

李肖非凡,王云路,付洪浚,等.基于NEX-GDDP-CMIP6的内蒙古未来极端降水预估[J].人民珠江,2026,47(3):54-66.

# 基于NEX-GDDP-CMIP6的内蒙古未来极端降水预估

李肖非凡<sup>1</sup>,王云路<sup>2</sup>,付洪浚<sup>3</sup>,罗依梦<sup>4</sup>,肖梓涵<sup>5</sup>,陈丽<sup>2\*</sup>,刘婷<sup>2</sup>,崔歆雨<sup>2</sup>

(1. 内蒙古和林格尔县气象局,内蒙古 呼和浩特 011599;2. 鄂尔多斯市东胜区气象局,内蒙古 鄂尔多斯 017099;  
3. 连山气象局,广东 清远 513299;4. 射洪市气象局,四川 遂宁 629200;5. 成都信息工程大学,四川 成都 610225)

**摘要:**内蒙古作为中国北方重要的生态安全屏障,其横跨干旱、半干旱至半湿润区的独特地理气候条件,使得极端降水事件频发,易引发洪涝灾害、水资源失衡及生态系统扰动,对区域农牧业生产与社会经济稳定构成严重威胁。为更好地应对内蒙古未来的极端降水事件,基于NEX-GDDP-CMIP6的26个地球系统模式的模拟结果与中国再分析气象数据集CN05.1,评估Ensemble Median准确度,再探讨4种共享社会经济路径下21世纪早、中、晚期5个极端降水指数较历史基准期的时空变化特征,结果表明:①在未来预估期,4个干湿分区各极端降水指数均显著上升,且随温室气体排放量增加而上升趋势加剧,SSP5-8.5下增长最显著,同时,各分区极端降水指数上升速度差异显著,如Rx1day和Rx5day在各情景下上升最快区域均为半湿润区,R10mm、R20mm、SDII在不同情景下上升最显著区域各有不同;②在历史基准期,各极端降水指数空间分布呈现“东多西少”格局,且干旱地区增长趋势最显著,反映出干旱区对气候变化的高敏感性;③不同模拟时期,极端降水指数整体随排放增加而上升,高排放情景下上升趋势更显著,且后期增幅大。研究表明,未来内蒙古或面临更频繁、严重的极端降水事件,对区域水资源管理与防洪减灾策略制定意义重大。

**关键词:**极端降水指数;CMIP6;共享社会经济路径;气候变化;未来预估

**中图分类号:**TV11 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)03-0054-13

在全球变暖的背景下,水循环加剧导致极端降水事件呈现频发态势。历史观测与气候模式模拟均证实,全球一半以上陆地强降水频率上升,加剧了干旱区与湿润区的洪灾风险,受灾范围与影响人群持续扩大<sup>[1-5]</sup>,极端降水引发的洪涝、滑坡等自然灾害,不仅严重威胁生态系统平衡,更对区域经济发展与人民生命财产安全构成直接挑战<sup>[6-11]</sup>。《中国气候变化蓝皮书(2023)》显示,1961—2022年中国极端强降水事件频次呈增加趋势,预示未来极端降水事件将更加剧烈、更加频繁。近些年来,针对中国不同区域极端降水事件时空变化的研究引起广

泛关注<sup>[12-14]</sup>。

内蒙古(97~127°E,37~54°N)位于中国北部,地形狭长,横跨东北、华北、西北三大区域,是中国北方重要的生态安全屏障与农畜产品生产基地。特殊的地理位置使其成为湿润、半湿润气候向半干旱、干旱气候的过渡地带,气候变化敏感性极高。自20世纪60年代以来,中国大部分区域降雨日数减少,但年降水总量增加,极端降水事件强度显著增强<sup>[15-20]</sup>。内蒙古降水时空分布不均,夏季集中且东多西少,极端降水事件明显增多,不同区域极端降水指数呈现差异化特征:西部以强度增加为主,

**基金项目:**内蒙古自治区自然科学基金项目(2024LHMS04014);内蒙古自治区气象局科技创新项目(nmqxkjcx202426、nmqxkjcx202443);鄂尔多斯市气象局自立科技创新项目(ORDOSQX202401)

**收稿日期:**2025-07-18 **修回日期:**2025-09-05 **网络首发日期:**2025-09-26

**作者简介:**李肖非凡(1999—),女,主要从事气象地面及高空观测、预报、服务等工作。

**通信作者:**陈丽(1984—),女,主要从事农业气象工作。

**联系作者:**致信 rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

中部频次、强度和持续时间均减少,东部则表现为强度增加而频次与持续时间减少<sup>[19-20]</sup>。随着全球变暖加剧,有研究表明,1981—2020年全区共发生12次极端暴雨过程,主要影响西部河套地区和内蒙古东南部地区<sup>[21]</sup>;同时随着降水减少,干旱区极端降水指数趋于缓慢下降,容易引起风灾加剧、草原生态恶化<sup>[22]</sup>。北方地区降水对气候变化的响应比南方更为强烈,内蒙古面临的暴雨洪涝风险不断攀升,其脆弱的生态系统正承受着极端降水的巨大压力,严重威胁到人民的生命财产安全。因此,科学预估内蒙古极端降水事件的时空演变规律,对保障区域生态安全、促进经济高质量发展具有重要现实意义。

地球系统模式是探究气候系统变化机理、预估未来气候趋势的核心工具,在耦合模式比较计划中广泛应用,目前已发展至第六阶段(CMIP6)<sup>[23-26]</sup>。然而,受东亚季风复杂性、青藏高原地形及复杂下垫面影响,CMIP6模式对中国气候降水特征的模拟存在明显不足,其较低的空间分辨率也限制了小尺度区域气候模拟的精度<sup>[27-29]</sup>。相比之下,NASA的NEX-GDDP-CMIP6降尺度数据通过偏差校正与高分辨率输出,在捕捉极端降水趋势方面表现卓越,能为区域尺度气候变化研究提供更详实的信息<sup>[30-31]</sup>。其中,极端降水突变年份与草原植被退化期呈现显著相关性,而CMIP6模式对内蒙古半干旱区降水的模拟存在系统性湿偏差,其空间分辨率不足<sup>[27]</sup>导致对中小尺度降水过程的捕捉能力有限。因此,采用NEX-GDDP-CMIP6等高分辨率数据<sup>[30-31]</sup>对提升区域模拟精度尤为重要。

本文选取了5个极端降水指数作为定量研究指标,利用中国再分析气象数据集CN05.1评估NEX-GDDP-CMIP6数据在内蒙古的模拟能力,并采用多模式集合中位数(Ensemble Median)方法,系统分析2015—2100年不同共享社会经济路径下内蒙古极端降水指数的时空变化特征。研究成果将为内蒙古极端降水风险防范、生态保护与高质量发展提供

科学依据与决策参考。

## 1 研究区概况及方法介绍

### 1.1 研究区域

内蒙古由东北向西南斜伸,东西直线距离约2 400 km,南北跨度约1 700 km,总面积约为118.3万km<sup>2</sup>,占中国总面积的12.3%。内蒙古属于温带大陆性气候、温带季风气候,温差大,季节分明,降水量低,尤其是西部和北部的沙漠及半沙漠地区;地貌以高原为主,大部分地区海拔在1 000 m以上,地理特征多样。受地理环境影响,降水地域差异较大,因此将内蒙古划分为4个区域,从西到东依次为干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区(图1)<sup>[32]</sup>。文中涉及的地图均是基于中华人民共和国自然资源部地图技术审查中心标准地图服务系统下载的审图号为GS(2024)0650的中国地图制作,底图无修改。

