

基于 NEX-GDDP-CMIP6 的不同温升 情景下中国气候要素变化

温姗姗¹, 汪辰钰¹, 翟建青², 周彪¹

(1. 安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241002; 2. 国家气候中心

气候系统预测与变化应对全国重点实验室, 北京 100081)

摘要: [目的] 全球温升对气候系统具有持续性影响, 深入理解不同温升情景下气候要素的变化趋势及其空间分布特征, 有助于为制定差异化的气候适应策略提供科学依据。[方法] 基于 NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6) 高分辨率数据, 评估全球温升 1.5~5.0 °C 情景下中国气候要素的变化, 重点分析 6 个关键气候变量的变化趋势及空间分布。[结果] 中国陆地增温速率高于全球平均水平, 且相对增幅随全球温升呈加剧趋势。当全球温升 1.5 °C 时, 中国年平均气温上升约 1.3 °C, 温升 5.0 °C 时, 中国升温达 5.92 °C, 最低气温增幅更高, 达 6.21 °C, 东北、华北和青藏高原地区增温尤为显著。降水量随温升显著增加, 全球温升 3.0 °C 时, 70% 的地区年降水量增幅超过 50 mm, 青藏高原和西北地区增幅超过 100 mm。伴随温升, 极端高温和极端降水事件的频率和强度可能增加。风速和相对湿度整体呈下降趋势, 可能影响风能资源开发和区域水汽循环: 在全球温升 1.5 °C 时, 风速下降约 0.15 m/s, 温升 5.0 °C 时下降至 0.32 m/s, 降幅扩大约 1 倍; 相对湿度在温升 5.0 °C 时较基准期下降 0.34%, 但模式间存在较大不确定性。[结论] 研究结果为中国区域气候变化的适应与减缓政策提供了科学依据, 突出了控制全球温升的重要性, 有助于应对气候变化带来的潜在挑战, 降低未来气候风险。

关键词: NEX-GDDP-CMIP6; 温升情景; 气候要素; 时空变化; 中国

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0219-15

Changes in Climate Elements in China under Different Warming Scenarios Based on NEX-GDDP-CMIP6

WEN Shanshan¹, WANG Chenyu¹, ZHAI Jianqing², ZHOU Biao¹

(1. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002, China; 2. State Key

Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management, National Climate Centre,

China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: [Objective] With global warming exerting persistent impacts on the climate system, this study investigates the evolving trends and spatial patterns of climatic elements across China under different warming scenarios, aiming to provide a scientific foundation for formulating differentiated climate adaptation strategies. [Methods] High-resolution data from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6) were utilized to assess changes in climatic elements across China under global warming scenarios ranging from 1.5 °C to 5.0 °C. Emphasis was placed on analyzing trends and spatial distribution of six key climate variables. [Results] The rate of land surface warming in China exceeded the global average, and the magnitude of temperature rise showed an intensifying trend relative to global temperature increases. When the global temperature rose by 1.5 °C, China's annual mean temperature increased by approximately 1.3 °C, whereas under a

收稿日期: 2025-01-27

修回日期: 2025-02-25

录用日期: 2025-03-10

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-07-27

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42005126, 42271081)

第一作者: 温姗姗 (1989—), 女, 讲师, 主要从事气候变化影响研究。E-mail: wenss@ahnu.edu.cn

通信作者: 温姗姗 (1989—), 女, 讲师, 主要从事气候变化影响研究。E-mail: wenss@ahnu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

5.0 °C global warming scenario, this rise reached 5.92 °C. The minimum temperatures increased even more markedly, reaching 6.21 °C, with significant warming observed in northeast China, north China, and the Qinghai-Xizang Plateau. Precipitation increased significantly with rising temperatures. Under a 3.0 °C global warming scenario, 70% of regions experienced annual precipitation increases by over 50 mm, with increases exceeding 100 mm in the Qinghai-Xizang Plateau and northwest China. With warming, the frequency and intensity of extreme high-temperature and precipitation events might intensify. Wind speed and relative humidity show declining trends, potentially affecting wind energy utilization and the regional water vapor cycle. Under a 1.5 °C warming scenario, wind speed decreased by about 0.15 m/s, declining to 0.32 m/s under a 5.0 °C warming scenario, which was double the decrease in the 1.5 °C scenario. Relative humidity declined by 0.34% compared to the reference period when the global temperature rose by 5.0 °C, but substantial inter-model uncertainties persisted. **[Conclusion]** These findings provide a scientific basis for climate adaptation and mitigation policies in China, underscoring the critical need to constrain global temperature rise to address potential climate challenges and reduce future climate risks.

Keywords: NEX-GDDP-CMIP6; warming scenarios; climatic elements; spatiotemporal variation; China

Received: 2025-01-27

Revised: 2025-02-25

Accepted: 2025-03-10

Online(www.cnki.net): 2025-07-27

自工业革命以来,地球气候发生显著变化,人类活动对气候系统的影响已毋庸置疑^[1]。全球变暖导致气候系统的多方面变化,影响生态系统、生物多样性及人类社会的各个方面^[2-3]。中国生态环境整体较为脆弱,已受到气候变化带来的广泛而严重的影响^[4-5]。为应对气候变化带来的严峻挑战,各国共同签署《巴黎协定》。根据该协定^[6],各国承诺将全球平均气温上升控制在比工业化前水平高远低于 2 °C 以内,并努力将升温限制在 1.5 °C 之内。然而,最新监测数据^[7]表明,实现目标的严峻性:2024 年全球地表平均温度较 1850—1900 年基准期异常偏高达 1.55 °C (±0.13 °C),标志着人类首次在完整年度尺度突破了 1.5 °C 临界阈值。研究^[8]表明,超过 1.5 °C 的升温可能引发更严重的气候变化影响和极端天气,每升高 0.1 °C 都可能带来显著影响。因此,在全球变暖背景下开展未来气候变化特征的预估研究已成为政府部门和社会各界关注的焦点,准确预估并深入理解未来气候变化特征,对于制定有效的适应和减缓策略具有重要意义。

全球气候模型(GCMs)是模拟过去和未来气候变化的重要工具,多模型框架有助于更全面地理解地球系统及其过程。最新的第六次耦合模式比较计划(CMIP6)在模型分辨率和动力过程方面进行改进,并基于新的共享社会经济路径(SSP)情景开展未来气候变化模拟^[9-10]。相较于上一代模式比较计划(CMIP5)的模式结果,CMIP6 模式的模拟性能有显著的提升,但在模拟和预估中仍然存在较大的不确定性^[11],大多数 GCMs 仍在相对较粗的网格分辨率上运行,且各模式分辨率存在差异。粗网格分辨率

限制了模式捕捉区域空间细节的能力,给局地尺度的气候响应研究带来挑战^[12]。

为突破分辨率瓶颈,过去 20 a 科学界系统发展了多种动力和统计降尺度方法^[13-14]。美国国家航空航天局(NASA)亦启动全球逐日数据降尺度项目。在 CMIP5 阶段,NASA 对 21 个 CMIP5 模式数据进行降尺度处理,生成 Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections(NEX-GDDP-CMIP5)数据集^[15]。该数据集在全球气候变化研究中得到广泛应用,能提供丰富的区域尺度气候变化信息,有效降低未来气候预估的不确定性^[15-16]。2022 年,NASA 发布 NEX-GDDP-CMIP6 数据集^[17],包含 35 个 CMIP6 模式在 4 种情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5)下的多要素日尺度数据,涵盖降水、气温(平均、最高、最低)、风速和相对湿度等变量,空间分辨率为 0.25°×0.25°。该高分辨率数据集正逐渐获得更多应用,已有诸多关于亚洲、非洲、欧洲和中国极端事件的研究^[18-22]。

中国地形地貌复杂、气候类型多样,人口众多,全面研究中国的气候变化需要高分辨率数据^[4]。高分辨率数据能够更好地呈现中国气候变化的细节特征,是理解未来气候变化和开展相关研究的重要基础^[23-24]。然而,当前研究多聚焦特定气候灾害(如极端气温或降水)^[20-22],尚缺乏利用 NEX-GDDP-CMIP6 高分辨率数据对中国多关键气候要素的系统分析。为此,本研究利用 NEX-GDDP-CMIP6 高分辨率数据,评估全球升温 1.5~5.0 °C 情景下中国气候要素的变化,重点分析 6 个关键气候变量的变化趋势与空间分布。通过对气温、降水、风速和相对湿度等要素的深入研究,旨在

为中国区域气候变化的适应与减缓政策提供科学依据,强调控制全球温升的重要性,以应对气候变化带来的潜在挑战并降低未来气候风险。

1 数据与方法

1.1 研究数据

本研究采用 NASA 开发的 NEX-GDDP-CMIP6 高分辨率统计降尺度数据集对中国陆地气候进行预估。该数据集通过结合地面观测数据和 CMIP6 原始 GCMs 输出结果,生成空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ (约 $25\text{ km}\times 25\text{ km}$) 的偏差校正数据,覆盖历史时期 (1950—2014 年) 和未来预估期 (2015—2100 年)^[15]。研究选取全部 35 个 GCMs 的 6 个关键气候要素:平均近地表气温 (t_{as})、最高气温 ($t_{as_{max}}$)、最低气温 ($t_{as_{min}}$)、降水量 (pr)、近地表相对湿度 ($hurs$) 和近地表风速 (sfc_{wind})。

