

李佳,黄领梅,申奥,等.海河流域极端降水时空演变特征及未来趋势分析[J].人民珠江,2025,46(9):84-94.

海河流域极端降水时空演变特征及未来趋势分析

李 佳,黄领梅*,申 奥,史荣情,申曼华,余小波

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710000)

摘 要:揭示极端降水事件的时空变化特征,对海河流域水资源保护、防灾减灾及应对未来气候变化具有重要意义。基于 CN05.1 格点降水数据及国际耦合模式第六次比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)中 9 个气候模式数据,采用 Delta 降尺度、Sen's 斜率法及 Mann-Kendall 趋势性检验等对海河流域历史与未来不同情景下极端降水变化特征进行研究。结果表明:①Delta 偏差修正后的数据模拟效果较为良好,适用于极端降水预估;②历史时期(1980—2014 年)在时间变化上,年内降水总量、大于 10 mm 日数、最大 5 日降水量呈显著上升趋势,其他指标虽有增加但未达显著水平,空间变化上,极端降水指数呈现“西北低、东南高”的空间格局;③未来时期(2021—2100 年)极端降水指数在时间变化上整体呈增强趋势,在空间变化上,相比历史时期,高排放情景下极端降水指数变化率增加区域范围明显扩大;④从季节尺度来看,最大 1 日降水量与最大 5 日降水量在夏秋季增长趋势显著性增强,这一变化可能导致暴雨洪涝灾害在夏秋两季更为严峻。

关键词:极端降水;时空特征;CMIP6;海河流域

中图分类号:TV125 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2025)09-0084-11

Characteristics of Spatial and Temporal Evolution of Extreme Precipitation in Haihe River Basin and Analysis of Future Trends

LI Jia, HUANG Lingmei*, SHEN Ao, SHI Rongqing, SHEN Manhua, YU Xiaobo

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: Revealing the spatial and temporal changes of extreme precipitation events is of great significance for the protection of water resources, disaster prevention and mitigation, and responses to climate change in the Haihe River Basin. In this paper, based on CN05.1 grid-point precipitation data and data from nine climate models in Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), this paper studied the characteristics of extreme precipitation changes in the Haihe River Basin under different past and future scenarios by using Delta downscaling, Sen's slope method, and Mann-Kendall trend test. The results indicate that: ① The data simulation effect after Delta deviation correction is relatively good and is suitable for the prediction of extreme precipitation. ② In the historical period (1980—2014), in terms of temporal changes, the total annual precipitation, the number of days with precipitation exceeding 10 mm, and the maximum five-day precipitation show a significant upward trend, and other indicators increase but do not reach a significant level; in terms of spatial changes, the extreme precipitation index generally shows the pattern of "low in the northwest and high in the southeast". ③ In the future period (2021—2100), the extreme precipitation index will generally show a strengthening trend in terms of temporal changes. In terms of spatial changes, compared with historical periods, the area where the rate

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2023YFC3006500)

收稿日期:2025-05-06 **修回日期:**2025-06-09 **网络首发日期:**2025-06-25

作者简介:李佳(2000—),女,硕士研究生,主要从事水文学及水资源等工作。E-mail:2397054615@qq.com

通信作者:黄领梅(1972—),女,博士,副教授,主要从事水文学及水资源等工作。E-mail:huanglm@xaut.edu.cn

of change of the extreme precipitation index increases under the high-emission scenario has significantly expanded. ④On a seasonal scale, the growth trends of the maximum one-day precipitation and the maximum five-day precipitation have significantly strengthened in summer and autumn, a change that may lead to more severe heavy rainfall and flooding in summer and autumn.

Keywords: extreme precipitation; spatial and temporal characteristic; CMIP6; Haihe River Basin

在全球气候变暖背景下,政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告指出:气候变暖将导致全球极端降水事件发生频率与强度显著增加^[1-3]。极端降水事件的发生,不仅对区域水资源管理和农业生产构成威胁,更可能引发次生灾害,如洪水、滑坡和泥石流等^[4],进而造成严重的人员伤亡与显著的社会和经济损失^[5-7]。例如:2016年7月华北极端强降水^[8]、2021年郑州“7·20”特大暴雨^[9],造成了严重的城市内涝等次生灾害,严重威胁城市交通安全和人民生命财产安全^[10-11]。中国北方典型的半干旱、半湿润交错带——海河流域^[12],作为华北地区人口密集、工业发达和农业生产重要地带,其受东亚季风主导,流域降水具有集中性和强烈的年际波动特征,加之地形复杂与城市化加剧,使得区域水文调节能力逐渐薄弱,区域对极端降水事件的响应愈发敏感^[13-15]。

近年来,国内外学者多基于观测数据或再分析数据,开展了不同区域极端降水指数的统计分析。例如:王芳等^[16]在中亚地区利用CMIP5的33个全球气候模式研究得出该区域平均降水相较于历史时期增加约10.6%。Tian等^[17]基于校正后的CMIP6对中国整体进行了降水预测,得出中国北方降水增加的速度将高于南方,但不会改变南方多雨、北方少雨的格局。邹磊等^[18]研究了海河流域不同量级降水量变化特征,得出流域极端降水呈南多北少格局。邵月红等^[19]对近60 a降水极值频率进行分析,表明不同重现期下流域从沿海到内陆降水极值频率逐渐减小。但目前研究主要集中在两方面:一是基于历史资料对极端降水的时空分布特征进行总结;二是基于大尺度区域对未来极端降水变化趋势整体分析。然而,目前关于海河流域未来极端降水在不同子流域及不同季节的具体变化特征仍缺乏系统性研究。

因此,本文以海河流域为研究区域,选取6个典型的极端降水指数PRCPTOT、SD II、R99p、R10 mm、RX1day、RX5day,基于CN05.1观测数据评估海河流域历史时期(1980—2014年)极端降水指数的年际变化趋势及空间分布格局;其次,基于CMIP6多模式集合数据研究未来时期(2021—2100年)不同情景下(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5)相较于历史时期的时空变化特征及极端降水(RX1day与RX5day)在各子流域上的季节性变化。通过定量揭示极端降水事件在未来的时空分布特征,为流域未来水资源规划、防灾减灾以及应对气候变化提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