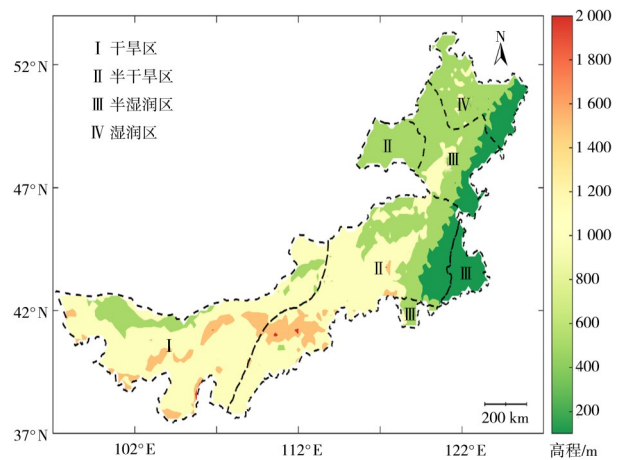


图1 内蒙古干湿分区和DEM

Fig. 1 Dry and wet zones and DEM in Inner Mongolia Autonomous Region

### 1.2 数据

基于26个NEX-GDDP-CMIP6降尺度地球系统模式(表1)历史试验数据(1995—2014年)以及4种共享社会经济路径(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5)预估数据(2015—2100年),研究21世纪内蒙古极端降水变化特征。

表 1 本研究采用的 NEX-GDDP-CMIP6 模式基本信息

Tab. 1 Basic information of NEX-GDDP-CMIP6 models used in this study

序号	模式名称	机构/所属国家及地区	序号	模式名称	机构/所属国家及地区
01	ACCESS-CM2	ACCESS/澳大利亚	14	GISS-E2-1-G	NASA/美国
02	ACCESS-ESM1-5	ACCESS/澳大利亚	15	INM-CM5-0	INM/俄罗斯
03	BCC-CSM2-MR	BBC/CMA/中国	16	IPSL-CM6A-LR	IPSL/法国
04	CanESM5	CCCma/加拿大	17	KACE-1-0-G	NIMS/韩国
05	CESM2	NCAR/美国	18	MIROC6	MIROC/日本
06	CMCC-CM2-SR5	CMCC/意大利	19	MIROC-ES2L	MIROC/日本
07	CMCC-ESM2	CMCC/意大利	20	MPI-ESM1-2-HR	MPI/德国
08	CNRM-CM6-1	CNRM-CERFACS/法国	21	MPI-ESM1-2-LR	MPI/德国
09	CNRM-ESM2-1	CNRM-CERFACS/法国	22	MRI-ESM2-0	MRI/日本
10	EC-Earth3	EC-Earth/欧盟	23	NorESM2-LM	NCC/挪威
11	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth/欧盟	24	NorESM2-MM	NCC/挪威
12	FGOALS-g3	CAS/中国	25	TaiESM1	RCEC/中国
13	GFDL-ESM4	GFDL/美国	26	UKESM1-0-LL	MOHC/英国

NEX-GDDP-CMIP6 数据集是对 CMIP6 输出的 1950—2100 年的历史和未来预估使用月度偏差校正/空间分解的降尺度方法生成的逐日产品,水平分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。NEX-GDDP-CMIP6 相较于原始的 CMIP6 有更高的空间分辨率,且基于观测数据进行了偏差校正,由于从低到高空间分辨率的转换,导致空间分布上的扩散,对应极端事件的降尺度值在一些区域中可能被低估。此数据集也存在不同区域表现差异大和部分区域特征捕捉不足的局限性<sup>[33]</sup>,导致预估出现偏差。用于检验评估的参考数据为 CN05.1,该数据集基于中国气象局所属的 2 400 余个台站的观测资料插值而成<sup>[48]</sup>。CN05.1

数据集在不同地区的表现差异受多种因素影响,包括地区的下垫面和地表大气特征、温度和降水情况、与传统气象站数据的对比以及数据订正方法等<sup>[34]</sup>,这些因素共同作用,使 CN05.1 数据集在内蒙古地区可能存在适用性差异。

### 1.3 研究方法

STARDEX 为探索未来极端事件对全球变暖的响应,提供了若干极端气候指数的计算方案 ([https:// crudata. uea. ac. uk/projects/stardex/](https://crudata.uea.ac.uk/projects/stardex/)),本文选取了 5 个具有代表性的极端降水指数分别为降水日数指数 (R10 mm 和 R20 mm) 和降水强度指数 (Rx1day、Rx5day 和 SDII)(表 2)。

表 2 所选取的极端降水指数及定义

Tab. 2 Selected extreme precipitation indices and their definitions

指标分类	指数名称	指标缩写	定义	单位
频率指标	强降雨日数	R10 mm	一年中日降水量大于等于 10 mm 的日数	d
	特大降雨日数	R20 mm	一年中日降水量大于等于 20 mm 的日数	d
强度指标	最大 1 日降水量	Rx1day	年最大日降雨量	mm
	连续 5 日最大降水量	Rx5day	一年中连续 5 日最大降雨量	mm
	降水强度	SDII	日降水量大于等于 1 mm 的年降水总量/雨期(一年内日降水量大于等于 1 mm 的总天数)	mm/d

运用CN05.1对单一模式与Ensemble Median的历史基准期数据进行评估检验。采用Sen’s斜率估计分析模拟期内(1995—2100)极端降水指数的年际变化特征,依据非参数统计检验方法Mann-Kendall对时间序列趋势进行显著性检验<sup>[35]</sup>。利用内蒙古极端降水指数多年均值对4种共享社会经济路径下4个模拟时期:早期(2015—2044年)、中期(2045—2074年)、晚期(2075—2100年)及整个未来预估期(2015—2100年)中的5个极端降水指数与历史基准期的时空分布差异(Difference Ratio)特征进行分析。

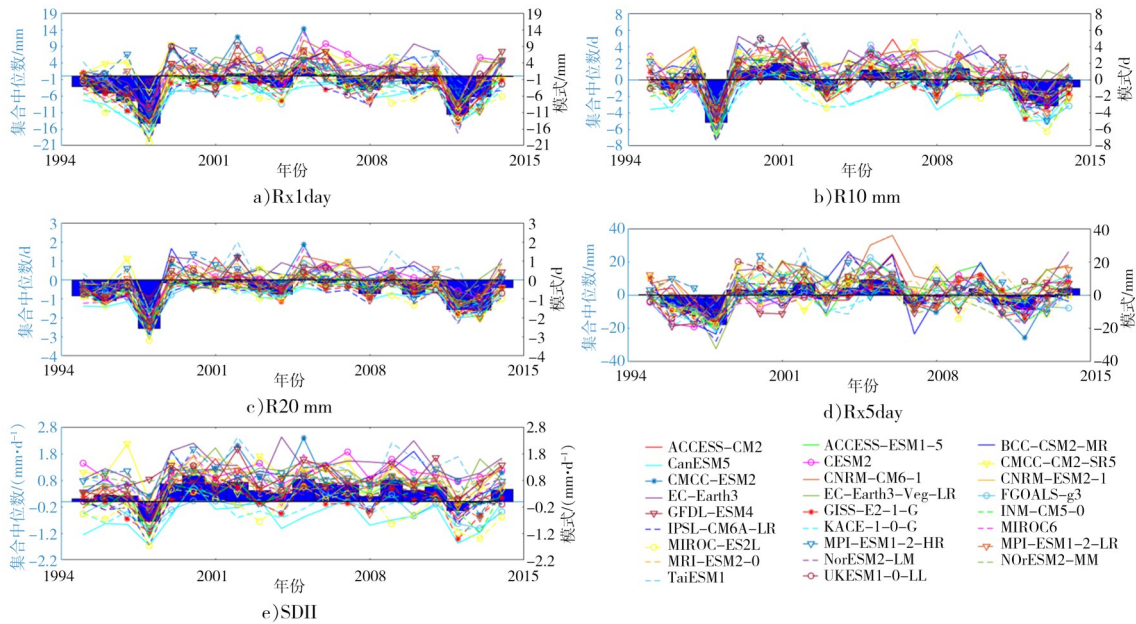
## 2 结果与分析

### 2.1 NEX-GDDP-CMIP6极端降水模拟评估

图2展示了CN05.1与26个模式及其Ensemble Median在历史基准期各极端降水指数模拟的差异。多数模式难以准确再现研究区域历史降水特征,主要差异为变化幅度的不一致。