基准期为 1995—2014 年,未来预估基于 4 种情景

(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5)^[9]。4 种 SSP 情景是对未来全球社会经济发展路径的描述,涵盖从低排放到高排放的多种可能性。SSP1-2.6 是低温室气体排放情景 (或称“可持续发展路径”),预计 CO_2 排放量分别在 2050 年左右或之后降至零净值,然后实现 CO_2 净负排放,2100 年辐射强迫稳定在 2.6 W/m^2 ; SSP2-4.5 是中等温室气体排放情景 (或称“中间路径”),在这种情景下,未来的气候变化相较于当前的气候变化趋势没有实质性的偏离,到 2100 年 CO_2 辐射强迫稳定为 4.5 W/m^2 ; SSP3-7.0 是高温温室气体排放情景, CO_2 排放量快速增加,到 2100 年辐射强迫达到约 7.0 W/m^2 ; SSP5-8.5 是一种极高的温室气体排放情景 (化石燃料为主的高速发展路径)。由于没有关于温室气体排放的政策约束,人们大量消耗化石燃料以追求经济的快速发展,导致 2100 年辐射强迫为 8.5 W/m^2 。

通过对各模式数据质量和完整性的系统评估,最终筛选出 20 个 GCM 用于本研究分析 (表 1)。

表 1 本研究采用的 20 个 NEX-GDDP-CMIP6 全球气候模式信息

Table 1 Details of 20 NEX-GDDP-CMIP6 global climate models used in this study

模式	所属国家/机构	原始分辨率	模式	所属国家/机构	原始分辨率
ACCESS-CM2	澳大利亚/CSIRO	$1.875^{\circ}\times 1.250^{\circ}$	GISS-E2-1-G	美国/NASA-GISS	$2.500^{\circ}\times 2.000^{\circ}$
ACCESS-ESM1-5	澳大利亚/CSIRO	$1.875^{\circ}\times 1.250^{\circ}$	IPSL-CM6A-LR	法国/IPSL	$2.500^{\circ}\times 1.259^{\circ}$
CanESM5	加拿大/CCCma	$2.812^{\circ}\times 2.770^{\circ}$	MIROC6	日本/MIROC	$1.403^{\circ}\times 1.403^{\circ}$
CMCC-ESM2	意大利/CMCC	$1.250^{\circ}\times 0.940^{\circ}$	MIROC-ES2L	日本/MIROC	$1.403^{\circ}\times 1.403^{\circ}$
CNRM-CM6-1	法国/CNRM-CERFACS	$1.406^{\circ}\times 1.406^{\circ}$	MPI-ESM1-2-HR	日本/MRI	$0.938^{\circ}\times 0.939^{\circ}$
CNRM-ESM2-1	法国/CNRM-CERFACS	$1.406^{\circ}\times 1.406^{\circ}$	MPI-ESM1-2-LR	日本/MRI	$1.900^{\circ}\times 1.900^{\circ}$
EC-Earth3	欧盟/EC-Earth-Consortium	$0.703^{\circ}\times 0.703^{\circ}$	MRI-ESM2-0	日本/MRI	$1.125^{\circ}\times 1.125^{\circ}$
EC-Earth3-Veg-LR	欧盟/EC-Earth-Consortium	$1.125^{\circ}\times 1.125^{\circ}$	NorESM2-LM	挪威/NCC	$2.500^{\circ}\times 1.890^{\circ}$
FGOALS-g3	中国/CAS	$2.000^{\circ}\times 2.025^{\circ}$	NorESM2-MM	挪威/NCC	$1.250^{\circ}\times 0.940^{\circ}$
GFDL-ESM4	美国/NOAA-GFDL	$1.250^{\circ}\times 1.000^{\circ}$	UKESM1-0-LL	英国/MOHC	$1.875^{\circ}\times 1.250^{\circ}$

本研究采用的气象观测数据来自基于中国 2 400 余个地面气象台站观测资料插值建立的格点数据集 CN05.1,包括 1961 年以来的逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水、平均风速和相对湿度,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。CN05.1 数据因其高空间分辨率和时空连续性优势,已在中国范围内被广泛应用于气候变化检测、归因和模式评估等研究中^[24-26]。本研究选取该数据集中 1995—2014 年的逐日资料,用于气候模式模拟能力的评估。

1.2 研究方法

1.2.1 模式评估 采用泰勒图评估气候模式性能^[27]。该图基于极坐标系整合 3 个关键统计量:模式模拟与观测序列的标准差、相关系数和均方根偏差 (RMSD)。标准差反映模拟数据的波动性,相关系数衡量模拟结果与观测数据之间的线性相关性,而

RMSD 则量化二者之间的总体偏差。通过这种综合展示,泰勒图能够快速识别各模式的优缺点,帮助确定在特定气候要素模拟中表现较好的模式,为模型优化和改进提供依据。

在气候变化评估研究中,多模式集合 (MME) 被广泛认为是降低模拟不确定性的有效手段。与单一模式相比,MME 的模拟结果更具稳健性和可靠性^[28]。本研究采用等权重方法构建 MME,并将其结果与各单一模式在泰勒图中进行对比分析。通过空间插值方法分析气候要素的空间分布,系统评估 MME 与观测数据在空间格局上的一致性,从而全面验证模型的模拟能力。

1.2.2 全球温升 $1.5\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时段的选取 由于不同排放情景下全球气温上升速率不同,排放强度越高,达到相同温升阈值的时间越早。NEX-GDDP-CMIP6 数据集覆盖 1950—2100 年,其在进行偏差校正和空

间分辨率提升的同时,并未引入超出 CMIP6 原始情景之外的信息。因此,本研究基于 CMIP6 模拟结果来确定全球温升时段。

根据所选气候模式的模拟结果,识别全球年平均近地表气温相对于工业化前(1850—1900 年)升高 1.5~5.0℃(以 0.5℃为间隔)所对应的年份(表 S1)。具体方法为:利用各模式的历史模拟和未来情景数据,与工业化前基准气温进行比较,分析气温变化趋势,提取达到各温升阈值的年份。对于不同排放情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5),计算每个模式的温升时段,并据此开展未来气候要素变化分析。

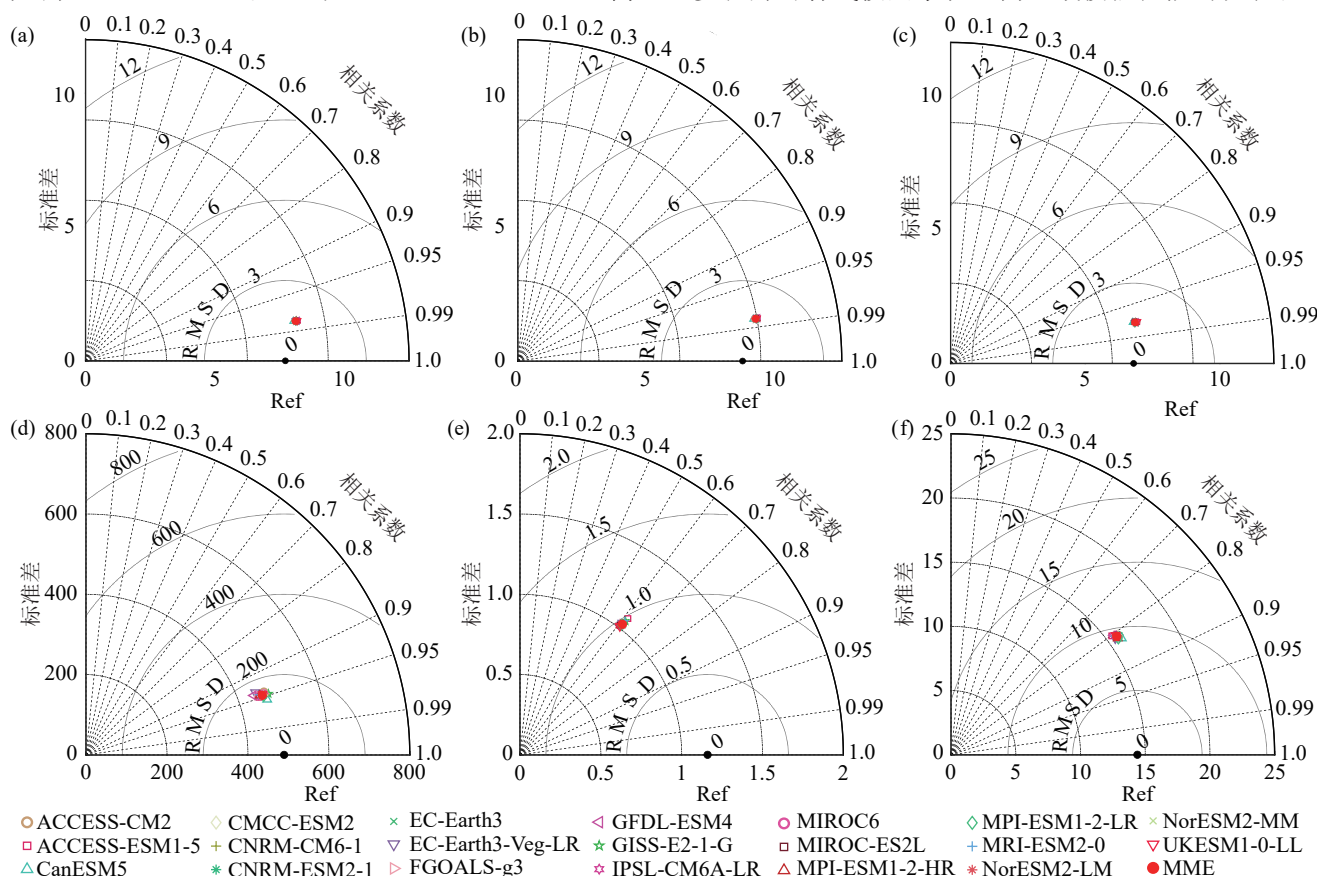
本研究采用覆盖 1850 年至今的 HadCRUT 全球观测数据集作为气温变化分析的基准,其长时序覆盖性相较于 NASA GISS 和 NOAA NCDC 等数据集更具优势。根据 HadCRUT 数据,工业革命前(1850—1900 年)至 20 世纪中后期(1950—1979 年)的全球平均气温已上升 0.25℃,因此,若相对于工业化前温升 1.5~5.0℃相当于相对 1950—1979 年温升 1.25~4.75℃。基于 NEX-GDDP-CMIP6 高

