and projection of summer rainfall in Eastern China using a nonhomogeneous hidden Markov model[J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(3): 1319–1330.

## China's climate and extreme climate changes under the global carbon neutrality scenario

CAI Ziyi<sup>1</sup>, YOU Qinglong<sup>1,2\*</sup>, WU Fangying<sup>1</sup>, JIANG Zhihong<sup>3</sup>, ZHAI Panmao<sup>4</sup>

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China
2. Key Laboratory of Polar Atmosphere–ocean–ice System for Weather and Climate, Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200438, China
3. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
4. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract** This study utilizes the data from 26 CMIP6 models to explore the timeline for global carbon neutrality under the SSP1–2.6 scenario, focusing on the peak CO<sub>2</sub> concentration time. It assesses changes in China's climate and extreme climate during the carbon neutrality period, using 1995–2014 as a reference. Meanwhile, these findings are contrasted with the outcomes from scenarios where carbon neutrality was not achieved. The results indicate that under the SSP1–2.6 scenario, global carbon neutrality will be achieved around 2062 (close to China's carbon neutrality target time). The regional average temperature in China during the SSP1–2.6 carbon neutrality period is expected to increase by (1.61±0.46)°C, with a precipitation increase of (9.15±5.46)%. The most significant change areas will be located in northwestern China, with temperature and precipitation increases reaching (1.84±0.50)°C and (10.05±8.61)%, respectively. The average hottest days and coldest nights in China will increase by (1.78±0.76)°C and (1.83±0.69)°C, respectively. Warm days will likely increase most significantly on the Tibetan Plateau (17.05±5.16)%, while cool nights decrease most in southern China (–6.08±0.73)%. Extreme precipitation events will intensify, with very wet days near the Tibetan Plateau increasing by more than 20%. Meanwhile, the consecutive dry days will decrease in northern China but increase in the southern regions. Compared to non-carbon neutrality scenarios like SSP2–4.5 and SSP5–8.5, the achievement of dual carbon goals can help mitigate future extreme climate change in China. It helps control extreme temperature and precipitation increases in northern China and the Tibetan Plateau, and reduce consecutive dry days in southern China. Therefore, to alleviate the exacerbation of regional climate change in China in the future, it is crucial to control CO<sub>2</sub> emissions more rationally to achieve "dual carbon" goals.

**Keywords** carbon neutrality; climate change; extreme climate change ●



(责任编辑 徐丽娇)