

基于 CMIP6 的中国内陆干旱区降水和气温 评估与预测

李 鑫¹, 方国华¹, 邓铭江²

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 旱区水工程生态环境全国重点实验室)

摘要:以中国典型内陆干旱区新疆为研究区域,采用经验分位数映射法,对 CMIP6 中 30 个全球气候模型输出的降水和气温进行偏差校正,全面评估其在新疆的适用性,并基于欧氏距离选择最优多模型集合,对未来不同排放情景下的降水和气温进行预测。结果表明:新疆未来暖湿化特征明显,对比基准期 1995—2014 年,到 2100 年,在 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下,年降水量将分别增加 15% (21 mm)、23% (33 mm)、25% (36 mm) 和 48% (69 mm),气温将分别升高 2.3、3.6、5.3、6.7℃;哈密市、巴音郭楞蒙古自治州及和田地区南部降水量变化最大,降水增加有望缓解塔里木河下游的生态补水压力;塔城地区、阿勒泰地区、乌鲁木齐市和昌吉回族自治州交界区域以及吐鲁番市、巴音郭楞蒙古自治州、和田地区和喀什地区大部分区域为气温升高的高值区,远期 (2076—2100 年)最高升温可达 7.6℃;未来气温升高将导致吐鲁番市、巴音郭楞蒙古自治州、和田地区沙漠化加剧,部分地区土地盐碱化加重、耕地退化。

关键词:CMIP6; 全球气候模型; 偏差校正; 降水量; 气温; 内陆干旱区; 新疆

Assessment and prediction of precipitation and temperature in inland arid regions of China based on CMIP6//Li Xin¹, Fang Guohua¹, Deng Mingjiang² (1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University; 2. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area)

Abstract: Taking Xinjiang, a typical inland arid region of China, as the study area, this study applied the empirical quantile mapping method to correct the biases of precipitation and temperature outputs from 30 CMIP6 global climate models, comprehensively evaluated their applicability in Xinjiang, and selected an optimal multi-model ensemble to predict future precipitation and temperature under different emission scenarios. The results show that Xinjiang will experience a significant warming and humidification trend in the future. Compared to the baseline period of 1995-2014, by 2100 under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5 scenarios, annual precipitation is projected to increase by 15% (21 mm), 23% (33 mm), 25% (36 mm), and 48% (69 mm), respectively, and annual mean temperature is projected to rise by 2.3℃, 3.6℃, 5.3℃, and 6.7℃. The largest precipitation changes are expected in Hami City, Bayingolin Mongolian Autonomous Prefecture, and the southern part of Hotan Prefecture, and the increased precipitation may help alleviate ecological water replenishment pressure in the lower reaches of the Tarim River. High temperature increase zones include the border areas of Tacheng Prefecture, Altay Prefecture, Urumqi City, and Changji Hui Autonomous Prefecture, as well as most areas of Turpan City, Bayingolin Mongolian Autonomous Prefecture, Hotan Prefecture, and Kashgar Prefecture, and the maximum temperature rise could reach 7.6℃ in the far future (2076-2100). The future temperature rise will lead to exacerbated desertification in Turpan City, Bayingolin Mongolian Autonomous Prefecture, and Hotan Prefecture, and intensify soil salinization and alkalization and farmland degradation in some areas.

Key words: CMIP6; global climate models; bias correction; precipitation; temperature; inland arid regions; Xinjiang

全球气候变化显著改变了天气和气候的极端情况^[1]。降水和气温作为反映气候变化对水文循环影响的关键气候变量,被广泛应用于自然和社会灾

害风险评估^[2-3]。气温变化通过影响蒸发、降水、水汽输送等关键过程,深刻改变了全球水循环的速率、强度与分布格局;降水作为水循环的核心驱动力之

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240201036)

作者简介:李鑫(1995—),女,助理研究员,博士,主要从事水利规划与水文模拟研究。E-mail:xin_li@hhu.edu.cn

通信作者:方国华(1964—),女,教授,博士,主要从事水利水电系统规划与优化调度及水资源管理与保护研究。E-mail:hhuafh@163.com

一,不仅直接决定着水资源的时空分布,也与气温、蒸发、径流等过程紧密耦合,共同调控水文系统的动态平衡^[4-6]。2009—2019年是有记录以来的最暖年份,其间高温和极端降水事件的频率和严重程度以前所未有的速度增加。政府间气候变化专门委员会第六次评估报告(IPCC AR6)^[7]指出,全球变暖可能进一步加剧降水和气温的变化,对人类福祉、社会经济发展和生态系统可持续性造成日益严重的影响。在此背景下,国内外学者广泛开展气候预测模型研究,科学评估自然变化和人类活动对气候的影响,预测未来气候变化趋势,为应对和减缓潜在风险提供科学依据。然而,当前气候预测仍存在较大不确定性,这主要源于气候系统内部变率、温室气体排放情景^[8]以及全球气候模型(global climate models, GCMs)^[9-10]对复杂过程的模拟能力和评估策略^[11-13]等。

国际耦合模式比较计划(CMIP)旨在通过考虑上述不确定性来提高对过去、现在和未来气候的理解。第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)是最新一轮的国际多模式研究活动^[14-15],与CMIP5相比,CMIP6 GCMs具有更高的空间分辨率和更复杂的物理过程。除了未来可能存在的不同温室气体排放情况外,CMIP6设计的排放情景还考虑了共享社会经济路径,这使得未来的情景设定更加合理,同时能够体现应对气候变化政策中的不确定性^[16]。当前国内外学者针对CMIP6模拟结果开展了较多研究,探讨了全球不同地区未来气候变化情况^[17-22]。例如,Yue等^[23]基于CMIP6 GCMs评估了长江流域未来降水、最高气温和最低气温的变化情况,得出在SSP5-8.5情景下,2025—2100年流域年降水量预计将以每10 a约21.01 mm的速度增加,2081—2100年最高气温和最低气温预计分别上升5.0℃和4.9℃。由于模型存在分辨率较低等固有的系统偏差,常采用偏差校正技术对模型输出结果进行订正^[24-27]。