分辨率数据,通过计算未来各温升时段气温相对于 1950—1979 年的差值,确定中国区域在不同温升水平下的气候响应。

2 结果与分析

2.1 模式模拟能力评估

根据 1995—2014 年基准期的泰勒图评估结果(图 1),NEX-GDDP-CMIP6 各气候模式及其多模式集合(MME)在各气候要素的模拟中表现良好。定量分析显示,平均气温、最高气温和最低气温的模拟相关系数均接近或超过 0.98,均方根偏差(RMSD)较低,表明模式对温度的模拟精度较高。降水的相关系数普遍高于 0.93,相对湿度的相关系数在 0.8 以上,整体表现优良。风速的空间相关系数在 0.6 以上,表明该要素的模拟仍面临一定挑战。总体而言,各模式在基准期各气候要素的模拟值与观测值具有较高的空间一致性,表明 NEX-GDDP-CMIP6 数据集在中国区域具有良好的模拟能力。结合 MME 结果,可进一步提升对各气候要素在不同区域模拟性能的认识。



注:图 a~图 f 分别为平均气温、最高气温、最低气温、降水、风速和相对湿度。

图 1 NEX-GDDP-CMIP6 的 20 个全球气候模式及其多模式集合(MME)在基准期(1995—2014 年)中国各气候要素模拟性能的泰勒图评估

Fig. 1 Taylor diagrams of 20 NEX-GDDP-CMIP6 global climate models and their multi-model ensemble (MME) for climate variables over China during the reference period (1995—2014)

在气温分布方面(图 2a~图 2c),MME 较好地再现中国整体的气温特征,模拟结果与观测值高度一

致,特别是在东部和南部气温较高、青藏高原及东北地区气温较低的区域,模式成功刻画了其区域性分

布。然而,在青藏高原和西北地区,MME略低估气温,导致这些区域出现较大面积偏冷的模拟结果。对于最高气温,西北地区的内蒙古和新疆部分区域也存在一定程度的低估。

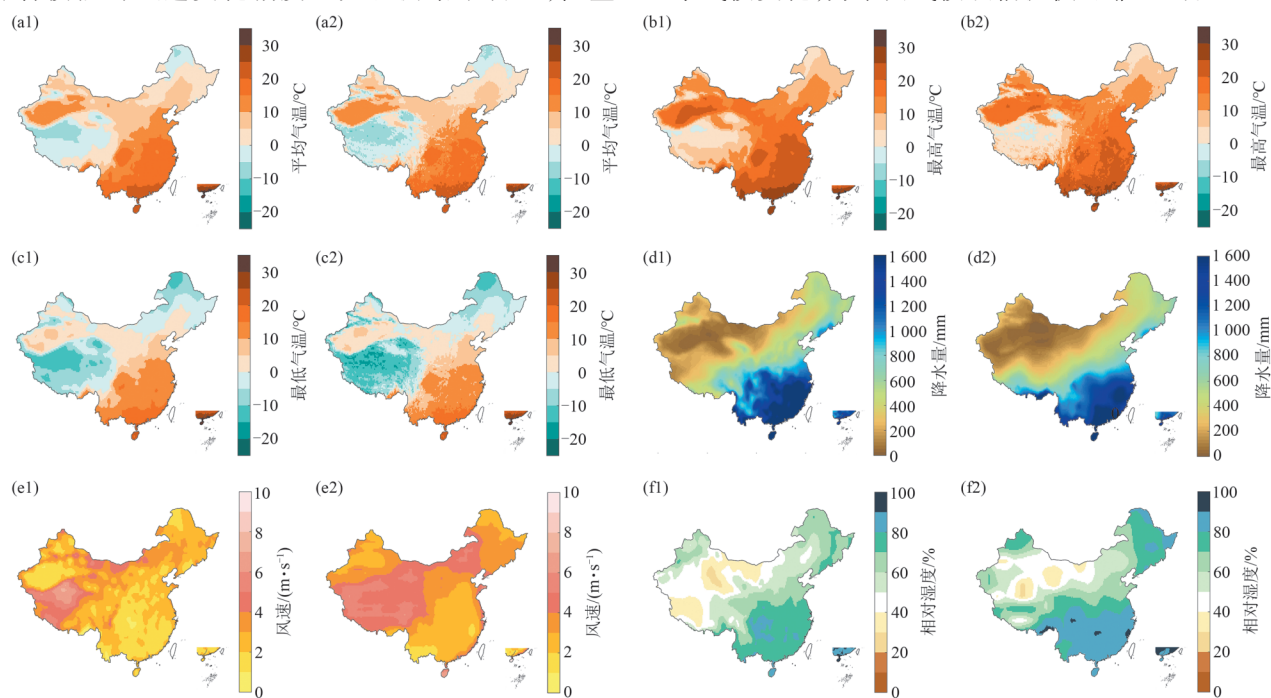
在降水方面(图2d),MME对中国大部分地区的降水模拟较好,特别是在华南和长江中下游的高降水区域,模拟结果与观测值接近。但在青藏高原南部和喜马拉雅山脉一带,模式显著低估降水量,观测值超过1 200 mm,而模拟结果中高降水量区域明显缩小,部分区域甚至低于600 mm。四川、云南等西南地区模拟降水约为800 mm,明显低于观测值(>1 000 mm),显示出模式在复杂地形区域的降水模拟存在挑战。

在风速模拟方面(图2e),尽管模式在青藏高原和西北高海拔地区存在低估现象,但在中部和东部地区总体上较好地再现了风速空间分布格局。特别是在沿海地区,模式能够反映出较高的风速水平。尽管模拟的风速变化幅度不如观测结果明显,但整

体分布特征仍被有效捕捉。

相对湿度模拟基本再现了中国南高北低的空间分布格局(图2f),但存在显著区域偏差。中国南部地区差异最为突出,观测数据显示该区域相对湿度普遍介于70%~80%,而模式模拟结果系统性偏高,大部分区域湿度超过80%,部分地区甚至达85%~90%。在西北干旱区,模式同样存在高估(模拟值50%~55%,观测值30%~40%)。青藏高原南部和东北东部地区的湿度模拟也有一定程度的高估。

综上,NEX-GDDP-CMIP6的模拟结果在多个气候要素上表现良好,特别是在气温和降水方面。该经过偏差订正和降尺度处理的高精度数据集为中国区域气候变化研究提供重要支持。尽管在青藏高原、喜马拉雅山脉南侧和部分西北地区的模拟效果有所不足,在这些区域使用时需注意其局限性,但总体而言,该数据集在中国范围内可有效用于分析未来气候变化,为中国气候预估提供可靠基础。



注:审图号为GS(2020)4773,底图无修改;序号中1为观测数据;2为NEX-GDDP-CMIP6多模式集合。

图2 观测数据和NEX-GDDP-CMIP6多模式集合在基准期中国各气候要素的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of observed data and NEX-GDDP-CMIP6 multi-model ensemble for climate variables in China during the reference period

2.2 未来气候变化预估

2.2.1 长时间序列的时空变化 未来中国气温(图3a~图3c)预计将随温室气体排放浓度的增加(SSP1-2.6~SSP5-8.5)持续上升。趋势分析表明,到21世纪末期(2081—2100年),与工业化前(1850—1900年)相比,气温在低排放情景(SSP1-2.6)下将上升约1.5~2.0℃,在中等和较高排放情景(SSP2-4.5和SSP3-7.0)下增幅达到2.5~3.5℃,而在高排放情

景(SSP5-8.5)下,增幅可能高达4.0~5.0℃。最低气温增幅略高于最高气温和平均气温的增幅。

降水量的变化同样表现出明显的情景间差异(图3d)。在低排放情景(SSP1-2.6)下,未来降水量较基准期可能增加2%~5%;在中等排放情景下,增幅为5%~8%;在高排放情景(SSP3-7.0、SSP5-8.5)下,降水量增幅可能达到10%。

风速在未来可能延续近年来的下降趋势(图3e)。

在低排放情景下,风速变化相对较小,而在中高排放情景下,风速可能比基准期下降约3%~5%,意味着未来风力资源可能减弱,影响到风能的利用效率和分布。相对湿度呈现下降趋势(图3f)。在SSP1-2.6情景

下,到2100年相对湿度可能比基准期下降约2%,在SSP3-7.0情景下,降幅为3%~4%,而在SSP5-8.5情景下,降幅则可能达到5%,表明未来可能面临更为干燥的气候条件。