海河流域(35~43°N,112~120°E)位于中国华北地区,流域包含滦河、北三河、大清河、永定河、子牙河、漳卫南、黑龙港运东、徒骇马颊河共8个子流域,流域总面积约32万km²,流域概况见图1。

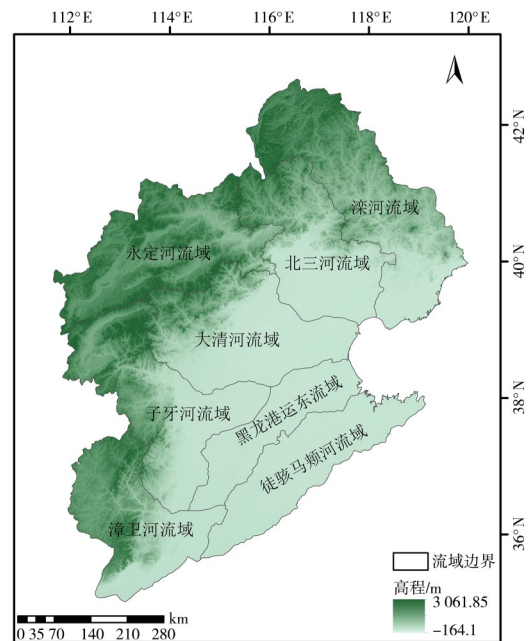


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

流域属于温带季风气候,多年平均降水量约539 mm^[20],受季风气候影响,降水年际与年内分布不均,年内降水多集中于6—9月,占年内降水的70%~85%^[19]。

1.2 数据来源与处理

本文使用的降水观测数据为基于2 000余个中国气象站的观测资料,通过距平逼近法插值建立的一套分辨率为0.25°×0.25°的CN05.1格点化数据集^[21],数据时间跨度为1980—2014年。在对研究区范围内的1 024个格点数据完成异常值处理后,剔除了其中的101个格点数据。因此,本研究基于流域范围内923个有效格点数据进行计算和分析。

基于数据可用性及数据的完整性,降水模拟数据选取CMIP6中9个气候模式输出的逐日降水数据^[22-24],模式信息见表1,包括历史时期1980—2014年及未来预测期2021—2100年,数据可从网站(<https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/>)进行下载。CMIP6计划中包含5种未来社会可能发展路径:SSP1(可持续发展)、SSP2(中度发展)、SSP3(局部发展)、SSP4(不均衡发展)与SSP5(常规发展)。辐射强迫则是指到2100年增加温室气体所导致的辐射强迫水平,分别为1.9、2.6、3.4、4.5、6.0、7.0、8.5 W/m²。本文未来预测期数据将采用SSP1-2.6、SSP2-4.5与SSP5-8.5,以此代表低、中、高3种排放情景,具体描述见表2。

表1 选用的CMIP6模式基本信息

Tab. 1 Basic information on the selected CMIP6 model

序号	模式名称	机构/所属国家	分辨率
1	ACCESS-CM2	ARCCSS/澳大利亚	1.25°×1.875°
2	ACCESS-ESM1-5	CSIRO/澳大利亚	1.25°×1.875°
3	CanESM5	CCCma/加拿大	2.8°×2.8°
4	MIROC6	MIROC/日本	1.4°×1.4°
5	MRI-ESM2-0	MRI/日本	1.125°×1.125°
6	MPI-ESM1-2-HR	DWD/德国	0.75°×0.75°
7	NESM3	NUIST/中国	0.5°×0.5°
8	NorESM2-LM	NCC/挪威	2.0°×2.5°
9	NorESM2-MM	NCC/挪威	1.9°×2.5°

表2 ScenarioMIP试验设计

Tab. 2 ScenarioMIP experimental design

级别	名称	描述
Tier-1	SSP5-8.5	高强度情景,2100年辐射强度稳定在约8.5 W/m ²
	SSP2-4.5	中等强度情景,2100年辐射强度稳定在约4.5 W/m ²
	SSP1-2.6	低强度情景,2100年辐射强度稳定在约2.6 W/m ²

1.3 研究方法

1.3.1 降尺度与偏差矫正

由于所用数据空间分辨率不同,首先将所有数据通过双线性插值法将其插值到0.5°×0.5°的网格上。其次,采用Delta降尺度法对未来时期降水模拟数据进行偏差矫正,以1980—1999年为基准期,构建矫正场,将计算的Delta值分别用于模拟数据2000—2014年(验证期)与2021—2100年(未来时期)的模拟数据,完成偏差矫正。该方法主要是通过比较历史时期数据与观测数据之间的差异,以此来修正未来不同情景下降水数据。

$$E = \frac{P_{obs, his}}{P_{mod, his}} \quad (1)$$

$$P_{corr, fut} = E \times P_{mod, fut} \quad (2)$$

式中: $P_{obs, his}$ 为历史时期观测数据的逐月平均值; $P_{mod, his}$ 为历史时期模拟数据的逐月平均值; E 为矫正系数; $P_{mod, fut}$ 为不同情景下未来时期模拟数据; $P_{corr, fut}$ 为校正后的未来时期数据。

1.3.2 泰勒图

本文使用泰勒图来评估偏差矫正后的CMIP6多模式数据对历史时期观测数据的模拟情况,通过计算空间相关系数、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和标准差等关键统计量,来衡量偏差矫正后的模拟与观测数据间的相似性。其中相关系数越高、均方根误差及标准差越小,其模拟效果最优。

1.3.3 极端降水指数

本文采用气候变化检测和指数专家组(Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI)定义^[25]的6个极端降水指数,见表3,极端降水指数由R语言的RclimDex1.9软件计算。对于