为了进一步降低模型模拟的不确定性,多模型集合(multi-model ensemble, MME)策略得到了广泛应用^[28]。通过选择一组模拟精度较高的GCMs构建MME,可以有效提高气候预测的稳健性^[29]。由于不同模型对气候系统的模拟各有优劣,同时模型之间可能存在相似结构或依赖相同数据,导致“模型依赖”问题,MME中的模型数量也会对模拟精度产生一定影响,通常选择3~15个模型组成MME^[30-32]。此外,GCMs对不同区域气候特征的模拟能力可能存在显著差异,因此在评估未来气候变化时,应优先选择模拟结果更符合区域真实气候的模型,以减少不确定性^[33]。

新疆是我国典型的内陆干旱区,面临着土地荒

漠化严重、绿洲边界不稳定、生物多样性受到威胁等问题,生态系统极其脆弱,对全球气候变化响应尤为敏感,更容易遭受干旱、高温等极端气候事件的影响甚至破坏^[34-35]。近年来,新疆极端降水、高温热浪等极端气候事件频发,影响作物生长与畜牧养殖,破坏农田与设施,造成了严重的作物歉收、社会经济损失,加剧了水资源供需矛盾和生态系统破坏。2025年新疆年平均气温为9.8℃,较常年偏高1.1℃;春、夏、秋三季平均气温均高于常年,其中夏季的偏高幅度居历史首位。持续高温使融雪量增加,叠加降雨,造成多地出现局地融雪型洪水及衍生地质灾害风险。

对于新疆极端气候事件的研究已有一些成果^[36-39],如鄯晓丹等^[36]基于气候变化检测和指数专家组(ETCCDI)定义的27个极端气候指数,分析了1982—2020年新疆极端气候事件的时空演变特征。研究指出,新疆大部分地区高温指数和极端降水指数呈上升趋势,未来仍将持续增加。然而,当前大多数研究仅从极端温度或极端降水方面探讨极端气候事件的变化趋势,针对未来新疆极端气候变化以及极端灾害事件风险的相关研究仍较少。本文以新疆为研究区域,基于CMIP6设计的情景模式,解析未来不同排放情景下降水和气温的时空变化特征,评估二者变化的不确定性,探讨新疆未来可能面临的极端灾害风险,以为新疆极端气候应对提供理论依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

新疆位于我国西北地区(34°25'N~49°10'N, 73°40'E~96°23'E),地处中纬度欧亚大陆腹地,面积约166万km²,是我国面积最大的省级行政区(图1),下辖14个地级行政区。新疆地形地貌复杂,从北向南依次为阿尔泰山、准噶尔盆地、天山、塔里木盆地、昆仑山,三山夹两盆的地形特点,加之深居内陆,导致其水汽来源受阻,降水稀少且蒸散发强,山区降水较多,水资源严重缺乏且分布不均,成为典型的大陆性干旱气候区和生态脆弱区。

1.2 数据来源

研究数据主要包括历史(1979—2014年)和未来(2015—2100年)的降水和气温数据,来源于中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD, <https://doi.org/10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file>)和CMIP6设计的情景模式,选择4种共享社会经济路径情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5),表示控制全球辐射强迫值在2100年分别达到2.6、4.5、7.0、8.5 W/m²。

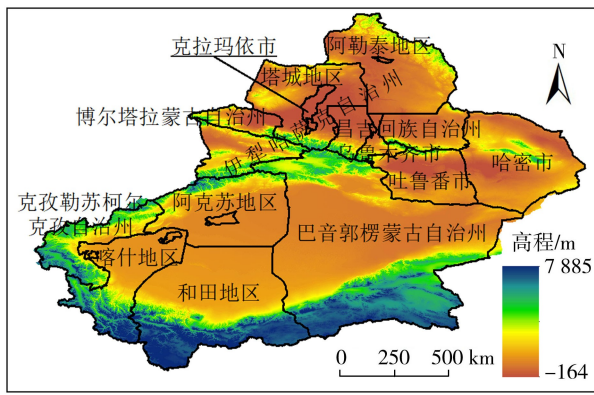


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

2 研究方法

2.1 经验分位数映射法

分位数映射法 (quantile mapping, QM) 是校正气候模式模拟偏差的常用方法。其基本原理是通过构建观测值和模拟值的经验累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF), 采用非参数转换建立传递函数, 将模拟值的 CDF 映射到观测值 CDF 对应的分位数上, 从而对模拟值进行校正。目前, QM 法存在多种衍生方法, 其中, 经验分位数映射法 (empirical quantile mapping, EQM)^[40] 无需提前假设数据的理论分布, 遵循观测和模拟数据的经验分布, 用于数据校正时, 更具灵活性和稳健性, 能有效避免因参数估计误差带来的校正偏差, 因而得到广泛应用。

EQM 的基本假设为气象要素的分布不随时间发生较大变化, 即只有分布的均值变化, 分布的方差和偏度保持稳定。本文采用 EQM 对 CMIP6 GCMs 输出的降水和气温要素进行偏差校正。研究过程中采用局部线性最小二乘回归法, 通过常间隔分位数确定 CMFD 与模拟值序列分位数之间的对应关系, 并且在偏差校正过程中保证 CMFD 有雨日与 CMIP6 GCMs 模拟的有雨日天数一致。分位数间隔取值范围为 0~1, 本文取 0.1; 模拟值局部回归拟合的数据点个数取 10; 对应分位数转换采用线性插值法, 抽样次数取 10。

2.2 欧氏距离

欧氏距离 (Euclidean distance, ED) 用来衡量多维空间中两点之间的绝对距离, 被广泛应用于大气科学研究^[41]。本文采用 ED 衡量 CMFD 与 CMIP6 GCMs 模拟值之间的相似性。ED 取值范围为 (0, ∞), 越接近于 0, 表明模型模拟效果越好。采用 8 个归一化统计指标组成模拟值向量 S_{sim} , 对应的理想向量为 $S_0 = (1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0)$ 。ED 计算公