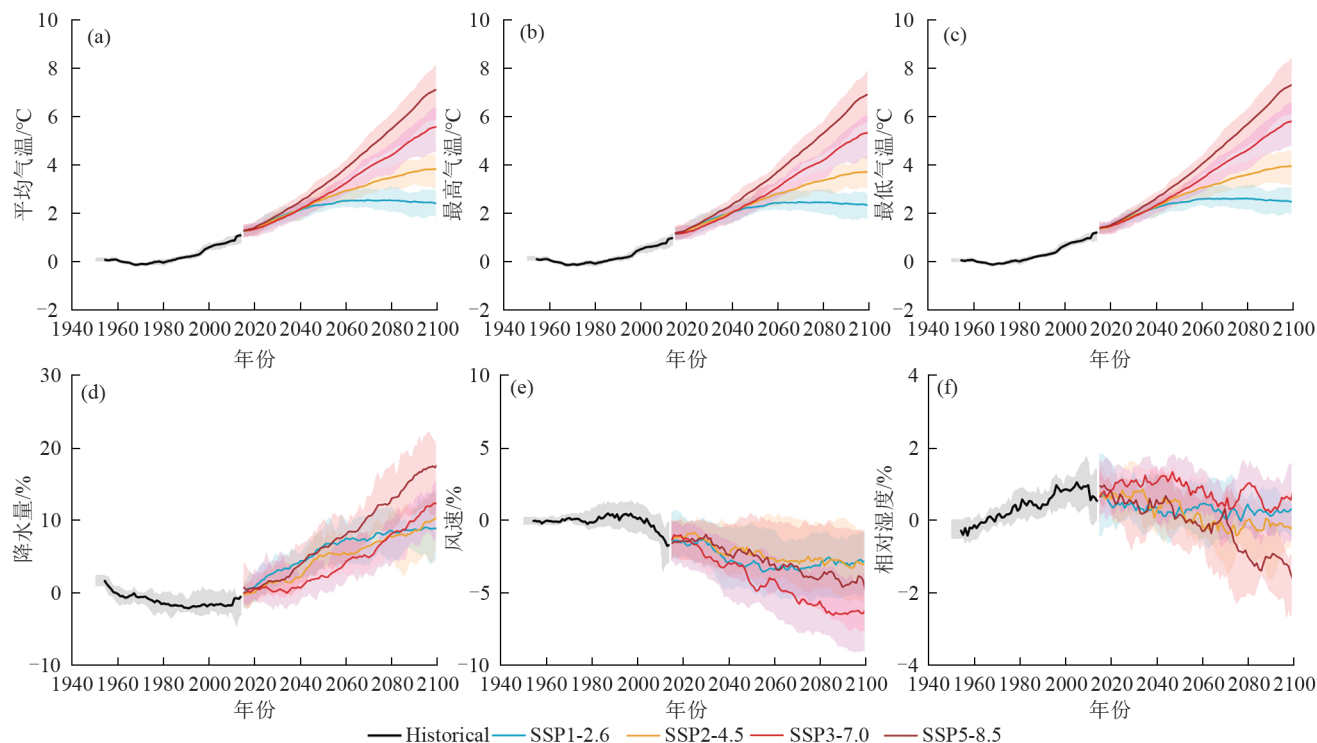


图3 1950—2100年中国各气候要素相较于基准期的变化

Fig. 3 Changes in climate variables in China from 1950 to 2100 relative to the reference period

根据NEX-GDDP-CMIP6多模式集合结果,分析21世纪末(2081—2100年)中国不同气候要素的概率密度分布(PDF)和累积概率分布(CDF)(图4)。结果显示,不同排放情景下各气候要素均发生显著变化,且其变化幅度随温室气体排放浓度的增加而增强。

温度方面,平均气温、最高气温和最低气温均显著升高,日平均温度超过历史基准期结果的概率显著增加,极端高温事件(超过历史基准期的极端高温)的出现概率亦明显上升。当累积概率达50%时,平均气温在SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下较基准期分别升高2.0、3.0、4.0、5.0℃。最高气温在累积概率为90%时的升幅可达2.0~7.0℃,其中SSP5-8.5情景下升温最为剧烈。最低气温分析显示,SSP5-8.5情景下低于基准期极端低温的事件几乎不再发生,出现概率较历史时期减少约9个百分点,CDF显示最低气温在累积概率为10%时,相较于历史基准期上升约1.0~6.0℃,表明极端低温事件频率大幅减少。

降水方面,SSP5-8.5情景下的PDF曲线明显右偏,高降水量区间的概率密度显著增加。对应CDF曲线显示,累积概率95%时的日降水量在SSP1-2.6至SSP5-8.5情景下,较基准期分别增加约2%、5%、8%和10%,表明随着温室气体排放浓度的增大,极

端降水事件频率显著上升。

风速和相对湿度方面,各情景下风速PDF向低值偏移,SSP5-8.5情景下风速低于基准期的概率显著提高。相对湿度亦呈下降趋势,尤其是在高排放情景下,低于基准期的相对湿度概率明显增加。CDF显示,在累积概率为10%时,SSP5-8.5情景下的相对湿度比基准期降低约5%。

综合来看,未来中国气候将呈现气温上升、极端降水事件频发、风速减弱和相对湿度下降等变化特征。这些变化在高排放情景下尤为显著,可能对中国的生态系统、农业生产和公共健康产生深远的影响,进一步凸显了将全球温升控制在1.5℃或2.0℃以内的重要性和紧迫性。

2.2.2 不同温升情景下的气候变化 基于NEX-GDDP-CMIP6高分辨率数据,首先分析中国对全球不同温升情景下的气温响应。结果显示,中国气温升幅显著超出全球平均,呈超线性升温趋势。具体而言,当全球温升达到1.5、2.0、3.0、4.0、5.0℃时,中国陆地年平均气温分别上升约2.05、2.74、4.11、5.29、6.75℃。气温响应显示出中国气温对全球变暖的高度敏感性,尤其在高温上升情景下,升温速度显著快于全球平均。意味着中国在全球变暖背景下可能面临更高的极端气候风险。

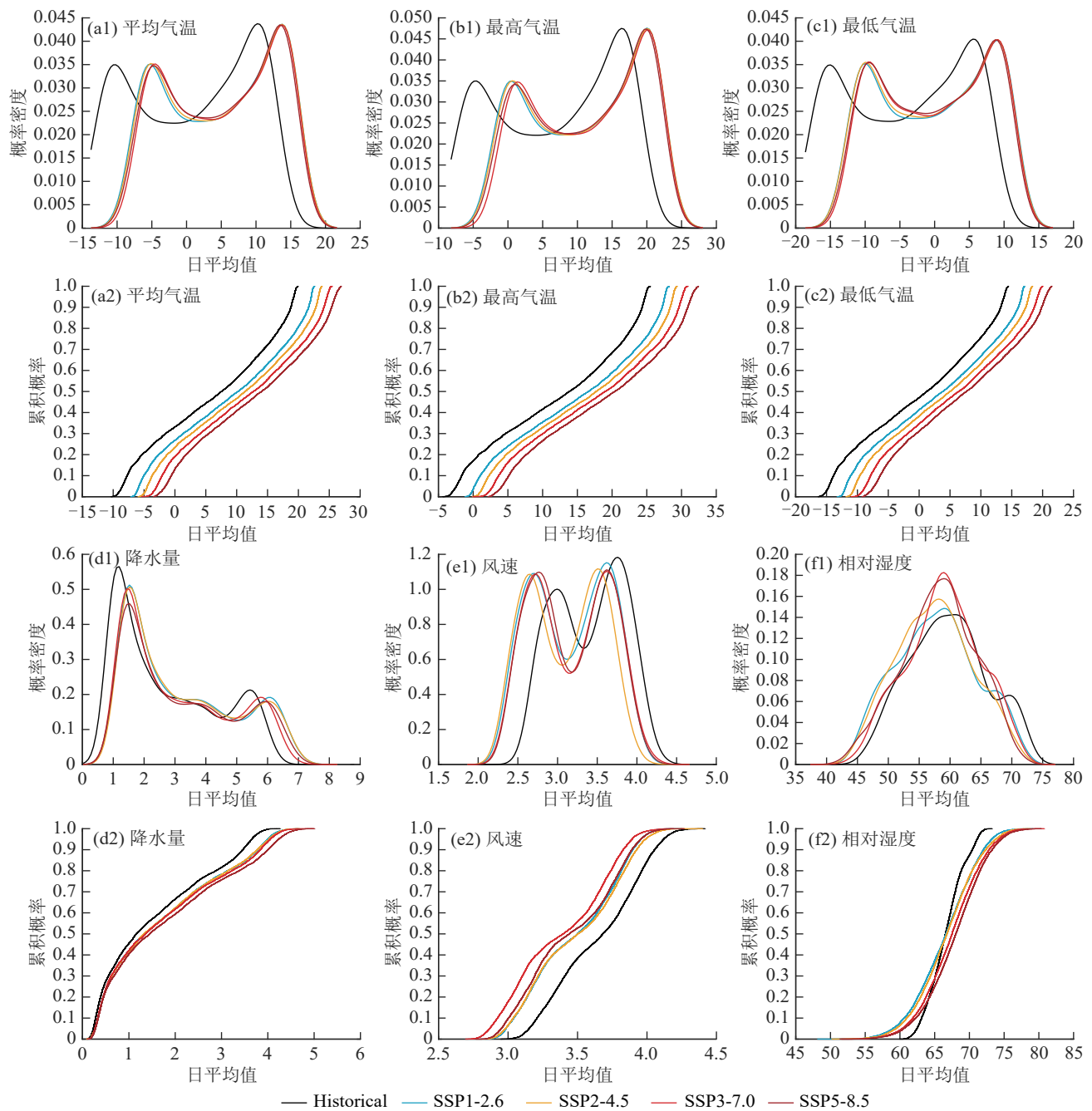


图 4 21 世纪末(SSPs, 2081—2100 年)与历史时期(Historical, 1995—2014 年)中国各气候要素的概率密度分布和累积概率分布
Fig. 4 Probability density distributions and cumulative probability distributions of climate variables in China for the end of the 21st century (under SSPs, 2081—2100) compared with the reference period (1995—2014)