极端降水指数的趋势分析采用 Sen's 斜率法和 Mann-Kendall 趋势显著性检验^[26],其置信区间选为 0.05。

表 3 选用的极端降水指数

Tab. 3 The selected extreme precipitation indices

英文缩写	指标名称	指标定义	指标单位
PRCPTOT	年内降水总量	每年日降水量大于等于 1 mm 之和	mm
SD II	降水强度	每年降水总量/降水日数(日降水量大于等于 1 mm)	mm/d
R99p	极强降水量	日降水量大于 99% 分位数的总降水量	mm
R10mm	大于 10 mm 日数	日降水量大于等于 10 mm 总日数	d
RX1day	最大 1 日降水量	每年 1 d 最大降水量	mm
RX5day	最大 5 日降水量	每年连续 5 d 最大降水量	mm

2 研究结果与分析

2.1 偏差矫正效果评估

图 2 为 9 个模式及多模式集合平均 (Multi-Model Ensemble, MME) 模拟的 2000—2014 年海河流域日降水量的泰勒图。9 个模式模拟的日降水量与观测数据相关系数介于 0.7~0.9, 其中模式 MRI-ESM1-2-HR 的相关系数最低, 为 0.71, 其余 8 个模

式相关系数介于 0.76~0.82。为减少单一模式误差造成的不确定性并使模拟值更贴近观测值, 取 9 个模式的集合平均值, 其与观测数据的相关系数为 0.88, 这表明相较于单一模式, 多模式集合平均对降水的模拟能力更优。

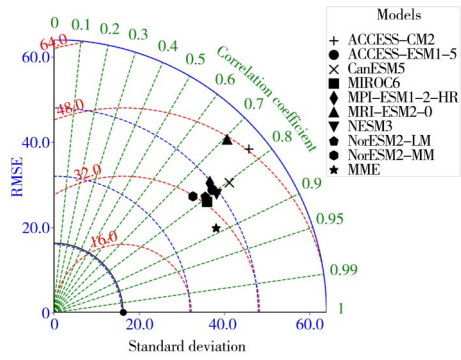


图 2 多模式模拟平均降水的泰勒图

Fig. 2 Taylor diagram of mean precipitation simulated by multiple models

2.2 历史时期极端降水指数时空变化特征

从图 3 可以看出, 1980—2014 年, 年总降水量 (PRCPTOT)、大于 10 mm 日数 (R10 mm) 和最大 5 日降水量 (RX5day) 呈现显著上升趋势; 降水强度指数 (SD II)、极强降水量 (R99p) 和最大 1 日降水量 (RX1day) 呈现上升趋势但不显著。

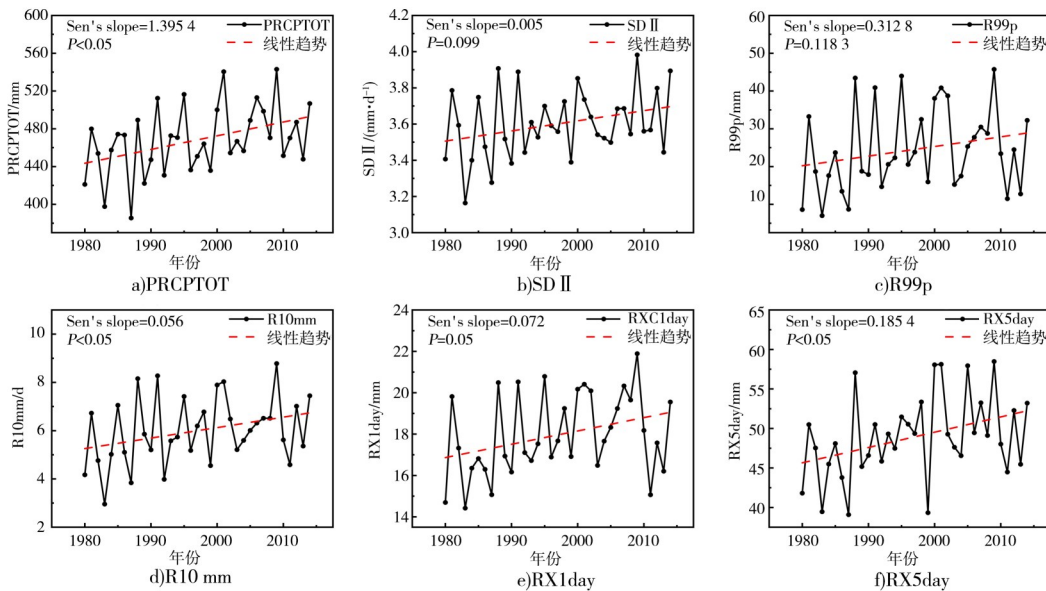


图 3 历史时期极端降水指数时间变化趋势

Fig. 3 Temporal trends in extreme precipitation indices during the historical period

从图4可以看出,各指数呈现出由西北向东南递增的分布格局。其中,PRCPTOT(图4a)高值区位于流域东北沿海区域及南部边缘区域,多年平均降水量超570 mm;低值区多位于流域北部,年降水在314~414 mm;流域中部区域多年平均降水量处中间水平。SD II(图4b)高值区位于流域东部,降水强度超4.4 mm/d;低值区位于流域北部,降水强度不足3.4 mm/d;整体上,降水强度呈自东向西逐渐减弱趋势。R99p(图4c)高值区位于流域沿海及南部区

域,多年均值大于30 mm;低值区位于流域北部,多年均值在13~19 mm。R10 mm(图4d)高值区位于流域东部,为9.8~14 d;低值区位于流域西北部,为1.1~4.5 d。RX1day(图4e)与RX5day(图4f)在空间分布上呈现出类似的空间格局,高值区主要集中在流域东部与南部,RX1day值多在23~28 mm,RX5day值多在60~73 mm;低值区多在流域北部山区,RX1day值不足15 mm,RX5day值不足43 mm。