在1998、2012、2013年的极端降水指标模拟中

普遍存在显著误差。其中,Rx1day指标在1995—1998、2011—2014年呈现系统性负偏差,导致Ensemble Median在1998、2012年分别出现-14.39、-11.56 mm的显著负偏差(图2a)。相比之下,1999—2011年Ensemble Median的模拟误差显著降低(0.23~4.13 mm),较好反映了历史演变特征。R10 mm的模拟在1998年出现最大集体负偏差(所有模式均低于观测),Ensemble Median误差达-5.3 d,2012、2013年误差分别为-2.6、-3.2 d(图2b),而2004年误差仅-0.04 d,这体现了时间异质性。R20 mm的误差分布与Rx1day相似,在1995—1998、2012—2014年均呈现系统性负偏差,1998年Ensemble Median误差达-2.59 d(图2c)。相比之下,Rx5day模拟除1998年出现显著负偏差(-17.91 mm)外,其余年份离散度较大(图2d)。对于SDII指标,26个模式普遍呈现高估趋势,特别是1999、2012年偏差显著,该特征在Ensemble Median结果中也有明显体现(图2e)。



注:柱形图为Ensemble Median与CN05.1的误差,折线图为26个模式与CN05.1的误差变化。

图2 Ensemble Median及26个模式数据与CN05.1的误差变化

Fig. 2 Error variation of Ensemble Median, 26 model data, and CN05.1

图3展示了单一模式与 Ensemble Median 在极端降水指数模拟中的离散度和误差特征。就标准差而言(图3a), Ensemble Median 在所有指数中均表现出最低的离散程度: R10 mm 标准差(0.041 d)显著低于各模式(0.16~0.35 d), 其中 GISS-E2-1-G (0.16 d) 等模式离散度相对较小; R20 mm 的 Ensemble Median 标准差(0.015 d)仅为最优单一模式(CanESM5: 0.048 d)的30%;在极端强度指标中, Ensemble Median 的 Rx1day (0.10 mm)、Rx5day (0.23 mm)标准差分别较最优单一模式降低61.7%和74.1%;SDII的集合离散度(0.014 mm/d)较表现最优模式(FGOALS-g3: 0.050 mm/d)下降72.3%。均方根误差分析(图3b)显示, Ensemble Median 在 Rx5day 指标中具有绝对优势(0.82 mm), 优于所有单一模式(误差均大于1 mm)。对于 R10 mm(0.72 d)和 Rx1day(0.73 mm), 仅 CMCC-CM2-SR5 等4个

模式及 KACE-1-0-G 等2个模式分别表现更优。但在 R20 mm 和 SDII 指标中, 分别有 11、12 个模式的误差值低于 Ensemble Median (分别为 0.71 d 和 0.71 mm/d), 表明这两项指标的集合改进效果相对有限。

综合图2、3分析表明:单一模式仅在特定指标呈现偶然优势(如 TaiESM1 在 SDII 的 0.66 mm/d 误差), 缺乏稳定性。Ensemble Median 能系统性降低模式间差异(图3a标准差平均降低76.4%), 其整体误差水平较78.5%的单一模式更接近 CN05.1。此外改进效果存在指标特异性, Rx5day 模拟提升最显著(误差降低46.1%), 其次为 R10 mm(28.9%)和 Rx1day(22.1%), 而 R20 mm(1.7%)和 SDII(6.5%)提升幅度有限。Ensemble Median 方法通过有效过滤模式间随机误差, 在保持趋势一致性的同时(图2), 显著提升了极端降水模拟的系统性精度, 为区域气候预估提供了更稳健的基础。

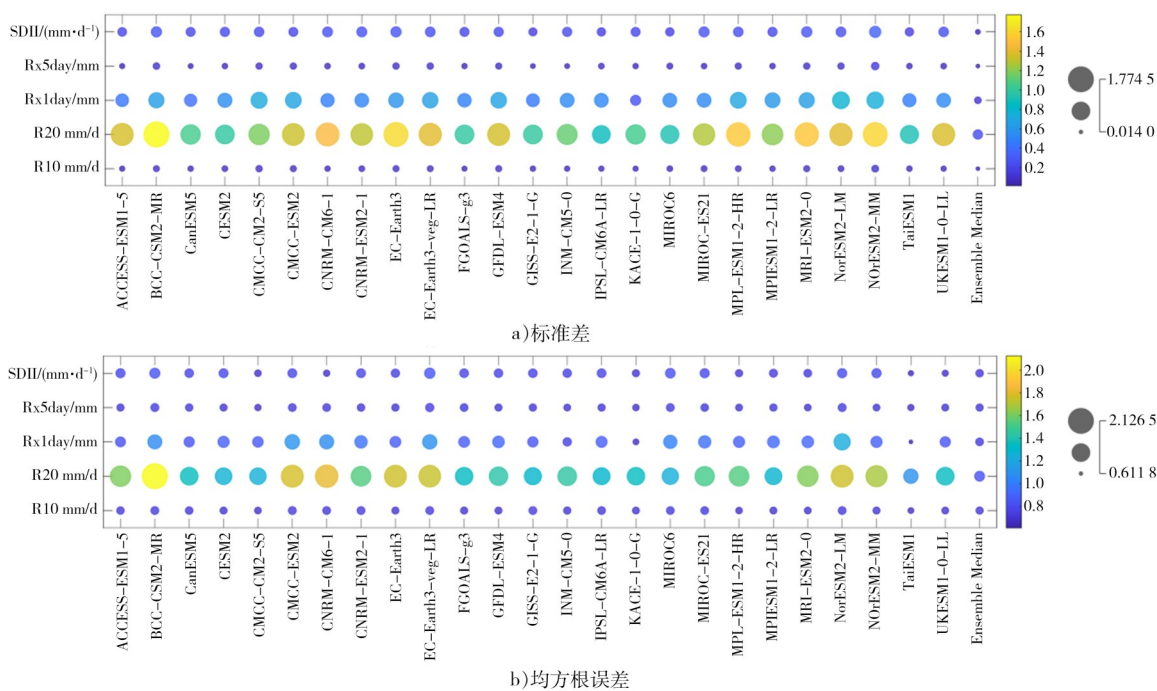


图3 Ensemble Median 及 26 个模式与 CN05.1 的误差评估

Fig. 3 Error assessment of Ensemble Median and 26 models compared with CN05.1

## 2.2 内蒙古未来极端降水时间演变特征

内蒙古极端降水指数时空演变呈现显著区域异质性特征(图4、表3)。历史基准期内, 干旱区 Rx1day 呈微弱上升趋势(0.50 mm/a), 而半干旱区

呈负趋势(-0.003 1 mm/a), 湿润区增幅相对显著(0.32 mm/a)。R10 mm 在湿润区上升趋势最明显, 而半干旱/半湿润区则出现小幅下降。所有历史时期变化趋势均未通过显著性检验( $p > 0.05$ )。