在全球温升 1.5~5℃ 的不同情景下,中国各气候要素相较于基准期(1995—2014 年)的变化趋势见图 5。随着温升幅度的增加,中国的平均气温、最高气温和最低气温均显著上升(图 5a~图 5c)。全球温升 1.5℃ 时,中国的平均气温升高 1.3℃;当温升至 5.0℃ 时,升幅达 5.92℃。最高气温变化相对较小,但同样随温升逐步增加:在 1.5~5.0℃ 情景下,增幅从 1.29℃ 增加到 5.66℃。最低气温增幅则更为明显,从 1.35℃(1.5℃ 情景)升至 6.21℃(5.0℃ 情景)。夜间气温上升速度快于白天,可能对生态系统和农业生

产带来较大潜在影响。
降水量随温升的增加也显著增加(图 5d)。全球温升 1.5℃ 时,年平均降水量增加约 19.61 mm;全球温升 3.0℃ 时,年平均降水量增幅为 56.67 mm;全球温升 5.0℃ 时,增幅达到 115.29 mm。总体上,风速和相对湿度呈下降趋势。全球温升 1.5℃ 时,风速较基准期下降约 0.15 m/s,温升 5.0℃ 时,风速下降至 0.32 m/s,降幅相较于 1.5℃ 时翻倍。相对湿度在全球温升 5.0℃ 时较基准期下降约 0.34%。尽管大多数气候要素变化趋势较为一致,风速(图 5e)和相对湿度(图 5f)的预估结果

显示出明显的不确定性。风速在 1.5~5.0 °C 情景下的变化范围较广,降幅为 0.1~0.7 m/s;相对湿度变化幅

度较为分散,大多数模式显示其略有下降,部分模式则预估有小幅增加,但整体变化幅度较小。

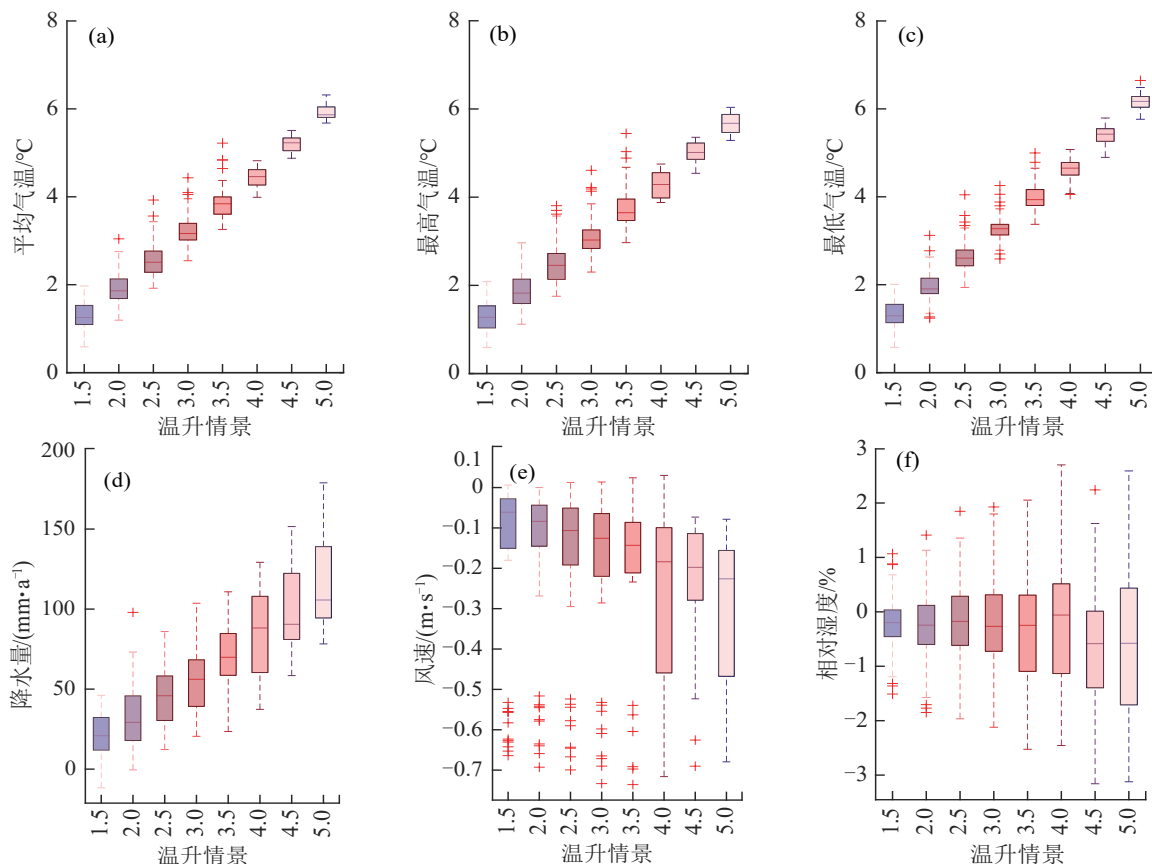


图 5 全球升温 1.5~5.0 °C 情景下中国各气候要素相较于基准期的变化

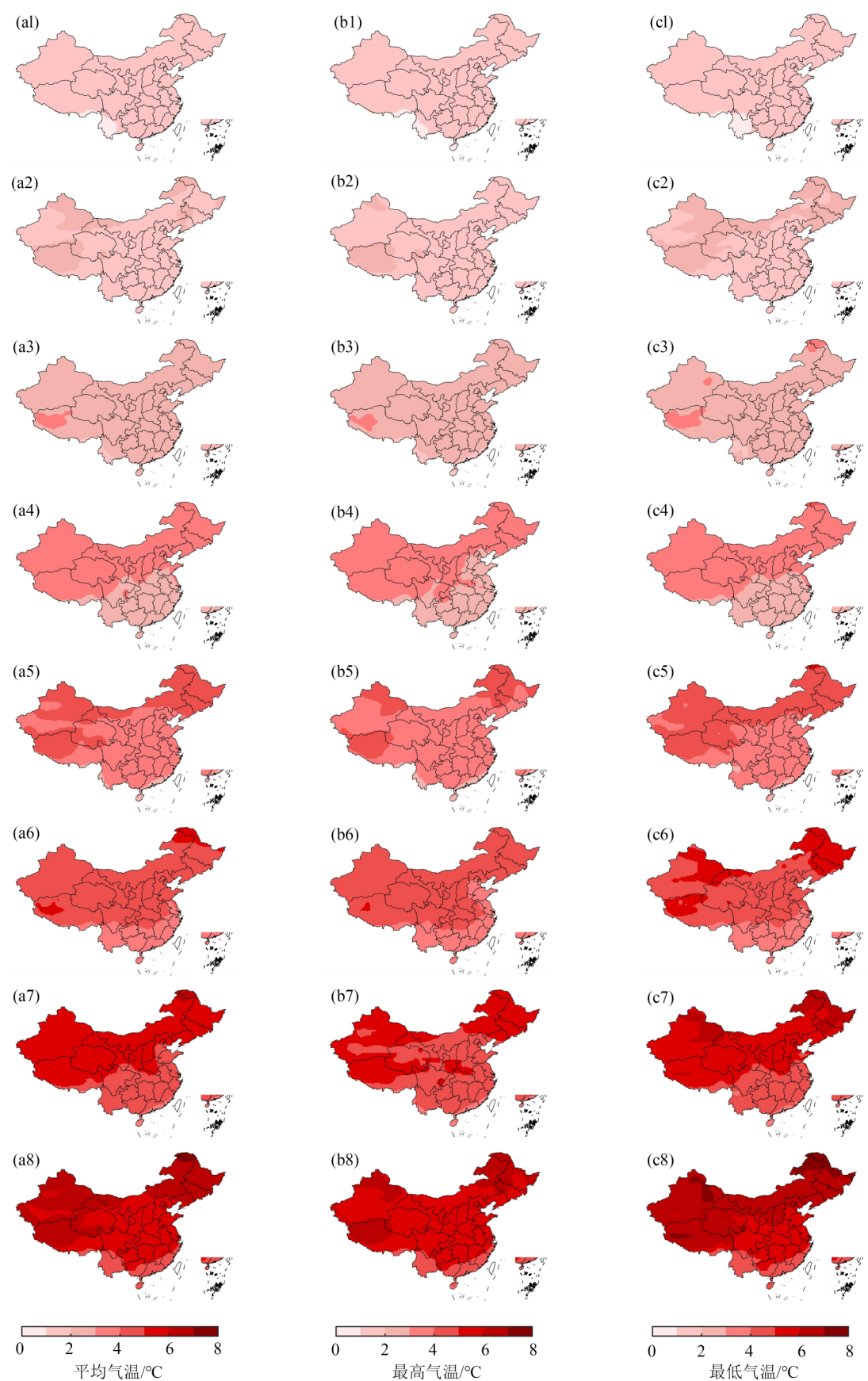
Fig. 5 Changes in climate variables in China under global warming scenarios of 1.5 °C to 5.0 °C relative to the reference period

中国各气候要素在不同升温情景下的空间分布呈现显著区域差异(图 6~图 9)。图 6 和图 7 为各要素的绝对变化空间格局,图 8 和图 9 则展示相对变化幅度(百分比变化)的空间分布特征。