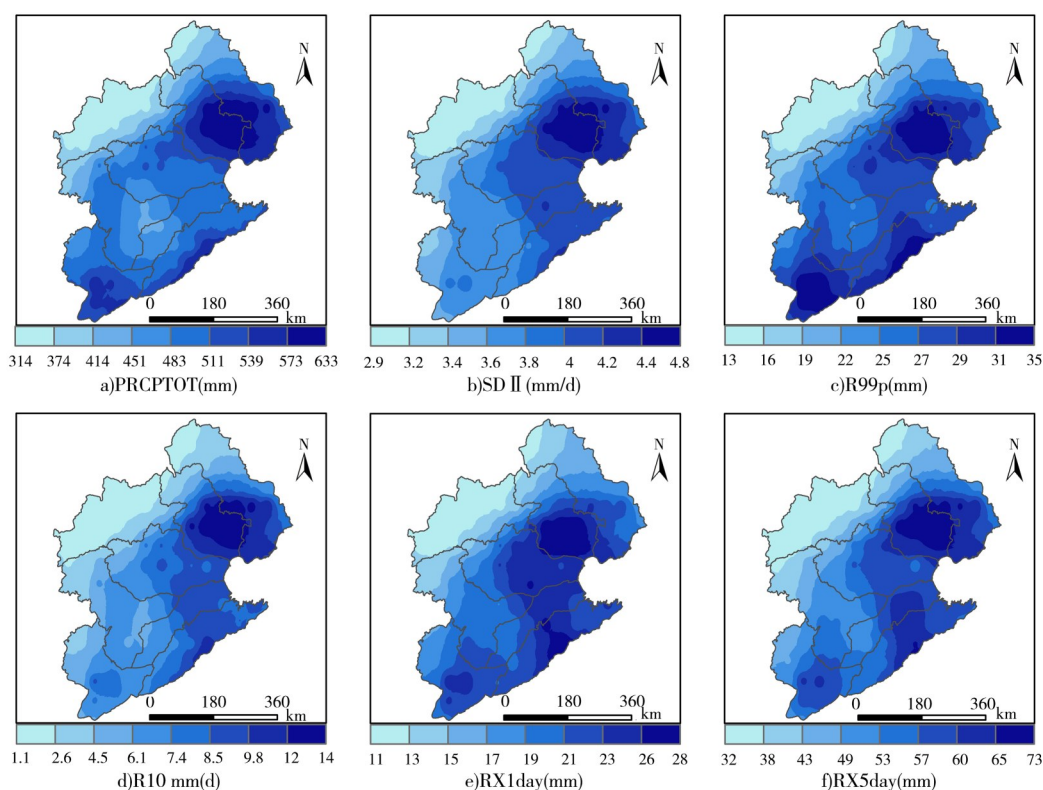


图4 历史时期极端降水指数空间变化分布

Fig. 4 Distribution of spatial variation of extreme precipitation index during historical periods

2.3 未来时期极端降水指数时间趋势分析

2021—2100年,6个极端降水指数在SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5情景下的时间趋势变化见图5。结果表明,PRCPTOT、R99p、RX5day在所有情景下均呈现显著上升趋势,且其上升斜率与排放强度成正比,在SSP5-8.5情景下增长最为迅速,而在SSP1-2.6情景下增长则相对缓慢;SD II、R10 mm、RX1day在SSP1-2.6与SSP5-8.5情景下呈现显著上升趋势,尤其在SSP5-8.5中最为明显,而在

SSP2-4.5下变化呈现上升趋势但不显著。

2.4 未来时期极端降水指数相对于历史时期空间变化分析

在未来排放情景下(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5)下,海河流域各极端降水指数相较于历史时期空间变化率呈上升趋势,增加面积不断扩大,且随排放升高各指数的空间分布特征表现出显著差异。