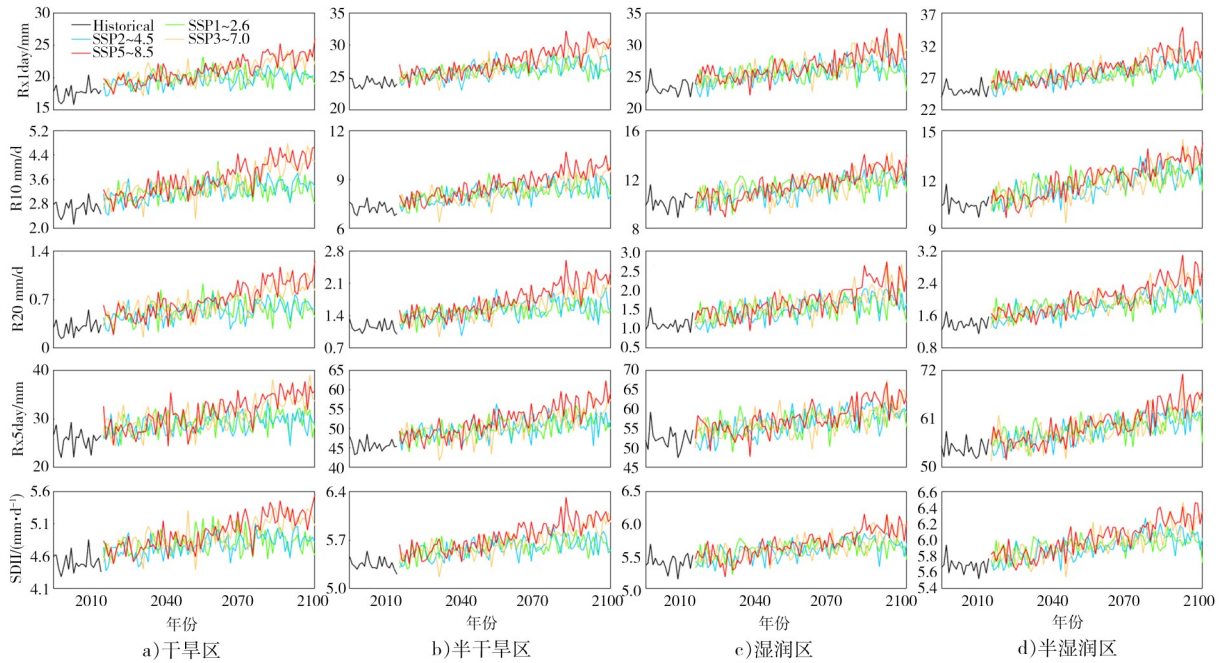


图 4 4 种共享社会经济路径下内蒙古极端降水指数的年际变化

Fig. 4 Interannual variation of extreme precipitation indices in Inner Mongolia under four SSPs

表 3 分区域极端降水指数未来演变趋势变化率

Tab. 3 Rates of change in future evolution trends of extreme precipitation indices by region

区域	指数	Historical	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	区域	指数	Historical	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
干旱区	Rx1day/(mm·a <sup>-1</sup> )	0.500 0	0.110*	0.230*	0.450*	0.630*	湿润区	Rx1day/(mm·a <sup>-1</sup> )	0.320 0	0.190*	0.400*	0.570*	0.580*
	R10 mm/(d·a <sup>-1</sup> )	0.019 0	0.038*	0.073*	0.140*	0.190*		R10 mm/(d·a <sup>-1</sup> )	0.270 0	0.150*	0.280*	0.280*	0.380*
	R20 mm/(d·a <sup>-1</sup> )	0.049 0	0.013*	0.028*	0.057*	0.074*		R20 mm/(d·a <sup>-1</sup> )	0.043 0	0.038*	0.088*	0.110*	0.120*
	Rx5day/(mm·a <sup>-1</sup> )	-0.080 0	0.320*	0.330*	0.790*	1.070*		Rx5day/(mm·a <sup>-1</sup> )	0.240 0	0.480*	0.880*	0.810*	1.080*
	SDII/(mm·d <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	0.003 3	0.017*	0.033*	0.063*	0.082*		SDII/(mm·d <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	0.029 0	0.021*	0.041*	0.049*	0.065*
半干旱区	Rx1day/(mm·a <sup>-1</sup> )	-0.003 1	0.160*	0.290*	0.580*	0.680*	半湿润区	Rx1day/(mm·a <sup>-1</sup> )	0.005 4	0.200*	0.430*	0.600*	0.690*
	R10 mm/(d·a <sup>-1</sup> )	-0.200 0	0.100*	0.130*	0.220*	0.280*		R10 mm/(d·a <sup>-1</sup> )	-0.020 0	0.170*	0.260*	0.280*	0.370*
	R20 mm/(d·a <sup>-1</sup> )	-0.013 0	0.028*	0.047*	0.089*	0.120*		R20 mm/(d·a <sup>-1</sup> )	0.050 0	0.035*	0.082*	0.110*	0.130*
	Rx5day/(mm·a <sup>-1</sup> )	0.220 0	0.560*	0.490*	0.910*	1.320*		Rx5day/(mm·a <sup>-1</sup> )	-0.210 0	0.630*	0.880*	0.990*	1.330*
	SDII/(mm·d <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	-0.046 0	0.021*	0.033*	0.058*	0.072*		SDII/(mm·d <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	0.006 1	0.021*	0.046*	0.056*	0.072*

注:\*表示通过了 0.05 的显著性检验。

未来预估期显示,各极端降水指数在4种SSP下均呈现显著增强趋势,且存在明显空间分异: Rx1day和Rx5day在SSP5-8.5下半湿润区增幅最大。全球变暖使海洋和陆地表面水汽蒸发加剧,大气中水汽含量增加。由于半湿润区和湿润区与受地理环境影响,一方面,由于山体起伏阻挡,部分富含水汽的气流被迫抬升致水汽凝结降水,气流更易输送至海拔低的部分;另一方面,东边地区相较于西边地区靠海距离更近,利于水汽输送。这两个因素相互耦合,可能促使Rx1day和Rx5day在该情景下分别达0.69、1.3 mm/a,较SSP1-2.6分别提升242.7%和111.8%;R10 mm在SSP5-8.5时湿润区增速最快(0.38 d/a):湿润区原本水汽就较为充足,在SSP5-8.5高排放情景下,全球变暖引发大气环流异常,可能有更多的水汽被输送到湿润区,使强降雨日数显著增加,较历史基准期提升17.7倍;R20 mm响应特征随情景变化,半湿润区成主要增幅区:在高排放情景下,大气获得更多能量,半湿润区的水汽输送或许因全球变暖而加强。此外,地形对气流运动产生影响,使水汽容易在该区域聚集,形成高强度降水,导致特大降雨日数明显增加,使R20 mm增幅达0.11~0.13 d/a;SDII在SSP5-8.5时干旱区增幅最显著(0.082 mm/d/a):在全球变暖的作用下,干旱区温度可能升高,使水汽蒸发速度加快,大气中的水汽含量得以增加。有降水发生时,由于水汽迅速补充,降水强度增强,使干旱区的SDII增幅明显,反映极端降水强度对干旱区水循环的强化作用。半湿润区作为气候过渡带,在SSP5-8.5下Rx1day和Rx5day增幅较其他区域高18.3%~26.7%,可能与该区域水汽输送增强和地形抬升效应耦合有关。湿润区对R10 mm和R20 mm的敏感性(SSP5-8.5增速分别达0.38、0.13 d/a)反映持续性强降水事件的空间集聚特征。半干旱区在SSP5-8.5下Rx1day增速0.68 mm/a较历史基准期逆转135.8倍。排放情景敏感性分析表明:SSP5-8.5下各指数增速较SSP1-2.6提升106%~212%,其中Rx5day区域平均增速1.20 mm/a达历史基准期的37.2倍。这种加速效应在湿润区Rx1day(+576.9%)