随着全球升温的增加,中国各地气温普遍上升且速率高于全球平均水平。全球升温 1.5 °C 时,全国平均气温、最高气温和最低气温较基准期上升 1.0~2.0 °C;升温 2.0 °C 时,全国 30% 的区域升温达到 2.0~3.0 °C,尤其是东北、华北和青藏高原地区增温最为显著;温升至 3.0 °C 及以上时,75% 的区域气温增幅为 3.0~4.0 °C,在升温 4.0 °C 及以上情景下,中国北方、青藏高原和西北地区的增温预计达 5.0~6.0 °C,局部地区接近 7.0 °C。最低气温增幅明显高于平均气温和最高气温,且覆盖范围广,尤其在升温超过 3.0 °C 时此现象更加明显。全球升温 5.0 °C 时,东北地区部分区域最低气温增幅达 7.0~8.0 °C,平均气温和最高气温增幅相对较小。最低气温升温较快的趋势减小日较差,可能导致寒冷季节缩短,对生态系统和农业带来深远影响。区域差异上,平均气温增幅最快的区域集中在东北南部和华北北部;最高气温增幅最快的区域在东北北部和青

藏高原,显示这些区域的日间气温上升显著;最低气温主要出现在中国一二阶梯交界处、西北及华北西部,表明夜间升温显著,相较之下,东北和青藏高原的最低气温增幅相对较小。综合来看,西北地区气候向暖湿化方向演变,并在更高升温水平下表现出更强的变化幅度。

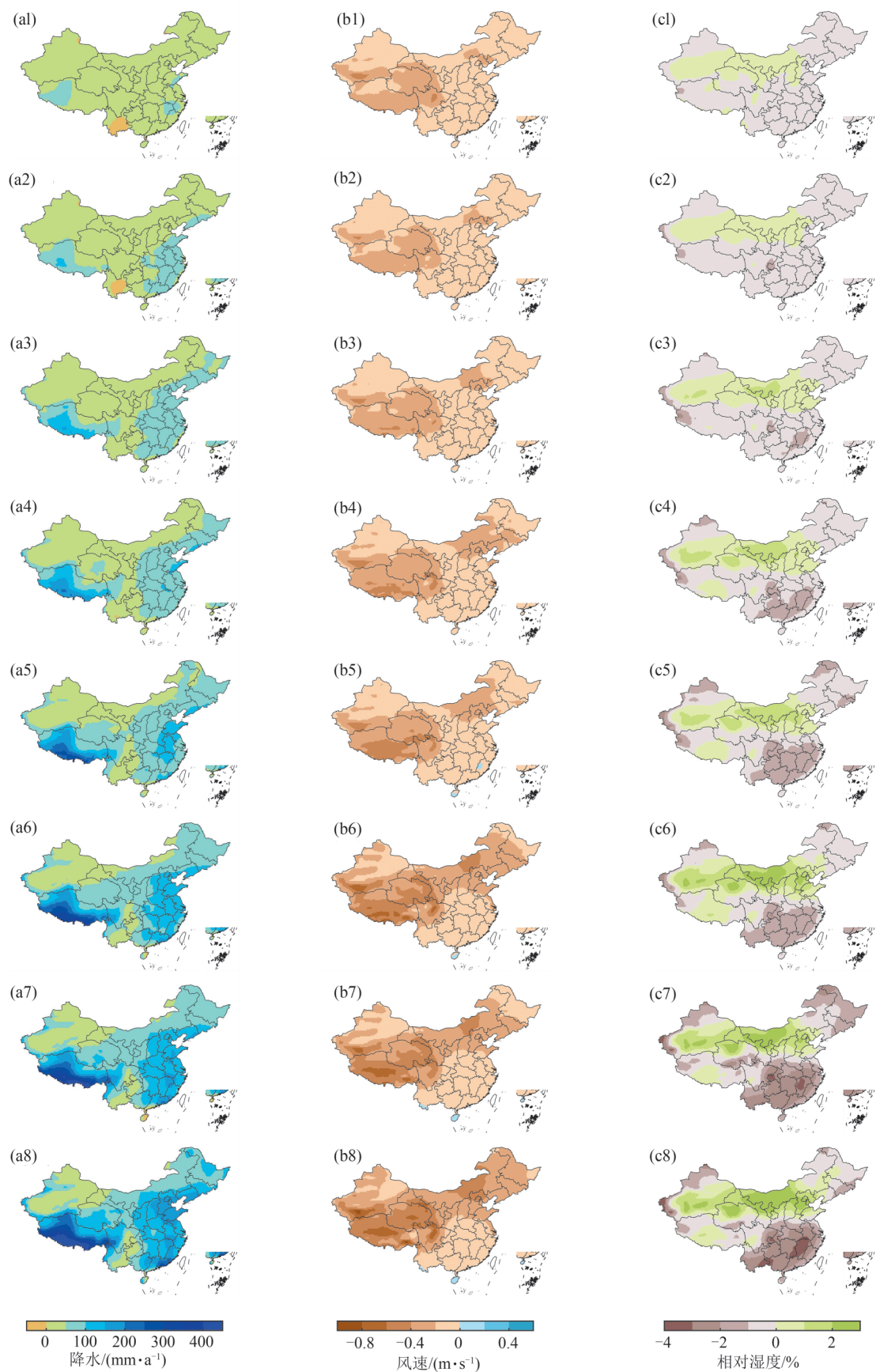
降水方面,全球升温 1.5、2.0 °C 时,中国西南部分地区降水较基准期略有减少(减幅不超过 10%),而全国大部分地区的降水普遍增加,约 60%~75% 的区域增量为 0~30 mm,6%~20% 的区域增量超过 50 mm。升温 2.5 °C 时,约 38% 的区域降水增量超过 50 mm,升温 3.0 °C 时,比例增至 46%,其中约 8% 的区域降水增幅超过 100 mm,主要集中在青藏高原的西南部。升温 4 °C 时,70% 的地区降水增幅超过 50 mm,降水强度进一步加大,尤其在长江中下游、华南、华北及青藏高原南部地区。区域对比显示,降水增幅最为显著的区域位于中国的西部、西北地区和青藏高原,其次是东北地区,再次为长江中下游和华南地区。升温 3.0 °C 时,中国西部 1/2 以上的区域降水增幅超过 20%,温升达到 4.0 °C 及以上时,这些区域的降水增幅超过 50%。



注:图 a~图 c 分别为平均气温、最高气温、最低气温;1~8 分别为全球温升 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 °C。

图 6 全球温升 1.5~5.0 °C 情景下中国各气候要素相较于基准期的空间变化

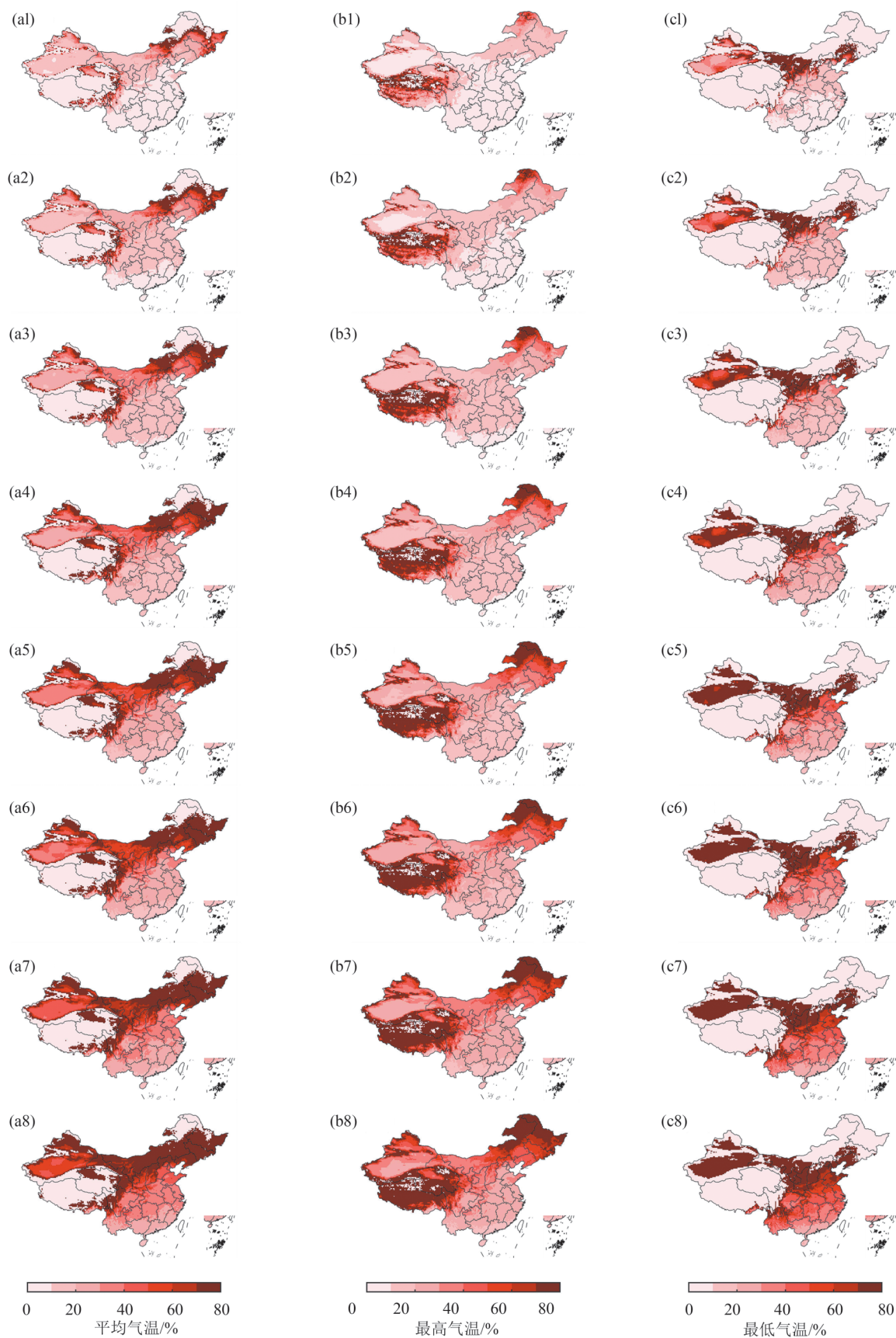
Fig. 6 Spatial changes in climate variables in China under global warming scenarios of 1.5 °C to 5.0 °C relative to the reference period