式为:

$$D = \|S_{sim} - S_0\| / \sqrt{N} \quad (1)$$

其中 $S_{sim} = (r_t, E_{NRMSE,t}, D_{NS,t}, E_{MAP,t}, r_s, E_{NRMSE,s}, D_{NS,s}, E_{MAP,s})$

式中: D 为 ED 值; N 为评价指标向量中的指标总数, 本文中 $N=8$; r 为皮尔逊相关系数; $E_{NRMSE,t}$ 、 $D_{NS,t}$ 、 $E_{MAP,t}$ 分别为归一化均方根误差 (NRMSE)、归一化标准差 (NSD) 和归一化平均绝对误差百分比 (MAPE); 下标 t 表示时间尺度评价指标; 下标 s 表示空间尺度评价指标。

2.3 最优 MME 确定

为保证分析过程中数据的可获取性和完整性, 需要对 CMIP6 GCMs 进行初选。除了历史情景下的模拟输出结果, 同一模型还需具有 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下的模拟输出结果。最优 MME 确定的具体步骤为: ①通过初步筛选, 得到 30 个具有完整历史和未来不同排放情景下降水和气温数据的 CMIP6 GCMs; 采用双线性插值法对各模型输出的降水和气温进行插值, 将空间分辨率不同的 30 个 CMIP6 GCMs 统一降尺度到 $1^\circ \times 1^\circ$ 。②以 CMFD 作为参考值, 采用 EQM 对 30 个 CMIP6 GCMs 的降水和气温模拟结果进行偏差校正, 以提高模拟结果的可靠性。③通过对 CMIP6 GCMs 的历史情景输出结果进行综合评价, 确定对降水和气温模拟效果最优的 CMIP6 GCMs, 构建最优 MME (以下简称“BMME”), 并进一步基于 BMME 的均值, 解析未来不同排放情景下新疆气象要素及其变化特征。

2.4 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall (M-K) 趋势检验是由 Mann 和 Kendall 提出的一种非参数统计检验方法, 通常与 Theil-Sen 斜率估计方法相结合^[42-46], 广泛应用于水文气象要素的变化趋势检验和显著性检验。本文采用 M-K 趋势检验解析新疆降水和气温的变化趋势, 通过双边检验确定 M-K 趋势的显著性, 并以 66% 作为评价准则确定 M-K 趋势的鲁棒性, 即若 BMME 中超过 66% 的模型 M-K 趋势值符号一致, 则表示趋势具有鲁棒性。

3 结果与分析

3.1 CMIP6 GCMs 优选

由 30 个 CMIP6 GCMs 构成的 MME 均值在偏差校正前后的模拟精度评价结果见表 1, 偏差校正后, MME 均值模拟精度评价指标 NRMSE 更趋近于 0, KGE 更趋近于 1, 说明偏差校正显著提高了 MME 均值在时间和空间尺度上对降水和气温的模拟精度。通过计算各模型的 ED 值并排序发现, 第 13 个模型

的 ED 值陡增。因此,分别选择降水和气温模拟效果最优的前 12 个模型组成 BMME,其 ED 值统计结果见表 2。偏差校正后,MME 均值模拟降水和温度的 ED 值分别为 1.33 和 0.37;BMME 均值模拟降水和气温的 ED 值分别为 0.87 和 0.26。与 MME 均值相比,BMME 均值对降水和气温的模拟精度显著提高,且优于单个 CMIP6 GCMs。

表 1 偏差校正前后 MME 均值模拟精度评价结果

Table 1 Simulation accuracy evaluation results of MME mean before and after bias correction

因素	尺度	NRMSE		KGE	
		校正前	校正后	校正前	校正后
降水	时间	0.31	0.20	-0.50	0.19
	空间	0.36	0.0009	-0.70	0.99
气温	时间	0.05	0.04	0.86	0.99
	空间	0.22	0.55×10^{-5}	0.26	0.99

注:KGE 为克林-古普塔效率系数。

表 2 前 12 个 CMIP6 GCMs 偏差校正后的 ED 值

Table 2 ED values of twelve top-ranked CMIP6 GCMs after bias correction

序号	降水		气温	
	模型	ED 值	模型	ED 值
1	GISS-E2-2-H	0.91	ACCESS-ESM1-5	0.36
2	INM-CM4-8	1.03	INM-CM4-8	0.36
3	CESM2-WACCM-FV2	1.04	MCM-UA-1-0	0.37
4	GISS-E2-1-H	1.06	CAS-ESM2-0	0.40
5	CESM2-FV2	1.06	CESM2	0.44
6	FIO-ESM-2-0	1.13	CESM2-WACCM	0.45
7	CanESM5	1.16	GFDL-ESM4	0.46
8	MCM-UA-1-0	1.17	CESM2-WACCM-FV2	0.47
9	NorCPM1	1.17	NorCPM1	0.48
10	CMCC-CM2-SR5	1.20	TaiESM1	0.48
11	CESM2	1.21	CAMS-CSM1-0	0.50
12	E3SM-1-1	1.21	CMCC-CM2-SR5	0.50

对于降水模拟,偏差校正前各模型模拟结果与 CMFD 的相关系数(r)多为 0.1~0.6,中心均方根误差(CRMSE)为 0.8~1.2。偏差校正后在时间尺度上的改进效果显著,校正后 r 和 NSD 均接近于 1,CRMSE 接近于 0;在空间尺度上 r 和 CRMSE 改进效果不明显,而 NSD 更接近于 1。对于气温模拟,偏差校正后在时间和空间尺度上的改进效果均较稳定。此外,对于降水和气温,BMME 均值的模拟效果优于单个 CMIP6 GCMs 和 MME 均值。因此,本文采用偏差校正后的 BMME 均值模拟降水和气温,分析未来不同排放情景下新疆降水和气温变化。