和半湿润区R20 mm(+245.2%)表现尤为突出。

5种极端降水指数的时间变化一致表明,在2015—2100年期间内蒙古极端降水指数将呈现显著上升趋势,随着排放情景增加,极端降水指数上升的速度也会增加<sup>[36]</sup>,未来研究区可能面临更潮湿、更严重和更频繁的极端降水事件。

### 2.3 内蒙古未来极端降水空间分布特征

图5—8展示了内蒙古历史基准期与4种SSP下不同时段极端降水指标的时空分异特征。历史基准期(图5a)显示:湿润区极端降水事件频发,Rx1day、R10 mm、Rx5day、R20 mm和SDII最高值分别达32 mm、17 d、67 mm、3.0 d和6.9 mm/d,而干旱区各指标普遍低于湿润区50%~70%。

Rx1day与Rx5day空间分异特征相似,呈现“西高东低”的增幅格局。SSP1-2.6下,两指标在整个预估期差异范围分别为-0.010~0.230和0.030~0.280,至SSP5-8.5时扩大至0.060~0.360和0.050~0.460。干旱区增幅最为显著,SSP5-8.5后期分别达0.13~0.53 mm和0.13~0.67 mm,较湿润区高3~4倍。R10 mm与R20 mm空间变幅较小,但随排放强度和时间推移呈现系统性上升。西部干旱区在SSP5-8.5后期差异值较基准期提升2.3~2.8倍,反映该区域极端降水日数显著增加。SDII空间分异与Rx1day、Rx5day相似,SSP5-8.5下干旱区增幅(0.070~0.260 mm/d)达湿润区的5.2倍,表明降水强度增强且存在显著地域异质性。所有SSP下极端降水指标均呈现“早期<中期<后期”的加速增长特征。以SSP5-8.5为例,Rx1day差异范围从早期的-0.01~0.25扩展至后期的0.13~0.53,增幅达112%;Rx5day从-0.03~0.32增至0.13~0.67,增幅109%。SDII在SSP5-8.5后期差异范围(0.070~0.260 mm/d)较SSP1-2.6同期(0.030~0.140 mm/d)扩大85.7%。干旱区对气候强迫响应最为敏感,SSP5-8.5下Rx1day和Rx5day后期增幅分别达湿润区的3.8倍和4.1倍。半湿润区作为过渡带,R10 mm和R20 mm增幅(SSP5-8.5后期分别为0.28~0.38 d和0.11~0.15 d)显著高于湿润区12%~15%。湿润区的SDII保持最低增幅(SSP5-8.5后期0.030~

0.050 mm/d),反映其降水强度变化的稳定性。

所有极端降水指标在未来情景下均呈显著上升趋势( $p < 0.05$ ),增幅与排放强度呈正相关<sup>[37]</sup>;短历时强降水指标(Rx1day、Rx5day)空间分异度(变异系数0.38~0.45)高于长历时指标(R10mm、

R20mm变异系数0.12~0.18);干旱区成为极端降水变化热点区域,SSP5-8.5后期各指标增幅较基准期提升127%~215%。强降水事件增多可能导致弱降水减少,在总降水量不变条件下或加剧干旱风险。

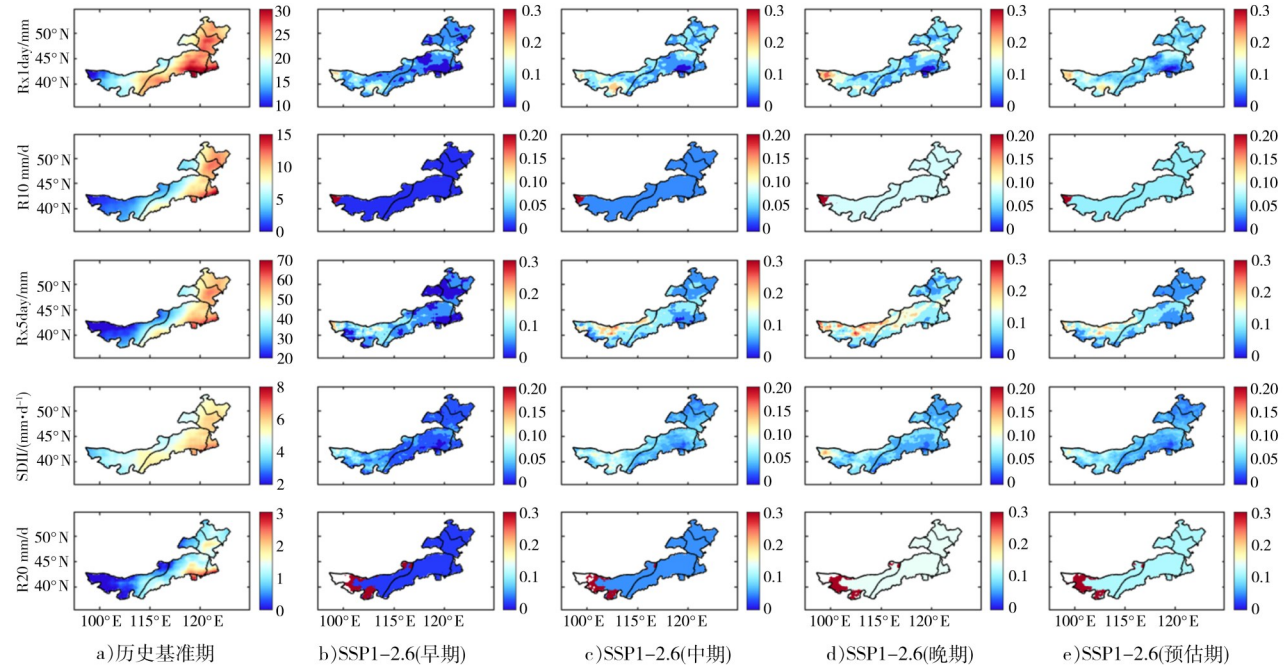


图5 SSP1-2.6下极端降水指数历史基准期的气候态(第1列)以及模拟时期与历史基准期的差异(第2—5列)

Fig. 5 Climatic state of extreme precipitation index in historical reference period under SSP1-2.6 (the first column) and differences between simulation period and historical reference period (columns 2—5)

### 3 讨论

内蒙古作为东亚季风边缘带和气候过渡区,其极端降水演变与其他区域存在显著差异。相较于南方湿润区以R10 mm、R20 mm为主的增幅特征,内蒙古半湿润区受地形抬升和水汽辐合影响,Rx1day、Rx5day增幅更突出<sup>[36]</sup>(SSP5-8.5下半湿润区增速达0.69~1.30 mm/a,表3)。与西北干旱区相比,内蒙古干旱区不仅SDII增加(0.082 mm/d/a),R10 mm、R20 mm亦显著增多,可能与蒙古气旋活动增强相关<sup>[37-38]</sup>。此外,半干旱区在高排放情景下强降水日数逆转历史负趋势(R10 mm从-0.20 d/a转为0.28 d/a),反映中高纬度环流调整的敏感性<sup>[39]</sup>。上述差异可能会带来独特的风险,如干旱区生态脆