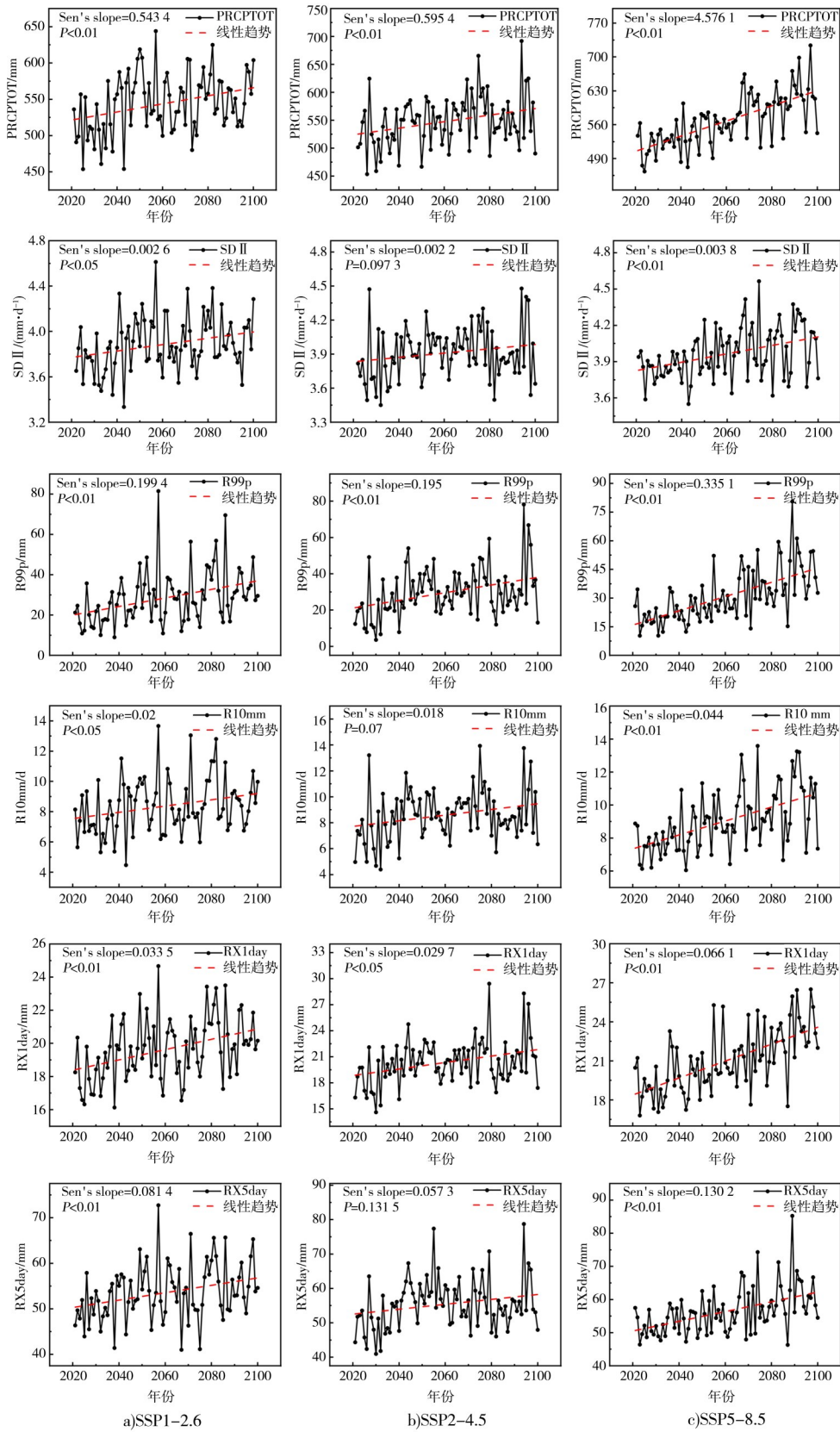


图 5 未来时期极端降水指数时间变化趋势

Fig. 5 Temporal trends in extreme precipitation indices for future periods

在低排放情景(SSP1-2.6)下,见图6,PRCPTOT(图6a)呈中等增加且空间分布均匀。SD II(图6b)高值区在沿海区域,变化率为10%~12%。R99p(图6c)变化率在东部部分区域变化率超23%,大部分区域增幅为12%~20%。R10 mm(图6d)在西北部增幅

达72%~95%,中部与东南部为21%~41%。最大1日降水量RX1day(图6e)在北部和西南部部分区域出现负增长,说明相较于历史时期,该区域最大1日降水量有所减小;南部和东部增幅超18%。RX5day(图6f)中部增幅超15%,西南部增幅不明显。

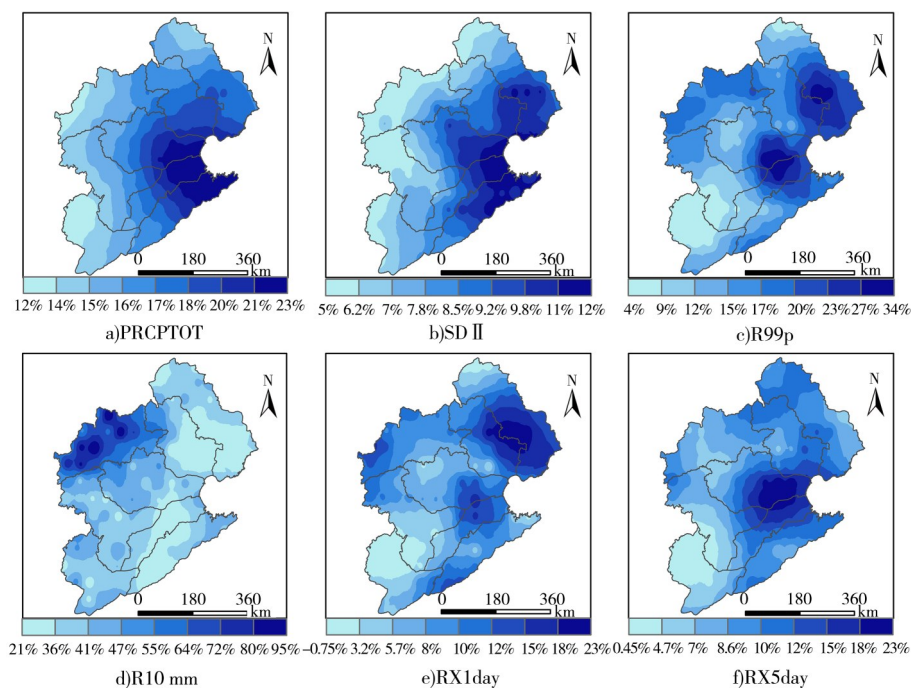


图6 SSP1-2.6情景下未来时期相对于历史时期极端降水指数空间变化分布

Fig. 6 Distribution of spatial variation of extreme precipitation index for future periods relative to historical periods under SSP1-2.6 scenario

在中等排放情景(SSP2-4.5)下,见图7,各极端降水指数增幅普遍高于低排放情景且空间差异更显著。PRCPTOT(图7a)东部高值区增幅范围扩展。SD II(图7b)高值区从沿海向四周扩展,变化率增至13%,但西南和北部边缘变化仍较小。R99p(图7c)中部和北部部分区域增幅达25%~36%,不均性增强。R10 mm(图7d)西北部增幅显著至120%,东南部增幅仍较低。RX1day(图7e)所有区域呈正向增长,中部和东部增幅达27%,尤其在东部沿海;西部和北部增幅相对较低,为0.8%~10%。RX5day(图7f)中部高值区扩展,西南部虽增幅不大但也呈上升趋势。

在高排放情景(SSP5-8.5)下,见图8,极端降水指数上升更为显著,空间分布广泛且连续。PRCPTOT(图8a)在东部和中部形成连续高值区;SD II(图8b)高值区扩展至中部和东北部,变化率提升至12%~15%,西部边缘增幅有所提升。R99p(图8c)在中部、东部及西北边缘增幅加剧至37%~48%,表明极端降水事件大幅增强。R10 mm(图8d)西北部增幅超130%,东南部低值区变化较小。RX1day(图8e)所有区域上升,东部超过30%,西部和北部增幅达5%~14%。RX5day(图8f)高值区从中部扩展至东部,核心区域变化率为21%~28%,西南部低值区较低排放情景有所提升。