3.2 未来不同排放情景下降水和气温的变化趋势

3.2.1 总体趋势

在不同排放情景下,2015—2100 年新疆年降水和年平均气温 M-K 趋势空间分布见图 2、图 3,趋势统计值见表 3。图 2、图 3 中所有格点的 M-K 趋势

均通过显著性水平为 0.05 的双边检验,同时具备鲁棒性。结果表明,不同排放情景下新疆未来年降水、年平均气温均呈显著正趋势,即年降水量显著增加,年平均气温显著升高,暖湿化特征明显。从空间分布上看,降水增多高值区与气温升高高值区契合度较高,在南疆降水和气温的变化趋势与海拔呈正相关关系。

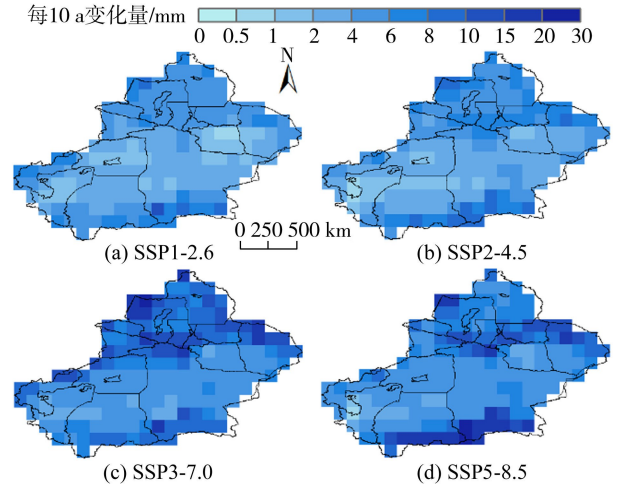


图 2 2015—2100 年不同排放情景下年降水量变化趋势空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of variation trends in annual precipitation under different emission scenarios during 2015-2100

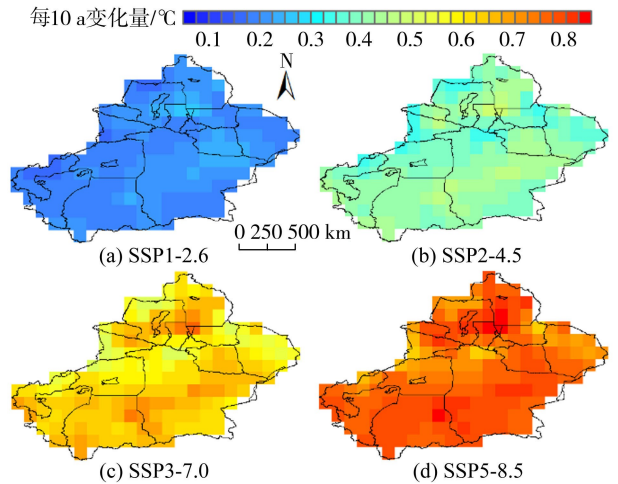


图 3 2015—2100 年不同排放情景下年平均气温变化趋势空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of variation trends in annual mean temperature under different emission scenarios during 2015-2100

在 SSP3-7.0 情景下,新疆年降水量变化趋势值最大,Theil-Sen 斜率为 0.517 mm/a。巴音郭楞蒙古自治州和和田地区南部,以及塔城地区、克拉玛依市、石河子市、乌鲁木齐市、阿勒泰地区、昌吉回族自治州和哈密市北部降水增多趋势较新疆中部地区更

表 3 1979—2100 年不同排放情景下年降水量和年平均气温变化的趋势值

Table 3 Trend values of annual precipitation and annual mean temperature variations during 1979-2100 under different emission scenarios

情景	降水趋势值		气温趋势值	
	Z	Theil-Sen 斜率/ (mm/a)	Z	Theil-Sen 斜率/ (°C/a)
历史时期	3.72	0.395	7.07	0.052
SSP1-2.6	5.76	0.230	9.81	0.015
SSP2-4.5	5.54	0.272	12.23	0.035
SSP3-7.0	8.02	0.517	12.65	0.056
SSP5-8.5	8.00	0.466	12.89	0.072

注:Z 为标准化的检验统计量。

强,其中,巴音郭楞蒙古自治州南部和北部、塔城地区西北部、石河子市南部以及乌鲁木齐市和哈密市北部变化趋势值最大。

对于年平均气温,随着温室气体排放量的增加,气温升高幅度增大。在 SSP5-8.5 情景下,新疆年平均气温呈每 10 a 升高 0.72°C 的变化趋势,意味着若不断加强减排措施,到 21 世纪中叶新疆平均累计升温可能超过 3°C。新疆地区气温升高没有表现出显著的区域差异。总体来看,南疆以及阿勒泰地区南部、乌鲁木齐市北部、昌吉回族自治州北部、塔城地区南部、克拉玛依市等地气温升高趋势值较大。

3.2.2 降水和气温变化趋势的空间分布特征

基于偏差校正后 BMME 均值的未来预测值与历史模拟值,确定降水和气温的潜在变化量。其中,降水变化量采用百分比表示,气温变化量以绝对值表示。为保证与 IPCC AR6 报告相一致,以 1995—2014 年作为基准期,分别选择 2026—2050 年、2051—2075 年、2076—2100 年作为近期、中期、远期进行阶段性分析。远期不同排放情景下新疆年降水变化量空间分布见图 4,年平均气温变化量空间分布见图 5。结果表明,新疆远期降水量增加可达 3.1%~93.6%,且新疆南部和东部地区降水增加量大于西部地区,其中,哈密市、巴音郭楞蒙古自治州以及和田地区南部变化量最大,极大值位于巴音郭楞蒙古自治州中部,涉及大西海子水库和车尔臣河流域,降水增加有望缓解塔里木河下游生态补水压力。