弱性加剧,需警惕极端降水强度增加引发的土壤侵蚀,半湿润区则需防范短时强降水可能导致的局地洪涝,这与南方湿润区以持续性强降水为主的防洪需求存在显著差异。

本研究基于多模式集合降低了单一模型误差,但仍存在不确定性。一方面,CMIP6模式对内蒙古中小尺度降水过程(如地形抬升、局地对流)模拟能力不足,NEX-GDDP-CMIP6数据在干旱区可能低估极端降水频次,CN05.1资料亦受站点分布影响<sup>[27,40]</sup>。另一方面,社会经济路径假设与实际排放可能偏离,虽然SSP5-8.5下极端降水增速较SSP1-2.6提升106%~212%,但可能受政策调整或技术革新影响<sup>[35]</sup>。

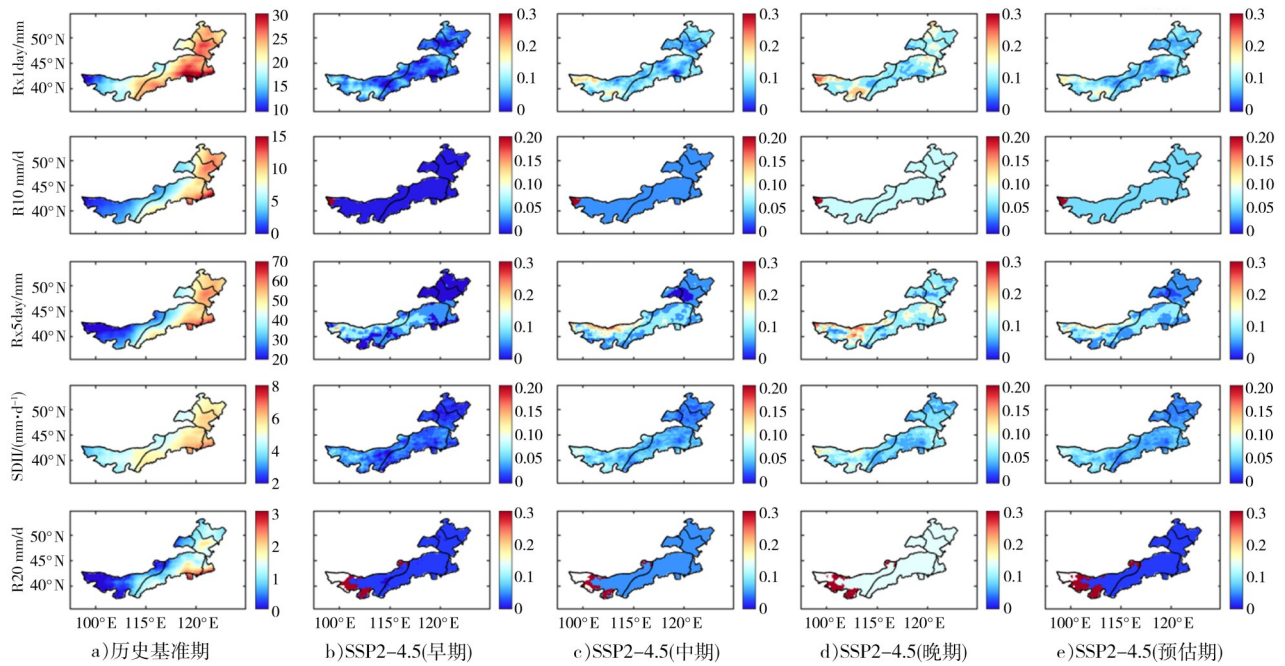


图6 SSP2-4.5下极端降水指数历史基准期的气候态(第1列)以及模拟时期与历史基准期的差异(第2—5列)

Fig. 6 Climatic state of extreme precipitation index in historical reference period under SSP2-4.5 (the first column) and differences between simulation period and historical reference period (columns 2—5)

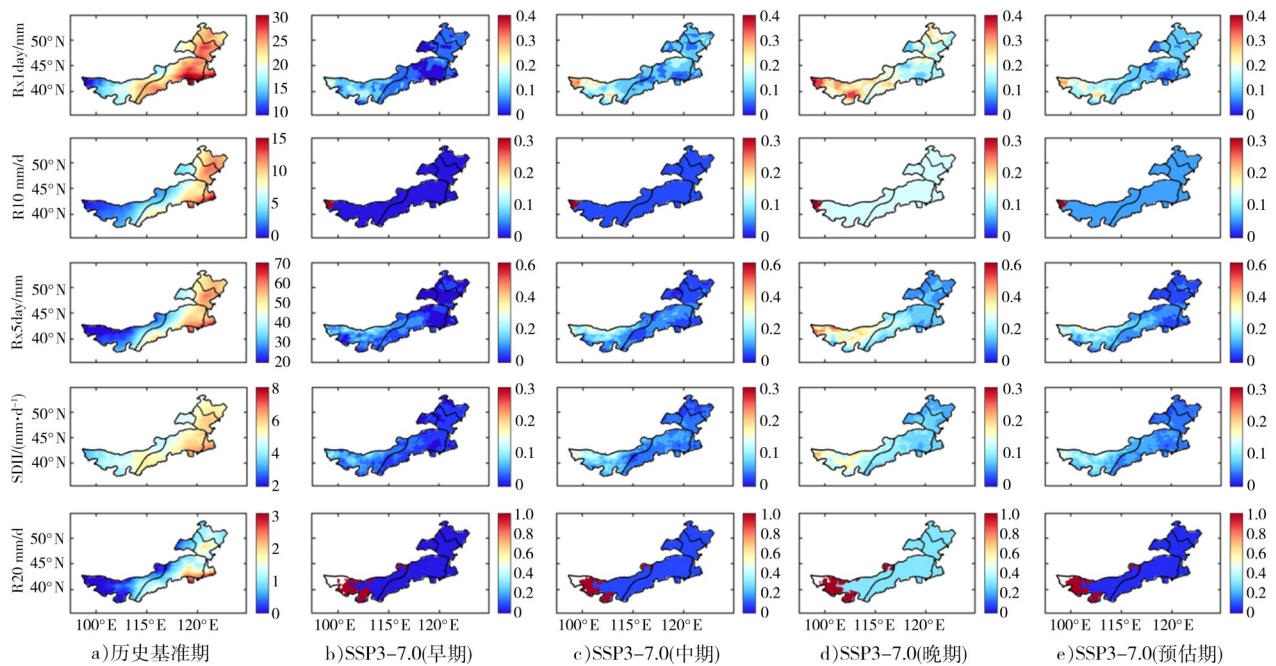


图7 SSP3-7.0下极端降水指数历史基准期的气候态(第1列)以及模拟时期与历史基准期的差异(第2—5列)

Fig. 7 Climatic state of extreme precipitation index in historical reference period under SSP3-7.0 (the first column) and differences between simulation period and historical reference period (columns 2—5)