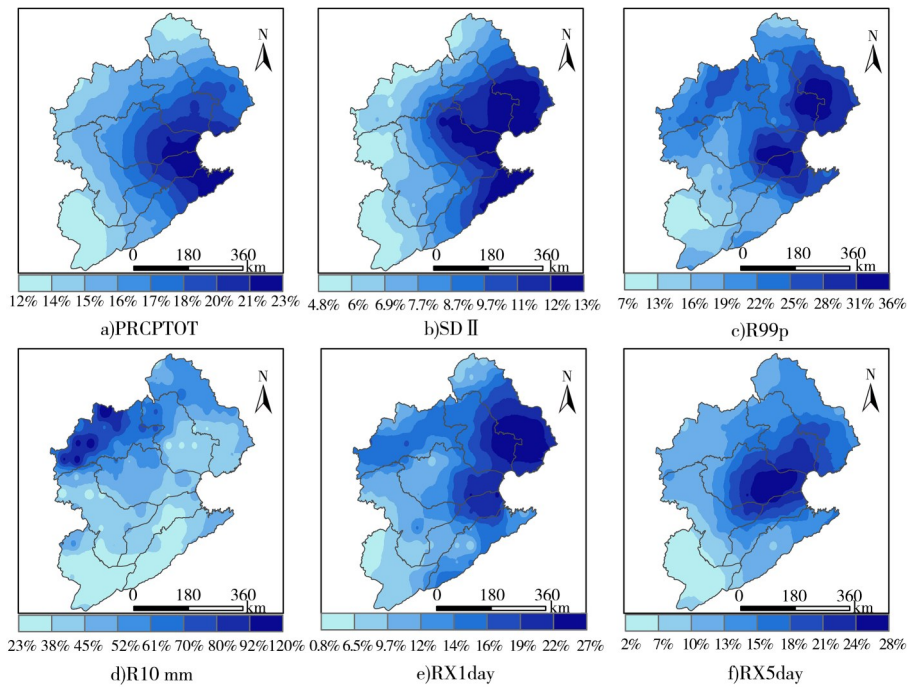


图 7 SSP2-4.5 情景情景下未来时期相对于历史时期极端降水指数空间变化分布

Fig. 7 Distribution of spatial variation of extreme precipitation index for future periods relative to historical periods under SSP2-4.5 scenario

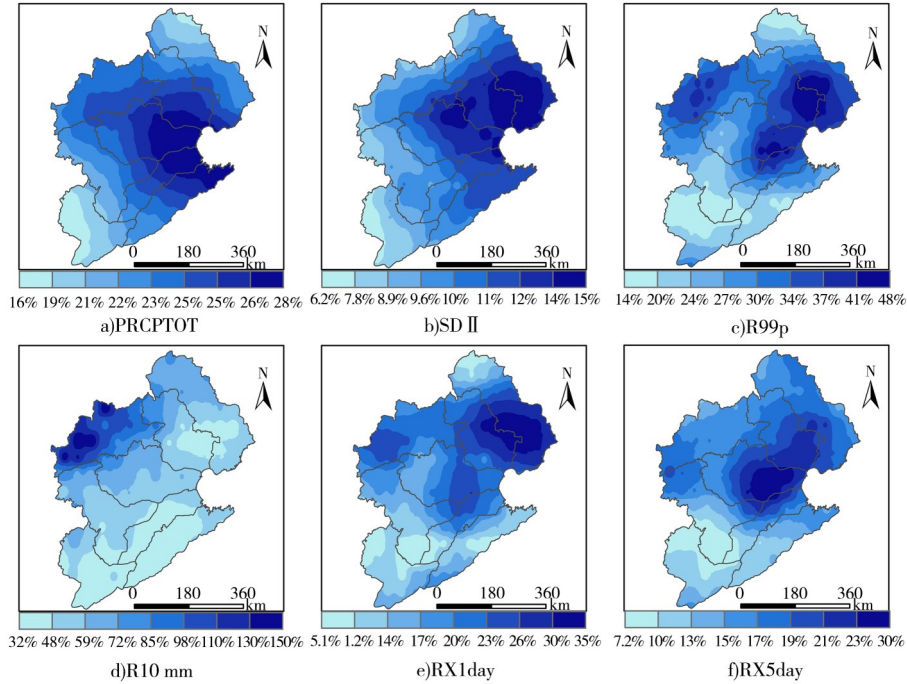


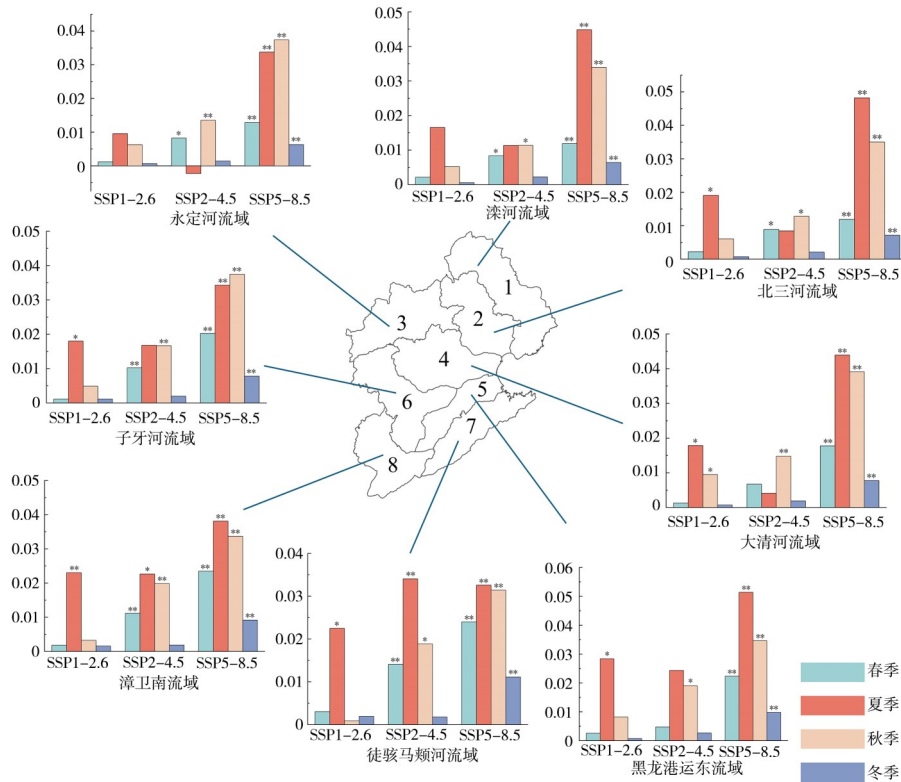
图 8 SSP5-8.5 情景下未来时期相对于历史时期极端降水指数空间变化分布

Fig. 8 Distribution of spatial variation of extreme precipitation index for future periods relative to historical periods under SSP5-8.5 scenario