各个时期不同排放情景下,新疆年平均气温升高均表现为全域性,随着时间的推移和温室气体排放量的增加,地区年平均气温的变化量不断增加。塔城地区、阿勒泰地区、乌鲁木齐市和昌吉回族自治州交界区域以及吐鲁番市、巴音郭楞蒙古自治州、和田地区和喀什地区大部分区域为气温升高的高值区。远期 SSP5-8.5 情景下,新疆各地区年平均气温

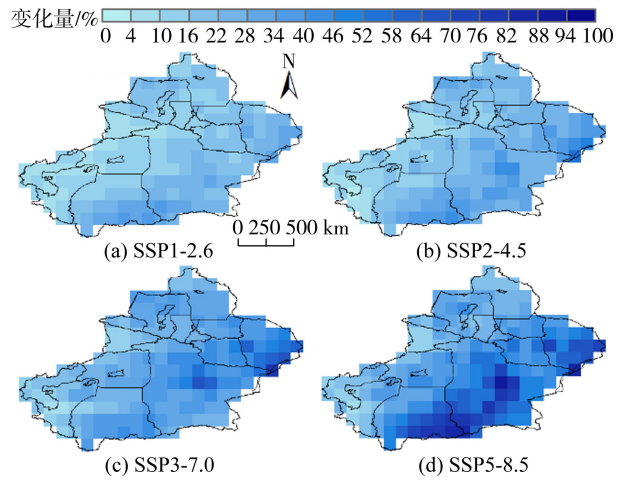


图 4 远期不同排放情景下年降水变化量空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of annual precipitation change under different emission scenarios in far future

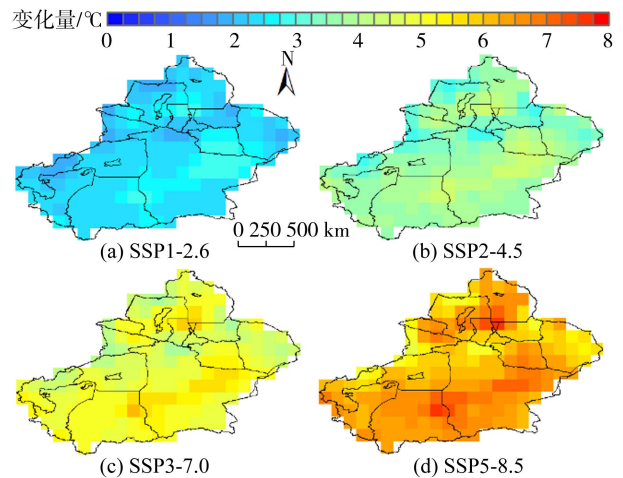


图 5 远期不同排放情景下年平均气温变化量空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of annual mean temperature change under different emission scenarios in far future

升高均大于 4.5°C,最高可达 7.6°C。一方面,气温持续升高将导致蒸发量进一步增加,生态用水压力倍增,水资源供需矛盾加剧;另一方面,高温胁迫将影响各地区作物种植品质和产量,甚至造成热害、病虫害,作物种植面临高温和水资源双重挑战。尤其是本就高温干旱的吐鲁番市、巴音郭楞蒙古自治州及和田地区,高温将导致沙漠化加剧,部分地区土地盐碱化加重、耕地退化。

3.2.3 降水和气温变化趋势的时间演变过程

图 6 为历史和未来不同排放情景下,新疆年降水量和年平均气温变化的时间演变过程,图中不同颜色的阴影部分表示对应情景下 BMME 模拟结果的标准差范围。分析可知,在不同排放情景下,2015—2100 年新疆均呈暖湿化趋势,但降水和气温的变化量存在差异,随着时间的推移,变化的不确定性显著增加。以 1995—2014 年为基准期,在 SSP1-

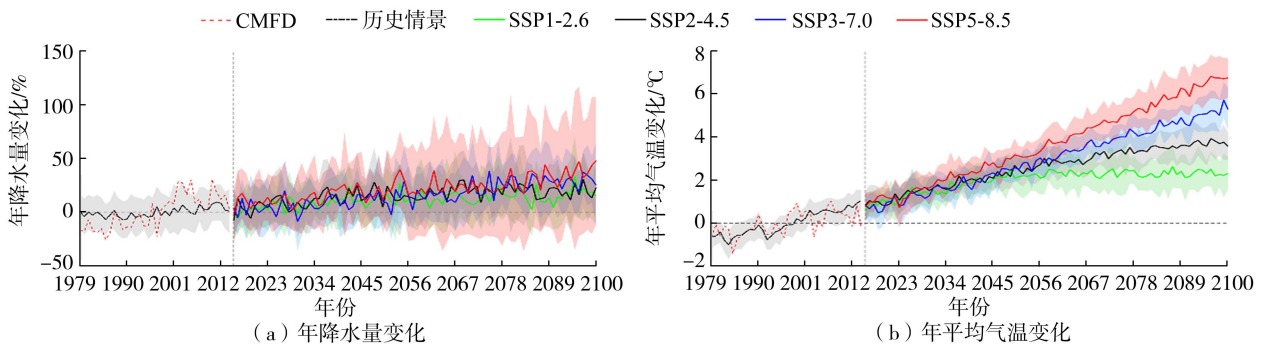


图 6 历史和未来不同排放情景下年降水量与年平均气温变化

Fig. 6 Annual precipitation and annual mean temperature changes for historical period and future projections under different emission scenarios

2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下, 2015—2100 年新疆年降水量变化分别为 -4.4%~15.1%、-7.8%~23.1%、-8.7%~38.7% 和 -3.3%~48.0%, 到 2100 年, 年降水量将分别增加 15% (21 mm)、23% (33 mm)、25% (36 mm) 和 48% (69 mm)。在 SSP5-8.5 情景下, 近期、中期、远期年降水量变化均最大, 分别为 23.0%、39.9% 和 48.0%。新疆地处干旱区, 降水稀少, 大部分地区年降水量仅为 50~200 mm, 水资源主要依赖高山融雪和有限降水。降水增加在一定程度上有利于缓解干旱, 减轻生态农业用水压力, 改善土壤墒情, 促进植被恢复, 抑制沙尘暴和改善局部生态环境, 而山区降水过多可能引发山洪和滑坡, 影响棉花、瓜果等作物品质, 对人民生命财产安全和社会经济发展造成严重影响。