注:图 a~图 c 分别为降水量、风速、相对湿度;1~8 分别为全球升温 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 °C。

图 7 全球升温 1.5~5.0 °C 情景下中国各气候要素相较于基准期的空间变化

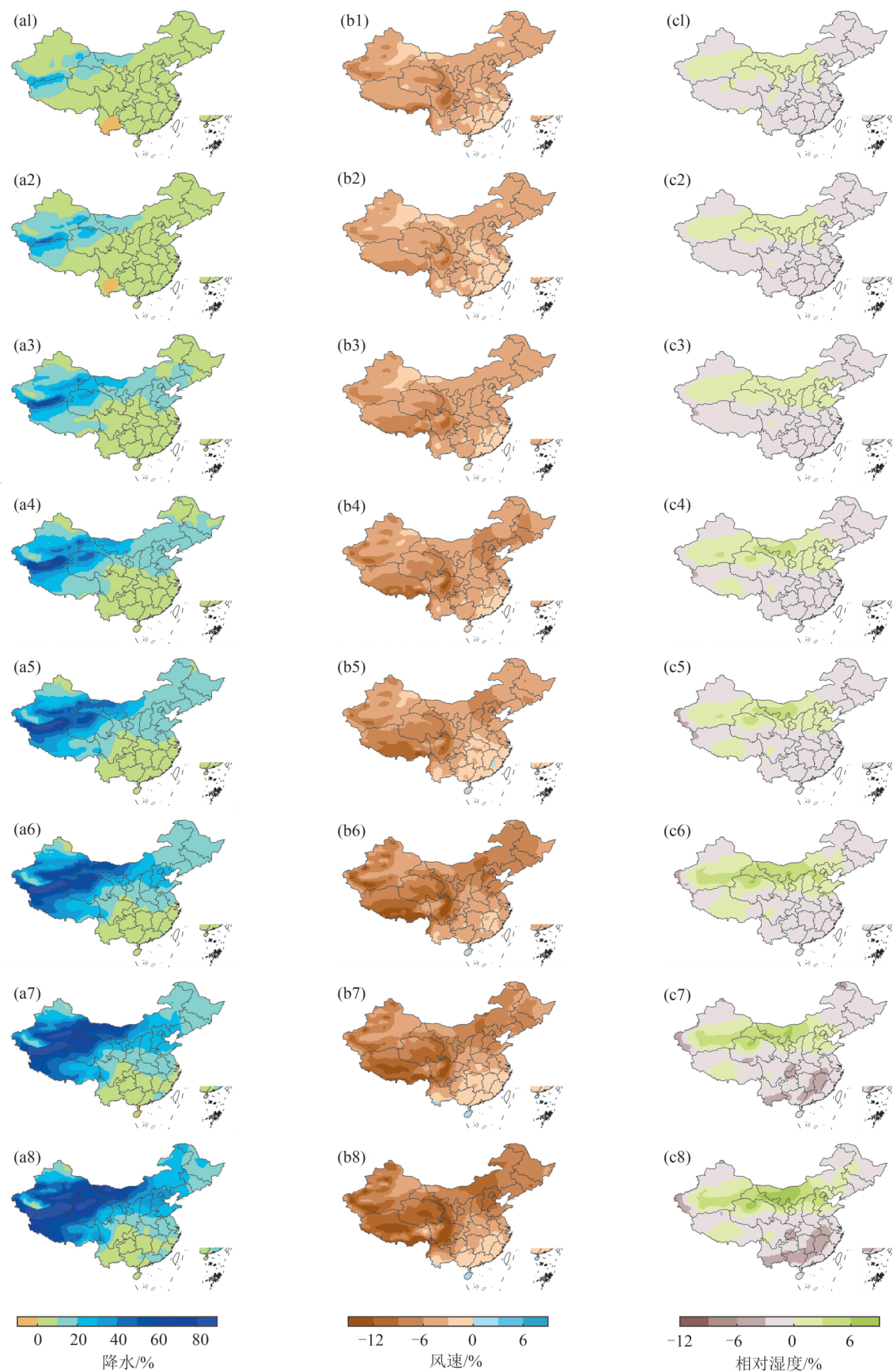
Fig. 7 Spatial changes in climate variables in China under global warming scenarios of 1.5 °C to 5 °C relative to the reference period



注:图 a~图 c 分别为平均气温、最高气温、最低气温;1~8 分别为全球升温 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 °C。

图 8 全球升温 1.5~5.0 °C 情景下中国各气候要素相较于基准期的变化百分率

Fig. 8 Percentage changes in climate variables in China under global warming scenarios of 1.5 to 5.0 °C relative to the reference period



注：图 a~图 c 分别为降水量、风速、相对湿度；1~8 分别为全球升温 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 °C。

图 9 全球升温 1.5~5.0 °C 情景下中国各气候要素相较于基准期的变化百分率

Fig. 9 Percentage changes in climate variables in China under global warming scenarios of 1.5 to 5.0 °C relative to the reference period

伴随增温,中国大部分地区风速呈下降趋势,仅海南岛和东南沿海狭窄区域略有增加。温升1.5~3.0℃时,风速相较于基准期每年下降幅度在0.5 m/s以内(降幅 $\leq 6\%$);温升超过3.0℃,青藏高原和西北部分地区降幅加剧,4.0~5.0℃情景下局部降幅超10%,可能对风能资源开发利用造成影响。

相对湿度的变化呈现显著区域差异特征。随着全球温升的加剧,中国南部湿度普遍减少,降幅较为明显;而新疆东南部、甘肃、宁夏及华北北部地区则呈现湿度小幅增加趋势。这些区域的湿度增减波动相对温和,基准期变化范围约 $\pm 5\%$ 。然而,当全球温升达到4.0~5.0℃时,湿度变化幅度显著增加,相较于1.5~2.0℃情景增加约2倍,尤其是在中国西部地区,湿度的增加与降水增幅较大的区域相吻合。

3 讨论

本研究利用NASA NEX-GDDP-CMIP6 高分辨率数据,评估全球温升1.5~5.0℃情景下中国气候要素的变化。结果表明,随着全球温升,中国气温和降水普遍增加,风速和相对湿度呈下降趋势,这些变化随温升加剧而更加明显。中国气候变化呈显著的空间异质性,各区域对气候要素的响应存在差异,可能对生态系统、农业生产、水资源管理和能源利用等产生深远影响^[2-3]。

气温方面,东北、华北和青藏高原地区升温幅度最大,最低气温增幅高于平均气温和最高气温,表明夜间变暖更为显著。可能导致寒冷季节缩短,影响依赖低温环境的生态系统和物种生存,并增加人类和牲畜的热应激风险。降水方面,降水量随温升而显著增加,特别是在西北和青藏高原地区。一方面,降水增多有助于缓解干旱,改善农业生产和水资源供应;另一方面,过量降水可能提升洪涝、土壤侵蚀和地质灾害的风险,威胁基础设施和居民安全。相对湿度的区域差异性显著,南方地区湿度下降可能加剧蒸发和干旱,增加农业用水压力;北方部分地区湿度增加可能提升病虫害发生频率,影响农业生产。风速的下降趋势可能对风能资源的开发利用产生影响。由于风能密度与风速的立方呈正比,风速的小幅下降使风能潜力大幅降低。伴随温升,风速预计持续下降,“陆地平静现象”^[29-31]可能继续存在。青藏高原和西北地区是中国重要的风能资源区,在高温升情景下风速下降超过10%,可能影响现有风电场的效率和未来风能开发规划。能源部门需重新评估风能资源的可持续性,并考虑多元化的可再生能源组合。未来降水量的增加为水力发电生产提供潜在机会,但更多的降水量也伴随着更高的变异性,即极

端降水事件,将对水资源管理和能源基础设施提出更高要求^[32]。

随着温升加剧,极端气候事件的频率和强度进一步增加,与CMIP模拟结果一致。极端气温和极端降水事件在全球变暖情景下将更加频繁和剧烈^[1,4,22]。高温热浪和强降水事件的增加可能引发热应激、森林火灾、洪水和山体滑坡等连锁灾害,威胁关键社会经济领域。为应对这些风险,需加强气候预警系统建设,并通过提升基础设施韧性与生态修复措施增强防灾能力。

尽管本研究采用高分辨率数据,结果的可靠性有所提升,相较于CMIP6原始GCMs和部分降尺度数据精度有所提高^[17,33],但仍存在不确定性,主要来源于模型差异、排放情景的不确定性、降尺度方法的局限性及自然变率的影响。在风速和相对湿度的预估中,由于整体变化幅度较小,不同模式之间的预估结果存在一定差异,需要进一步研究和验证。

本研究结果显示,即使在低温升情景下,中国仍将面临显著的气候变化影响。如果不将全球温升控制在较低水平(2℃以内),气候状况将更加严峻,气候变化影响可能更加严重。政策制定者应加强温室气体减排力度,推动能源结构转型,提高气候适应能力。在能源和农业领域,需关注风速下降对风能利用的影响,以及降水和湿度变化对农业生产的挑战。