2.5 未来RX1day与RX5day季节变化

在流域尺度上对比两极极端降水指数季节变化情况。从图9、10来看,SSP1-2.6情景中,RX1day与RX5day在各流域夏季倾向率高于其他三季,但永定河流域与滦河流域夏季无显著增加趋势;SSP2-4.5情景中,RX1day在各流域秋季显著增加,且夏秋两季增长率相近,永定河流域夏季呈不显著下降趋势;RX5day春季除滦河流域与黑龙港运东流域外,其余6个流域呈显著增加趋势;永定河流域、北三河

流域和大清河流域夏季呈现减小趋势。SSP5-8.5情景中,RX1day在各流域四季均呈现显著增加趋势,其中永定河流域、子牙河流域秋季极端降水指数倾向率高于其他三季,其余6个流域夏季极端降水指数倾向率高于其他季节;RX5day在滦河流域夏秋冬三季呈现不显著增长趋势,其中永定河流域、滦河流域、大清河流域秋季极端降水指数倾向率高于其他三季,其余各流域夏季极端降水指数倾向率高于其他季节且呈现显著增加趋势。



注: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; 纵坐标为趋势系数,下同。

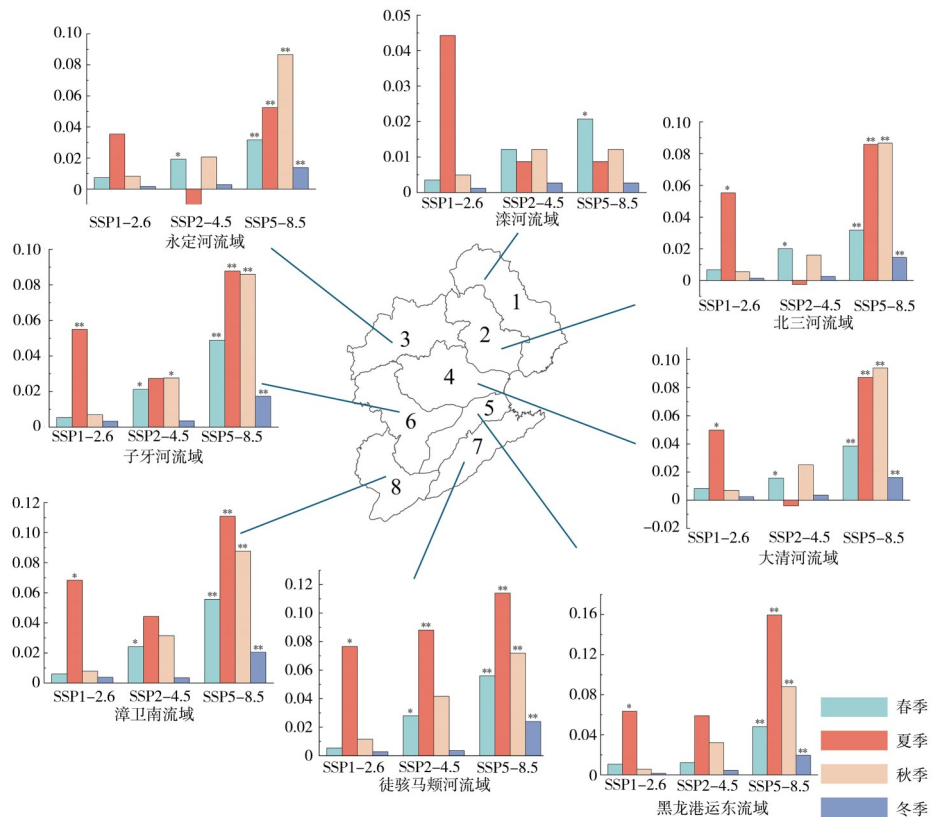
图9 不同情景下未来时期RX1day季节变化趋势

Fig. 9 Seasonal trends in RX1day for future periods under different scenarios

3 讨论

通过对海河流域极端降水时空变化趋势进行分析得出,历史时期极端降水指数呈现出西北低东南高的空间分布格局,这与海河流域地形及气候因素相关,流域西部和北部为太行山、燕山山脉的背风坡,地形抬升效应较弱,导致降水较少;东部沿海及南部平原区受季风环流主导,暖湿气流沿地形抬升形成充沛降水,这与陈宏等^[27]研究结果一致,平原降水频次大于山区,山前多于山上。在未来

不同情景下,除SSP1-2.6情景中RX1day出现负增长,其余指数呈正增长,并且极端降水指数随着排放升高变化更为显著,指数上升的面积占比随着时间不断扩大,增长率较大的区域分布在西南部与西北部,这与王洁等^[28]研究结果相近,未来增长率较大的区域分布在西部、西南部与东北部部分区域。其中R10 mm在西北部增长趋势明显,降水也更为集中。从空间分布情况可以看出,在大清河流域、永定河流域将面临较大的暴雨洪水风险。



注: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

图 10 不同情景下未来时期 RX5day 季节变化趋势

Fig. 10 Seasonal variation trends in RX5day for future periods under different scenarios

进一步对各子流域季节变化进行分析得出,不同情境下极端降水的“季节锁定”效应加剧,可能显著增加流域西部与中部子流域的夏秋季暴雨洪涝风险,这与郝立生等^[12]研究的海河流域季节降雨情况相一致。但永定河流域与滦河流域出现负增长,这与王庆明等^[29]研究结果略有不同,由于永定河流域位于南水北调中线工程的受水区,受到调水影响,永定河流域夏季降水情况可能有所变化。

本文研究了海河流域未来不同情境下极端降水指数变化,揭示了极端降水时间与空间的变化趋势。根据分析,在未来极端降水事件增加的背景下,需提前采取有效措施来应对突发事件,如建立更加弹性的水资源调度体系、完善跨区域联合抗洪调度机制、提高流域生态调控能力等,以保障区域发展的可持续性与生态系统的健康运行。然而,本文模式数量选取有限,可能增加区域预估的不确定性,后续研究中,可以引入多源观测数据并采用更