对于年平均气温变化, 2050 年前不同排放情景下的差别不大, 2050 年后差别逐渐增大。其中, 在 SSP1-2.6 和 SSP2-4.5 情景下, 气温变化在 2058 年和 2083 年分别达到 2.49、3.59℃, 随后波动变化, 且无明显升高, 而在 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下气温持续升高。到 2100 年, 在 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下, 年平均气温将分别上升 2.31、3.56、5.28 和 6.74℃。值得关注的是, 在 SSP5-8.5 情景下, 2032 年气温升高将超过 2℃,

随后以每 10 a 上升 0.69℃ 的速率持续升高。根据已有研究, 新疆气候变化速率明显快于全球平均水平, 当前部分地区气温较 1850—1900 年工业前水平升高 1.8~2.0℃。未来持续高速升温将给新疆的生态环境和社会经济发展带来极大影响与风险, 如加剧冰川退缩, 导致水资源短期增加但长期减少; 极端高温事件增多, 影响居民生活和生产活动; 荒漠化风险上升, 绿洲生态系统压力加大等。因此, 亟须加强生态系统保护与修复, 积极推进减排措施, 加强气候变化监测与应对。

3.3 未来不同排放情景下降水和气温变化的不确定性

为了进一步解析气候预测中的不确定性, 绘制不同排放情景下未来不同时期预测结果和年内变化的箱线图(图 7)。结果表明, 在 4 种排放情景下, 预测的降水量和气温不确定性总体上随时间推移而增加, SSP5-8.5 情景下不确定性最大。对于年内变化, 降水量增加主要集中在 3—5 月, 意味着未来在 3—5 月出现强降雨的可能性更大, 在一定程度上可能缓解新疆以及乌鲁木齐市和昌吉回族自治州等部分地区的冬春旱, 但山区突发暴雨导致山洪、泥石流的风险增大。

预测结果也表明, 不同排放情景下, 夏季(7 月和 8 月)气温上升幅度更大, 且月尺度下预测的气

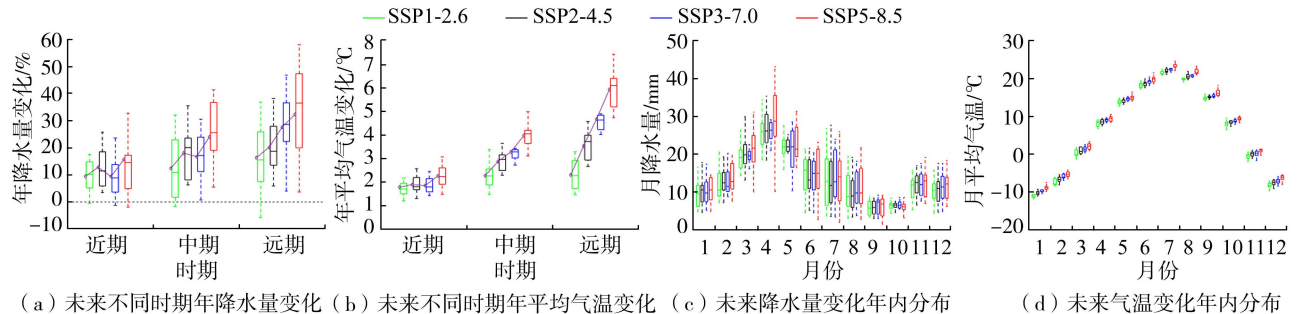


图 7 未来不同排放情景下降水与平均气温变化箱线图

Fig. 7 Box plots for projected changes in precipitation and mean temperature under different emission scenarios

温不确定性范围相对较小,这表明未来夏季气温更高,且可能出现异常持续高温年份,造成高温热浪和干旱事件增多。总的来看,新疆降水和气温分布在明显的空间差异和气候特征,南疆和吐鲁番盆地等是气温高值区,也是降水低值区,而北疆气温相对较低、降水较多。降水和气温变化的不确定性,特别是在月尺度下的不确定性,可能会增大极端天气和气候事件发生的概率和强度,在不同地区造成不同程度的影响,后续可考虑分地区深入剖析气象要素变化的不确定性,预测未来极端气候事件。

4 结 论

a. 新疆未来暖湿化特征明显,降水增多高值区与气温升高高值区契合度较高,在南疆降水和气温的变化趋势与海拔呈正相关关系。巴音郭楞蒙古自治州南部和北部、塔城地区西北部、石河子市南部以及乌鲁木齐市和哈密市北部降水变化趋势值最大,南疆以及阿勒泰地区南部、乌鲁木齐市北部、昌吉回族自治州北部、塔城地区南部、克拉玛依市等地为气温升高趋势的高值区。若不加强减排措施,在SSP5-8.5情景下,21世纪中叶新疆平均累计升温可能超过3℃。

b. 新疆南部和东部地区降水增加量大于西部地区,远期哈密市、巴音郭楞蒙古自治州以及和田地区南部变化量最大,降水增加有望缓解塔里木河下游生态补水压力。然而新疆各地区在未来不同时期和排放情景下均表现出显著的气温升高,远期最高升温可达7.6℃,将对新疆水资源供需、生态环境和经济社会发展带来极大挑战。特别是对于吐鲁番市、巴音郭楞蒙古自治州及和田地区,气温升高将导致沙漠化加剧,部分地区土地盐碱化加重、耕地退化。

c. SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下,到21世纪末新疆年降水量将分别增加15%(21 mm)、23%(33 mm)、25%(36 mm)和48%(69 mm),对于年降水量仅为50~200 mm的大部分地区,在一定程度上有利于缓解干旱。2050年前不同排放情景下年平均气温变化的差别不大,2050年后逐渐增大。在SSP5-8.5情景下,新疆年平均气温增幅将于2032年超过2℃,随后以远超全球平均水平的速度持续上升。

d. 随着时间的推移和温室气体排放量的增加,降水和气温变化的不确定性总体上不断增加。未来新疆降水量增加主要集中在3—5月,且出现强降雨的可能性更大,在一定程度上可能缓解南疆以及乌鲁木齐市和昌吉回族自治州等部分地区的冬春旱,但