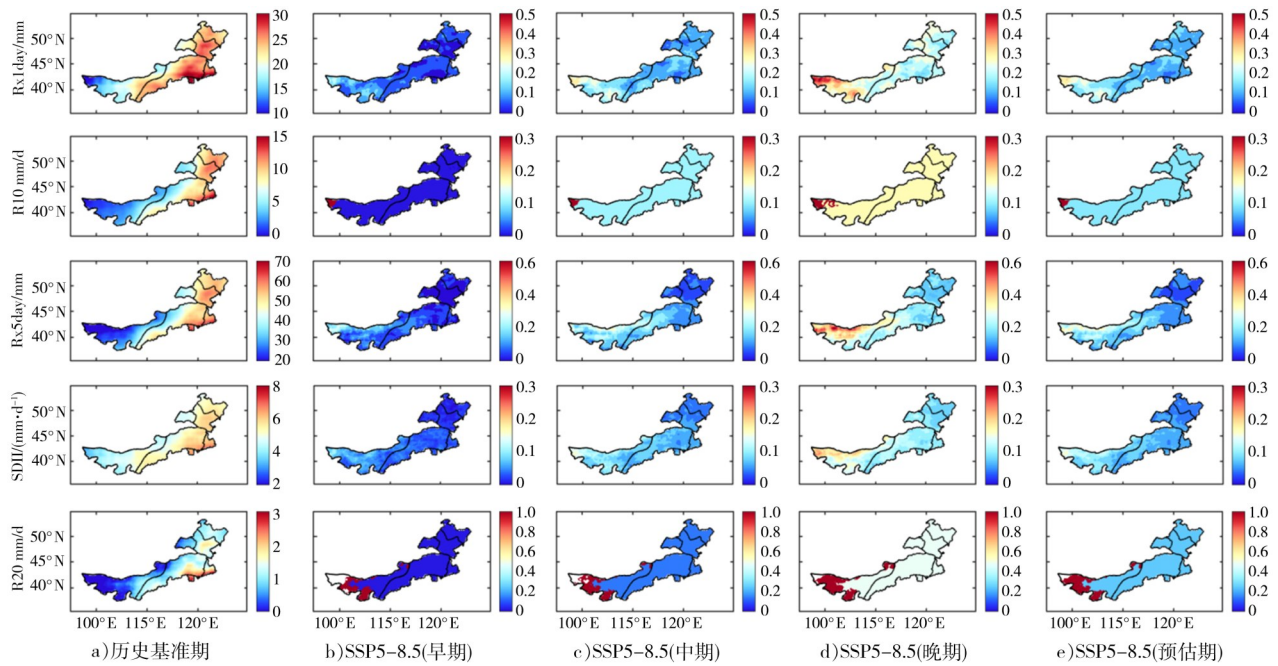


图8 SSP5-8.5下极端降水指数历史基准期的气候态(第1列)以及模拟时期与历史基准期的差异(第2—5列)

Fig. 8 Climatic state of extreme precipitation index in historical reference period under SSP5-8.5 (the first column) and differences between simulation period and historical reference period (columns 2-5)

#### 4 结论

本研究基于 NEX-GDDP-CMIP6 数据评估并预估内蒙古极端降水演变,主要结论如下。

a)4种 SSP下所有极端降水指数均呈现显著上升趋势( $p<0.05$ ),增幅与排放强度正相关。SSP5-8.5下增幅最为显著,各指标区域平均增速较 SSP1-2.6 提升 106%~212%。其中,Rx5day在 SSP5-8.5 下半湿润区增速达 1.3 mm/a,为历史基准期的 41.2 倍。温室气体排放控制对减缓极端降水的增强具有显著作用。

b)Rx1day,Rx5day在半湿润区增幅最大(SSP5-8.5:0.69~1.3 mm/a);R10 mm,R20 mm的敏感区随情景变化,SSP5-8.5时湿润区 R10 mm 增速达 0.38 d/a,半湿润区 R20 mm 达 0.13 d/a;SDII 在 SSP5-8.5 时干旱区增幅最高(0.082 mm/d/a),反映干旱区水循环强化特征。

c)历史基准期呈现“东多西少”空间格局,湿润区极端降水值较干旱区高 50%~70%。预估显示:所有 SSP 均呈现“早期<中期<后期”的加速增长,

SSP5-8.5 后期 Rx1day 差异范围(0.13~0.53 mm)较早期扩大 112%;干旱区成为变化热点区域,SSP5-8.5 后期各指标增幅较基准期提升 127%~215%;半湿润区作为气候过渡带,Rx1day、Rx5day 增幅较其他区域高 18.3%~26.7%。

#### 参考文献:

- [1] 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140807.
- [2] TABARI H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1). DOI: 10.1038/s41598-020-70816-2.
- [3] ZOU S, ABUDUWAILI J, DUAN W L, et al. Attribution of changes in the trend and temporal non-uniformity of extreme precipitation events in Central Asia [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 15032-15046.
- [4] XIA J, YANG X Y, LIU J, et al. Dominant change pattern of extreme precipitation and its potential causes in Shandong Province, China [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1). DOI: 10.1038/s41598-022-04905-9.

- [5] DONAT M G, LOWRY A L, ALEXANDER L V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(5): 508–513.
- [6] DO H X, MEI Y, GRONWOLD A D. To what extent are changes in flood magnitude related to changes in precipitation extremes? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(18). DOI: 10.1029/2020GL088684.
- [7] SHI J, CUI L L, TIAN Z. Spatial and temporal distribution and trend in flood and drought disasters in East China [J]. *Environmental Research*, 2020, 185. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109406.
- [8] KIRSCHBAUM D, KAPNICK S B, STANLEY T, et al. Changes in extreme precipitation and landslides over high mountain Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(4). DOI: 10.1029/2019GL085347.
- [9] ROMERO J E, VERGARA-PINTO F, AGUILAR G, et al. Triggering factors, behavior, and social impact of the January 2021 hail-debris flows at the Central Valley of Chile [J]. *Landslides*, 2022, 19(4): 865–883.
- [10] MADAKUMBURA G D, THACKERAY C W, NORRIS J, et al. Anthropogenic influence on extreme precipitation over global land areas seen in multiple observational datasets [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3944–3951.
- [11] BAO J W, SHERWOOD S C, ALEXANDER L V, et al. Future increases in extreme precipitation exceed observed scaling rates [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(2): 128–132.
- [12] DING Z Y, LU R J, WANG Y Y. Spatiotemporal variations in extreme precipitation and their potential driving factors in non-monsoon regions of China during 1961–2017 [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(2). DOI: 10.1088/1748-9326/aaf2ec.
- [13] HAN J Y, DU H B, WU Z F, et al. Changes in extreme precipitation over dry and wet regions of China during 1961–2014 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(11): 5847–5859.
- [14] LIU M X, XU X L, SUN A. Decreasing spatial variability in precipitation extremes in southwestern China and the local/large-scale influencing factors [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(13): 6480–6488.
- [15] LIU B H, XU M, HENDERSON M, et al. Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960–2000 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D8). DOI: 10.1029/2004JD004864.
- [16] ZHAI P M, SUN A J, REN F M, et al. Changes of climate extremes in China [J]. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 203–218.
- [17] XU Z X, GONG T L, LI J Y. Decadal trend of climate in the Tibetan Plateau—regional temperature and precipitation [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(16): 3056–3065.
- [18] YAO C, YANG S, QIAN W H, et al. Regional summer precipitation events in Asia and their changes in the past decades [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D17). DOI: 10.1029/2007JD009603.
- [19] ZHU Y L, WANG H J, ZHOU W, et al. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation [J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36(7): 1463–1473.
- [20] CHEN H P, SUN J Q. Projected change in East Asian summer monsoon precipitation under RCP scenario [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2013, 121(1): 55–77.
- [21] 李瑞青, 黄晓璐, 宋桂英, 等. 内蒙古东西部典型地区夏季极端暴雨特征对比分析[J]. *高原气象*, 2023, 42(5): 1218–1231.
- LI R Q, HUANG X L, SONG G Y, et al. Comparative analysis of summer extreme rainstorm characteristics between Western and Eastern Inner Mongolia [J]. *Plateau Meteorology*, 42(5): 1218–1231. (in Chinese)
- [22] 马爱华, 岳大鹏, 赵景波, 等. 近 60 a 来内蒙古极端降水的时空变化及其影响[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(1): 74–85.
- MA A H, YUE D P, ZHAO J B, et al. Spatiotemporal variation and effect of extreme precipitation in Inner Mongolia in recent 60 years [J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(1): 74–85. (in Chinese)
- [23] EYRING V, BONY S, MEEHL G A, et al. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1937–1958.
- [24] WU J, SHI Y, XU Y. Evaluation and projection of surface wind speed over China based on CMIP6 GCMs [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(22). DOI: 10.1029/2020JD033611.
- [25] SANG Y H, REN H L, SHI X L, et al. Improvement of soil moisture simulation in Eurasia by the Beijing Climate Center Climate System Model from CMIP5 to CMIP6 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(2): 237–252.
- [26] IPCC. *Climate Change 2013: the physical science basis* [R]. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. DOI: 10.1016/S0925-7721(01)00003-7.
- [27] 董前进, 袁鑫. 基于多种统计降尺度方法的未来降水预估研