复杂的偏差矫正方法,以提升模拟的准确性。

4 结论

本研究分析了历史时期(1980—2014年)与未来时期(2021—2100年)海河流域6个极端降水指数(PRCPTOT、SDII、R99p、R10 mm、RX1day和RX5day)的时空变化特征及其在不同排放情景下的未来演变趋势。

a)在历史时期(1980—2014年),PRCPTOT、R10 mm和RX5day呈显著上升趋势,其他指标虽有增加但未达显著水平,反映出区域极端降水事件在加剧。从空间分布来看,各极端降水指数由西北向东南逐渐递增,北部的永定河流域一带为低值区,东部北三河与南部漳卫南等流域为高值区,表明东南部区域的水文风险相对较高。

b)在未来时期(2021—2100年),随着温室气体排放强度的增加,极端降水指数表现出显著的情景

依赖性。其中,PRCPTOT与R99p在所有排放情景下均显著上升;SDII与R10 mm在高排放情景(SSP5-8.5)中上升最为明显,RX1day与RX5day亦在高排放情景下表现出更强烈的增长趋势。空间上,各指数的高值区范围明显扩大,尤其是R99p和R10 mm在东部和西北部的增长尤为剧烈,增幅达到37%和130%以上,表明极端强降水事件的频率和强度在未来将显著增加,极端气候风险不断加剧。

c)从季节尺度来看,RX1day与RX5day在夏季和秋季普遍呈现显著增长趋势,且夏秋两季增长率相近,在SSP5-8.5情境下RX1day夏秋两季倾向率达到0.04,RX5day两季倾向率达到0.08。这一变化可能导致暴雨洪涝灾害在夏秋两季发生频率增强,影响流域防洪安全。

参考文献:

- [1] 王蕾,张百超,石英,等. IPCC AR6报告关于气候变化影响和风险主要结论的解读[J]. 气候变化研究进展,2022,18(4):389-394.
- [2] MYHRE G, ALTERSKJÆR K, STJERN C W, et al. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1). DOI: 10.1038/s41598-019-52277-4.
- [3] 伊博乐,秦福莹,包玉海,等. 近55年内蒙古降水集中度和集中期时空变化特征[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2021,37(3):18-22.
- [4] 龚晓,戴长雷,李树岭,等. 近60a嫩江流域极端气候指数时空分布特征及未来趋势分析[J]. 人民珠江,2025,46(7):61-73.
- [5] LI S, CHEN Y N, WEI W, et al. The increase in extreme precipitation and its proportion over global land[J]. Journal of Hydrology,2024,628. DOI:10.1016/j.jhydrol.2023.130456.
- [6] TAN X Z, WU X X, LIU B J. Global changes in the spatial extents of precipitation extremes[J]. Environmental Research Letters,2021,16(5). DOI:10.1088/1748-9326/abf462.
- [7] 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.
- [8] 符娇兰,马学款,陈涛,等. “16·7”华北极端强降水特征及天气学成因分析[J]. 气象,2017,43(5):528-539.
- [9] 王振亚,姚成,董俊玲,等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):17-22.
- [10] 李致家,张心愿,白云鹏,等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):13-19,92.
- [11] 王莉红,黄泓杰,崔胜辉,等. 河南省“7·20”洪水灾害时空动态分析[J]. 灾害学,2022,37(3):205-211.
- [12] 郝立生,何丽焯,程善俊,等. 海河流域雨季气候特征及监测分析[J]. 地理科学进展,2021,40(7):1181-1194.
- [13] 吴高鹏,赵强,王璇,等. 海河流域1961—2020年极端气候变化及其与大气环流关系[J]. 水资源与水工程学报,2024,35(3):100-110.
- [14] 王婧雯,冉佳琳,吴伟,等. 人类活动与气候变化对海河流域径流影响的尺度效应[J]. 生态与农村环境学报,2024,40(6):757-765.
- [15] TAN L L, QI J Y, MAREK G W, et al. Assessing the impacts of extreme precipitation projections on Haihe Basin hydrology using an enhanced SWAT model[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies,2025,58. DOI:10.1016/j.ejrh.2025.102235.
- [16] 王芳,张晋韬.《巴黎协定》排放情景下中亚地区降水变化响应[J]. 地理学报,2020,75(1):25-40.
- [17] TIAN J X, ZHANG Z X, AHMED Z, et al. Projections of precipitation over China based on CMIP6 models[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35: 831-848.
- [18] 邹磊,夏军,张印,等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. 水资源保护,2021,37(1):53-60.
- [19] 邵月红,刘玲,刘俊杰,等. 海河流域近60a降水极值的频率分析及时空分布特征[J]. 大气科学学报,2020,43(2):381-391.
- [20] 马梦阳,赵勇,王庆明,等. 海河流域不同等级降水对水资源衰减影响研究[J]. 中国农村水利水电,2023(7):55-62.
- [21] 姚世博,姜大膀,范广洲. 中国降水的季节性[J]. 大气科学,2017,41(6):1191-1203.
- [22] 杨柳,赵俊虎,毛明策,等. CMIP6模式对中国北方季风区盛夏降水的模拟能力评估[J]. 气候与环境研究,2024,29(5):549-562.
- [23] 唐明秀,孙劭,朱秀芳,等. 基于CMIP6的中国未来暴雨危险性变化评估[J]. 地球科学进展,2022,37(5):519-534.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 董伯钢,于洋. 近60年山西省极端降水时空变化特征[J]. 水土保持学报,2022,36(1):135-141.
- [27] 陈宏,杨洋,张楠,等. 2010—2019年海河流域暖季极端小时降水特征分析[J]. 气象与环境科学,2024,47(4):23-31.
- [28] 王洁,蒿萌,葛慧,等. 基于CMIP6模式数据的京津冀山区未来极端降水频率的变化[J]. 灾害学,2024,39(2):92-98.
- [29] 王庆明,张越,邓皓东,等. 2013年以来海河流域降水增多成因剖析[J]. 水科学进展,2025,36(2):296-306

(责任编辑:程 茜)