山区突发暴雨将导致山洪、泥石流的风险增大。7月和8月气温升高幅度更大,但其不确定性范围相对较小,将导致未来高温热浪和干旱事件增多。

参考文献:

- [1] World Meteorological Organization. Water-related hazards dominate disasters in the past 50 years [R]. Geneva: WMO, 2021.
- [2] Almazroui M, Ashfaq M, Islam M N, et al. Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America [J]. Earth Systems and Environment, 2021, 5(2): 155-183.
- [3] Dosio A, Jury M W, Almazroui M, et al. Projected future daily characteristics of African precipitation based on global (CMIP5, CMIP6) and regional (CORDEX, CORDEX-CORE) climate models [J]. Climate Dynamics, 2021, 57(11/12): 3135-3158.
- [4] Hanasaki N, Fujimori S, Yamamoto T, et al. A global water scarcity assessment under shared socio-economic pathways, part 2: water availability and scarcity [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(7): 2393-2413.
- [5] Jach L, Schwitalla T, Branch O, et al. Sensitivity of land-atmosphere coupling strength to changing atmospheric temperature and moisture over Europe [J]. Earth System Dynamics, 2022, 13(1): 109-132.
- [6] Zhang Ke, Li Zhilin, Shi Wuzhi, et al. Spatiotemporal changes and interconnections between meteorological and hydrological droughts in China over past 34 years [J]. Water Science and Engineering, 2025, 18(3): 274-287.
- [7] IPCC. Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II, and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Geneva: IPCC, 2023: 35-115.
- [8] Nashwan M S, Shahid S. Future precipitation changes in Egypt under the 1.5 and 2.0°C global warming goals using CMIP6 multimodel ensemble [J]. Atmospheric Research, 2022, 265: 105908.
- [9] Bağçacı S Ç, Yucel I, Duzenli E, et al. Intercomparison of the expected change in the temperature and the precipitation retrieved from CMIP6 and CMIP5 climate projections: a Mediterranean hot spot case, Turkey [J]. Atmospheric Research, 2021, 256: 105576.
- [10] Gettelman A, Hannay C, Bacmeister J T, et al. High climate sensitivity in the community earth system model version 2 (CESM2) [J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(14): 8329-8337.
- [11] Kamworapan S, Bich Thao P T, Gheewala S H, et al. Evaluation of CMIP6 GCMs for simulations of temperature over Thailand and nearby areas in the early 21st century

- [J]. *Heliyon*, 2021, 7(11): e08263.
- [12] Ruan Yunfeng, Liu Zhaofei, Wang Rui, et al. Assessing the performance of CMIP5 GCMs for projection of future temperature change over the Lower Mekong Basin [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(2): 93.
- [13] 鞠琴, 马啸赞, 刘艳丽, 等. 基于秩评分方法的 CMIP6 全球气候模式对淮河流域降水和气温模拟能力评估 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(6): 12-20. (Ju Qin, Ma Xiaozan, Liu Yanli, et al. Evaluation for CMIP6 global climate models in simulating precipitation and temperature over the Huaihe River Basin based on rank score method [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(6): 12-20. (in Chinese)).
- [14] 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.
- [15] Eyring V, Cox P M, Flato G M, et al. Taking climate model evaluation to the next level [J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(2): 102-110.
- [16] 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.
- [17] Almazroui M, Saeed F, Saeed S, et al. Projected changes in climate extremes using CMIP6 simulations over SREX regions [J]. *Earth Systems and Environment*, 2021, 5(3): 481-497.
- [18] Li Xiao, Liu Yawen, Wang Minghuai, et al. Assessment of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) model performance in simulating the spatial-temporal variation of aerosol optical depth over Eastern Central China [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 261: 105747.
- [19] Qiu Zijian, Qiao Fangli, Jang C J, et al. Evaluation and projection of global marine heatwaves based on CMIP6 models [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2021, 194: 104998.
- [20] 武传号, 逯家宝, 周君, 等. 基于 CMIP6 多模式集合的中国洪水-热浪复合极端事件特征预测 [J]. *水资源保护*, 2025, 41(3): 20-30. (Wu Chuanhao, Lu Jiabao, Zhou Jun, et al. Characteristic projection of successive flood-heatwave extreme events in China based on CMIP6 multi-model ensembles [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(3): 20-30. (in Chinese)).
- [21] 王磊, 曾思栋, 阳林翰, 等. 基于 CMIP6 的气候变化下汉江流域气象干旱特征研究 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(5): 39-45. (Wang Lei, Zeng Sidong, Yang Linhan, et al. CMIP6-based meteorological drought characteristic study under climate change in the Hanjiang River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(5): 39-45. (in Chinese)).
- [22] 杨肖丽, 马慧君, 吴凡, 等. 基于 CMIP6 的全球及干旱带干旱时空演变 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 40-49. (Yang Xiaoli, Ma Huijun, Wu Fan, et al. Spatiotemporal evolution of global and arid zone drought based on CMIP6 [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 40-49. (in Chinese)).
- [23] Yue Yanlin, Yan Dan, Yue Qun, et al. Future changes in precipitation and temperature over the Yangtze River Basin in China based on CMIP6 GCMs [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 264: 105828.
- [24] Laux P, Rötter R P, Webber H, et al. To bias correct or not to bias correct? An agricultural impact modelers' perspective on regional climate model data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 304-305: 108406.
- [25] Gudmundsson L, Bremnes J B, Haugen J E, et al. Technical note: downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations: a comparison of methods [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(9): 3383-3390.
- [26] Rajulapati C R, Papalexiou S M, Clark M P, et al. The perils of regridding: examples using a global precipitation dataset [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2021, 60(11): 1561-1573.
- [27] 杨肖丽, 郑巍斐, 林长清, 等. 基于统计降尺度和 SPI 的黄河流域干旱预测 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(5): 377-383. (Yang Xiaoli, Zheng Weifei, Lin Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, 45(5): 377-383. (in Chinese)).
- [28] 鞠琴, 吴金雨, 王兴平, 等. 机器学习算法在降水和气温多模式集成中的应用 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 106-115. (Ju Qin, Wu Jinyu, Wang Xingping, et al. Application of machine learning algorithms in multimodal integration of precipitation and temperature [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 106-115. (in Chinese)).
- [29] Kim J, Ivanov V Y, Fatichi S. Climate change and uncertainty assessment over a hydroclimatic transect of Michigan [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2016, 30(3): 923-944.
- [30] Hussain M, Yusof K W, Mustafa M R U, et al. Evaluation of CMIP5 models for projection of future precipitation change in Bornean tropical rainforests [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 134(1/2): 423-440.
- [31] Khan N, Shahid S, Ismail T B, et al. Spatial distribution of unidirectional trends in temperature and temperature extremes in Pakistan [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 136(3/4): 899-913.