- 究:以青藏高原为例[J]. 人民珠江,2024,45(3):10-17.
- DONG Q J, YUAN X. Future precipitation projection based on multiple statistical downscaling methods—a case study of Tibetan Plateau [J]. *Pearl River*, 2024, 45(3): 10-17. (in Chinese)
- [28] 吴琛,王景才,邵俊博,等. CMIP6模式对淮河中上游流域气候要素模拟效果的评估研究[J]. 人民珠江,2023,44(10):105-116.
- WU C, WANG J C, SHAO J B, et al. Simulation effect evaluation of CMIP6 models on climatic elements in Huai River Basin [J]. *Pearl River*, 2023, 44(10): 105-116. (in Chinese)
- [29] 王超,李浩,叶秀辉,等. 长江流域未来气候变化预估研究[J]. 人民珠江,2024,45(9):11-18.
- WANG C, LI H, YE X H, et al. Prediction of future climate change in Yangtze River Basin [J]. *Pearl River*, 2024, 45(9): 11-18. (in Chinese)
- [30] AIRIKEN M, LI S, ABULAITI A, et al. Prediction of extreme climate on the Tibetan Plateau based on NEX-GDDP-CMIP6 [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2023, 29(9/10): 1261-1275.
- [31] 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): 1497-1456.
- [32] 申露婷,张方敏,黄进,等. 1981—2018年内蒙古不同等级降水时空变化特征[J]. 气象科学,2022,42(2):162-170.
- SHEN L T, ZHANG F M, HUANG J, et al. Spatiotemporal variations of different precipitation grades in Inner Mongolia from 1981 to 2018 [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2022, 42(2): 162-170. (in Chinese)
- [33] YUAN H H, HUANG J B, NING L K, et al. Evaluation of precipitation extremes over the Tibetan plateau using the NASA global daily downscaled datasets NEX-GDDP-CMIP6 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2023, 14(6): 884-895.
- [34] 余小波,黄领梅,申曼华,等. 基于CN05.1数据集驱动SWAT模型的玉龙喀什河流域径流模拟[J]. 人民珠江,2024,45(9):19-26.
- YU X B, HUANG L M, SHEN M H, et al. Runoff simulation of Yulong Kashi River Basin based on CN05.1 dataset driven SWAT model [J]. *Pearl River*, 2024, 45(9): 19-26. (in Chinese)
- [35] 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.
- [36] 冯安兰,张强,宋金帛,等. 基于CMIP6的黄河流域极端降水时空特征分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2024,60(2):270-284.
- FENG A L, ZHANG Q, SONG J B, et al. Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation in the Yellow River basin based on CMIP6 [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2024, 60(2): 270-284. (in Chinese)
- [37] FENG T C, ZHU X, DONG W J. Historical assessment and future projection of extreme precipitation in CMIP6 models: Global and continental [J]. *International Journal of Climatology*, 2023, 43(9): 4119-4135.
- [38] JIANG J, YING C, SONG G Y, et al. Characteristics and forecast of extreme precipitation in Inner Mongolia [J]. *Climate Change Research Letters*, 2021(10): 197-205.
- [39] ZHOU B, WEN Q H, XU Y, et al. Projected changes in temperature and precipitation extremes in China by the CMIP5 multimodel ensembles [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(17): 6591-6611.
- [40] 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. (in Chinese)

## Future Extreme Precipitation Estimation in Inner Mongolia Autonomous Region Based on NEX-GDDP-CMIP6

LI Xiaofeifan<sup>1</sup>, WANG Yunlu<sup>2</sup>, FU Hongjun<sup>3</sup>, LUO Yimeng<sup>4</sup>, XIAO Zihan<sup>5</sup>, CHEN Li<sup>2\*</sup>, LIU Ting<sup>2</sup>, CUI Xinyu<sup>2</sup>

(1. Hel Ingeer Meteorological Bureau, Hohhot 011599, China; 2. Dongsheng Meteorological Bureau, Ordos 017099, China; 3. Lianshan Meteorological Bureau, Qingyuan 513299, China; 4. Shehong Meteorological Bureau, Suining 629200, China; 5. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** Serving as a vital ecological security barrier in northern China, Inner Mongolia encompasses arid, semi-arid, and semi-

humid regions characterized by complex and diverse climatic conditions. This diversity increases the region's susceptibility to extreme precipitation events, which can lead to flooding, water resource imbalances, and disturbances to ecosystems. Such events present considerable risks to agricultural and pastoral production, as well as to broader socioeconomic development. To enhance preparedness for future extreme precipitation events, this study utilized simulation data from 26 Earth System Models under the NEX-GDDP-CMIP6 initiative, combined with the high-resolution Chinese meteorological reanalysis dataset CN05.1. The accuracy of the multi-model Ensemble Median was evaluated. Furthermore, the spatio-temporal variation characteristics of five extreme precipitation indices during the early, mid, and late 21st century under four shared socioeconomic pathways (SSPs) were investigated, in comparison with the historical reference period. Key findings are as follows: ① During the future projection period (2015—2100), all extreme precipitation indices across the four aridity and humidity zones showed a significant increasing trend, with the magnitude of change closely correlated to greenhouse gas emission levels. The upward tendency intensified progressively under higher emission scenarios, becoming most pronounced under SSP5-8.5. Considerable spatial heterogeneity was observed in the rate of increase among different climatic zones. For instance, semi-humid zones consistently exhibited the fastest rise in Rx1day and Rx5day across all scenarios. In contrast, the regions with the most significant increases in R10 mm, R20 mm, and SDII varied depending on the scenario, shifting among arid, semi-arid, and semi-humid zones under different SSPs. These differential responses highlight regional disparities in climate sensitivity and underscore the critical influence of emission levels on the intensity and spatial distribution of future extreme precipitation events. ② During the historical reference period, the spatial distribution of all extreme precipitation indices exhibited a distinct east-west gradient, with higher values consistently observed in the eastern regions and lower values in the west. Notably, the most significant upward trend in these indices occurred in arid regions, highlighting their particular vulnerability to climatic shifts. Throughout all future simulation periods, a consistent pattern emerged: as emission levels rose, so did the magnitude of extreme precipitation indices. This trend was markedly more pronounced under high-emission scenarios, with the most substantial increases projected for the late 21st century. The amplified response in arid zones underscores their heightened sensitivity to climate change and suggests an accelerating risk of extreme precipitation events in these regions under continued greenhouse gas forcing. The differential spatial and temporal patterns further emphasize the importance of considering region-specific vulnerabilities in climate adaptation planning. ③ Across different simulation periods, extreme precipitation indices show an overall increase with higher emissions, with more pronounced trends under high-emission scenarios and greater magnitudes of increase in the later periods. The research results indicate that Inner Mongolia may face more frequent and severe extreme precipitation events in the future, which is of great significance for the formulation of regional water resources management, flood control, and disaster reduction strategies.

**Keywords:** extreme precipitation index; CMIP6; shared socioeconomic pathway; climate change; future projection

(责任编辑:高天扬)