未来研究应致力于提高气候模型的模拟能力,减小不确定性,深入探讨极端气候事件的变化特征,评估气候变化对具体行业的影响,为制定更精准的适应与减缓政策提供科学依据。

4 结论

1) NEX-GDDP-CMIP6 数据集对中国基准期(1995—2014年)气候要素的模拟总体表现较好。气温(平均气温、最高气温、最低气温)模拟精度较高(相关系数 ≥ 0.98 , RMSD < 0.5 ℃)。降水和相对湿度模拟效果理想(相关系数 > 0.93 和 > 0.80),但西南和青藏高原降水存在低估。风速模拟存在挑战(相关系数0.6~0.7),尤其在青藏高原和复杂地形区域存在低估。总体来看,NEX-GDDP-CMIP6 高分辨率数据集能为中国区域气候变化的研究提供可靠支持。

2) 随着温室气体排放量增加,未来中国气温将持续上升。到21世纪末,低排放情景下中国陆地平均气温上升1.5~2.0℃,高排放情景下,增幅可能达到4.0~5.0℃。极端事件风险可能增加。SSP5-8.5情景下,50%累积概率下的平均气温较历史基准期升高约5.0℃,极端降水事件的频率显著增加,95%累积概率时降水增幅可达10%。风速和相对湿度下降进一步加

剧气候不确定性,威胁农业、水资源管理和风能利用。

3)在全球温升 1.5~5.0 °C 情景下,中国陆地气温显著上升,区域响应差异明显。温升 1.5 °C 时,平均气温较工业化前升高约 2.05 °C,较基准期升高 1.3 °C;温升 5.0 °C 时,平均气温较基准期增幅达 5.92 °C,最高、最低气温分别升高 5.66、6.21 °C,夜间升温速度快于白天。东北、华北和青藏高原地区增温最显著。降水量随温升增加,温升 2.5 °C 时,全国 1/3 以上地区年降水量增幅超过 50 mm;温升 4.0 °C 时,70% 的区域降水增幅超过 50 mm,青藏高原和西北部分地区超过 100 mm,部分区域百分比增幅超过 20%。风速在温升超过 4.0 °C 整体下降,青藏高原和西北地区降幅超过 10%。相对湿度变化呈区域差异,东南沿海和华南地区湿度下降 1%~3%,西北和东北部分地区湿度增加约 5%。

参考文献:

- [1] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P M, PIRANI A, et al. IPCC Summary for Policymakers: Climate change 2021: The physical science basis [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2023.
- [2] BARNETT T P, PIERCE D W, ACHUTARAO K M, et al. Penetration of human-induced warming into the world's oceans[J]. *Science*, 2005, 309(5732): 284-287.
- [3] FAUCHALD P, PARK T, TØMMERVIK H, et al. Arctic greening from warming promotes declines in caribou populations[J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): e1601365.
- [4] 《第四次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第四次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
The Drafting Committee of the Fourth National Assessment Report on Climate Change. The fourth national assessment report on climate change[M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [5] 庄国泰, 高培勇. 气候变化绿皮书: 应对气候变化报告落实双碳目标的政策和实践(2022)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2023.
ZHUANG G T, GAO P Y. Green paper on climate change: Policies and practices to address climate change and implement dual carbon targets (2022) [M]. Beijing: Social Science Academic Press, 2023.
- [6] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P M, PORTNER H O, et al. Global warming of 1.5 °C: IPCC special report on impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [7] World Meteorological Organization. WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55 °C above pre-industrial level [EB/OL]. (2025-01-10). <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>.
- [8] World Meteorological Organization. WMO global annual to decadal climate update: Target years 2024 and 2024—2028[R]. World Meteorological Organization, 2024.
- [9] 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 [J]. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 169-180.
- [10] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445-456.
ZHOU T J, ZOU L W, CHEN X L. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 445-456.
- [11] JOHN A, DOUVILLE H, RIBES A, et al. Quantifying CMIP6 model uncertainties in extreme precipitation projections[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2022, 36: e100435.
- [12] YAZDANDOOST F, MORADIAN S, IZADI A, et al. Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 250: e105369.
- [13] BOÉ J, MASS A, DEMAN J. A simple hybrid statistical-dynamical downscaling method for emulating regional climate models over Western Europe. Evaluation, application, and role of added value? [J]. *Climate Dynamics*, 2023, 61(1): 271-294.
- [14] SUNYER M A, MADSEN H, ANG P H. A comparison of different regional climate models and statistical downscaling methods for extreme rainfall estimation under climate change[J]. *Atmospheric Research*, 2012, 103: 119-128.
- [15] THRASHER B, MAURER E P, MCKELLAR C, et al. Technical note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(9): 3309-3314.
- [16] SAHANY S, MISHRA S K, SALUNKE P. Historical simulations and climate change projections over India by NCAR CCSM4: CMIP5 vs. NEX-GDDP [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 135(3): 1423-1433.
- [17] THRASHER B, WANG W L, MICHAELIS A, et al. NASA global daily downscaled projections, CMIP6 [J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): e262.
- [18] DIOHA E C, CHUNG E S, AYUGI B O, et al. Quantifying the added value in the NEX-GDDP-CMIP6 models as compared to native CMIP6 in simulating Africa's diverse precipitation climatology [J]. *Earth Systems and Environment*, 2024, 8(2): 417-436.
- [19] RAO K K, AL MANDOUS A, AL EBRI M, et al. Future changes in the precipitation regime over the Arabian Peninsula with special emphasis on UAE: Insights

- from NEX-GDDP CMIP6 model simulations [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): e151.
- [20] SUN Y K, ZHU R, WANG T. Projection of extreme climate change in the Asian arid region and the Tibetan Plateau in the early and middle 21st century based on NEX-GDDP-CMIP6 [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2025, 18(3): e100534.
- [21] JIANG F S, WEN S S, GAO M N, et al. Assessment of NEX-GDDP-CMIP6 downscale data in simulating extreme precipitation over the Huai River basin [J]. Atmosphere, 2023, 14(10): e1497.
- [22] YANG B G, WEIL X, TANG H Y, et al. Future changes in extremes across China based on NEX-GDDP-CMIP6 models [J]. Climate Dynamics, 2024, 62(10): 9587-9617.
- [23] GUO J H, HUANG G H, WANG X Q, et al. Evaluating the added values of regional climate modeling over China at different resolutions [J]. Science of the Total Environment, 2020, 718: e137350.
- [24] SHI Y, GAO X J, WU J, et al. Changes in snow cover over China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model [J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(4): e045401.
- [25] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111.
- WU J, GAO X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1102-1111.
- [26] YANG F, LU H, YANG K, et al. Evaluation of multiple forcing data sets for precipitation and shortwave radiation over major land areas of China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(11): 5805-5821.
- [27] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D7): 7183-7192.
- [28] TEBALDI C, KNUTTI R. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections [J]. Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2007, 365(1857): 2053-2075.
- [29] MARTINEZ A, IGLESIAS G. Climate change impacts on wind energy resources in North America based on the CMIP6 projections [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: e150580.
- [30] MCVICAR T R, RODERICK M L, DONOHUE R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation [J]. Journal of Hydrology, 2012, 416: 182-205.
- [31] DENG K Q, AZORIN-MOLINA C, MINOLA L, et al. Global near-surface wind speed changes over the last decades revealed by reanalyses and CMIP6 model simulations [J]. Journal of Climate, 2021, 34(6): 2219-2234.
- [32] URIA M R, JOHNSON M, SHAN R. US hydropower market report (January 2021 edition) [R]. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2021.
- [33] LU K D, ARSHAD M, MA X Y, et al. Evaluating observed and future spatiotemporal changes in precipitation and temperature across China based on CMIP6-GCMs [J]. International Journal of Climatology, 2022, 42(15): 7703-7729.
- (上接第218页)
- [32] 赖明, 陈仁升, 刘玖芬, 等. 雅鲁藏布江下游产水量时空演变及对气候和土地利用变化的响应 [J]. 草业科学, 2022, 39(12): 2516-2526.
- LAI M, CHEN R S, LIU J F, et al. Temporal and spatial evolution of water yield in the lower reaches of the Yarlung Zangbo River and its response to climate and land use change [J]. Pratacultural Science, 2022, 39(12): 2516-2526.
- [33] 刘琳, 张宝军, 熊东红, 等. 雅江河谷防沙治沙工程近地表特性: 林下植被特性、生物结皮及土壤养分变化特征 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(9): 4310-4319.
- LIU L, ZHANG B J, XIONG D H, et al. Variation characteristics of vegetation characteristics, biological crusts and soil nutrients under the main vegetation configuration modes in the process of sand control in the Yarlung Zangbo River valley [J]. China Environmental Science, 2021, 41(9): 4310-4319.
- [34] FISCHER S, PIETRONI J, BRING A, et al. Present to future sediment transport of the Brahmaputra River: Reducing uncertainty in predictions and management [J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(2): 515-526.
- [35] LIU S N, YAO Y Y, KUANG X X, et al. A preliminary investigation on the climate-discharge relationship in the upper region of the Yarlung Zangbo River basin [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: e127066.
- [36] HU F P, ZHAO J, SUN Z Y, et al. Study on spatiotemporal changes and driving mechanisms of ecosystem service interaction in Shiyang River basin [J]. Arid Land Geography, 2019, 47(10): 1755-1766.
- [37] 林静, 江洪, 岳辉, 等. 长汀县生态系统服务权衡与协同关系 [J]. 海南大学学报(自然科学版), 2024, 42(3): 301-311.
- LIN J, JIANG H, YUE H, et al. Trade-offs and synergies among ecosystem services in Changting County [J]. Journal of Hainan University (Natural Science), 2024, 42(3): 301-311.