- [32] Xuan Weidong, Ma Chong, Kang Lili, et al. Evaluating historical simulations of CMIP5 GCMs for key climatic variables in Zhejiang Province, China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 128(1):207-222.
- [33] Ahmed K, Sachindra D A, Shahid S, et al. Selection of multi-model ensemble of general circulation models for the simulation of precipitation and maximum and minimum temperature based on spatial assessment metrics [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(11):4803-4824.
- [34] 尹德震, 李芳, 林中达. 中国生态脆弱区高温热浪和干旱历史变化特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 2022, 27(5):604-618. (Yin Dezhen, Li Fang, Lin Zhongda. Historical changes of high temperature, heat waves, and drought in ecological fragile zones in China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2022, 27(5):604-618. (in Chinese))
- [35] 刘轩, 粟晓玲, 刘雨翰, 等. 西北地区生态干旱脆弱性评估 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(3):65-73. (Liu Xuan, Su Xiaoling, Liu Yuhuan, et al. Vulnerability assessment of ecological drought in Northwest China [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3):65-73. (in Chinese))
- [36] 邬晓丹, 罗敏, 孟凡浩, 等. 气候暖湿化背景下新疆极端气候事件时空演变特征分析 [J]. *干旱区研究*, 2022, 39(6):1695-1705. (Wu Xiaodan, Luo Min, Meng Fanhao, et al. New characteristics of spatio-temporal evolution of extreme climate events in Xinjiang under the background of warm and humid climate [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(6):1695-1705. (in Chinese))
- [37] 冯瑶, 阿依先木·尼牙孜, 热依拉·玉努斯. 新疆哈密“7·31”极端大暴雨过程成因分析 [J]. *干旱气象*, 2021, 39(3):426-435. (Feng Yao, Ayixianmu·Niyazi, Reyila·Yunusi. Cause analysis of an extreme heavy rainstorm process on July 31 of 2018 in Hami of Xinjiang [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2021, 39(3):426-435. (in Chinese))
- [38] 许婷婷, 杨霞, 周鸿奎. 1981—2019 年新疆区域性高温天气过程时空特征及其环流分型 [J]. *干旱气象*, 2022, 40(2):212-221. (Xu Tingting, Yang Xia, Zhou Hongkui. Spatio-temporal characteristics and circulation types of regional high temperature weather processes in Xinjiang during 1981-2019 [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2022, 40(2):212-221. (in Chinese))
- [39] 杨霞, 周鸿奎, 赵克明, 等. 1991—2018 年新疆夏季小时极端强降水特征 [J]. *高原气象*, 2020, 39(4):762-773. (Yang Xia, Zhou Hongkui, Zhao Keming, et al. Variation features of hourly precipitation in Xinjiang Province during 1991-2018 [J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(4):762-773. (in Chinese))
- [40] Rajulapati C R, Abdelmoaty H M, Nerantzaki S D, et al. Changes in the risk of extreme temperatures in megacities worldwide [J]. *Climate Risk Management*, 2022, 36:100433.
- [41] Li Xin, Fang Guohua, Wei Jianhui, et al. Evaluation and projection of precipitation and temperature in a coastal climatic transitional zone in China based on CMIP6 GCMs [J]. *Climate Dynamics*, 2023, 61(7):3911-3933.
- [42] 王卫光, 黄茵, 邢万秋, 等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(3):8-13. (Wang Weiguang, Huang Yin, Xing Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(3):8-13. (in Chinese))
- [43] 瞿德业, 杨明月, 刘婷婷, 等. 基于 SPEI 的洮河流域气象干旱时空特征分析 [J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(5):32-40. (Qu Deyue, Yang Mingyue, Liu Tingting, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of meteorological drought in Taohe River Basin based on SPEI [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(5):32-40. (in Chinese))
- [44] Kamal N, Pachauri S. Mann-Kendall, and Sen's slope estimators for precipitation trend analysis in North-Eastern States of India [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2019, 177(11):7-16.
- [45] 孟长青, 董子娇, 刘柯莹, 等. 嘉陵江流域骤发干旱时空演变特征分析 [J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(4):23-30. (Meng Changqing, Dong Zijiao, Liu Keying, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of flash droughts in Jialing River Basin [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(4):23-30. (in Chinese))
- [46] Gradiyanto F, Parmantoro P N, Suharyanto. Impact of climate change on Kupang River flow and hydrological extremes in Greater Pekalongan, Indonesia [J]. *Water Science and Engineering*, 2025, 18(1):69-77.

(收稿日期:2025-08-10 编辑:施业)

