

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.008

# 基于CMIP6的金沙江流域径流及水文干旱预估

张 丹<sup>1</sup>, 梁瀚续<sup>2</sup>, 何小聪<sup>1</sup>, 时玉龙<sup>3</sup>

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065;  
3. 中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心, 湖北 宜昌 443133)

**摘要:**针对金沙江流域近年来水旱灾害频发并对水与能源安全构成严重威胁的问题,基于CMIP6的11种全球气候模式(GCMs),耦合VIC水文模型,预估了金沙江流域2030—2099年径流的变化趋势,采用标准化径流指数(SRI)探究了流域未来水文干旱的演变趋势。结果表明:历史时期(1966—2014年)GCMs空间降尺度效果和VIC模型的径流模拟效果均较好,能够提供可靠的径流及水文干旱预估数据;金沙江流域未来径流呈显著增加趋势,小得石站增速最快,屏山站次之,石鼓站最慢,且SSP5-8.5情景的趋势率大于SSP2-4.5情景;金沙江流域未来呈湿润化趋势,水文干旱近期(2030—2064年)较为严重,远期(2065—2099年)将减弱;从空间上看,金沙江干流石鼓和屏山站的干旱频率、历时、烈度高于支流雅砻江小得石站。

**关键词:**气候变化;CMIP6;径流;水文干旱;金沙江流域

**中图分类号:**TV122      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-6933(2023)06-0053-10

**Estimation of runoff and hydrological drought in the Jinsha River Basin based on CMIP6//ZHANG Dan<sup>1</sup>, LIANG Hanxu<sup>2</sup>, HE Xiaocong<sup>1</sup>, SHI Yulong<sup>3</sup>** (1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 2. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. River Basin Hub Administration Center, China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China)

**Abstract:** In response to the frequent occurrence of water and drought disasters in the Jinsha River Basin in recent years, which pose a serious threat to water and energy security, 11 global climate models (GCMs) based on CMIP6 were coupled with the VIC hydrological model to estimate the trend of runoff changes in the Jinsha River Basin from 2030 to 2099. The standardized runoff index (SRI) was used to explore the evolution trend of future hydrological drought in the basin. The results show that the spacial downscaling effect of GCMs in historical period (1966-2014) and the runoff simulation effect of the VIC model are both good, providing reliable runoff and hydrological drought estimate data. The future runoff of the Jinsha River Basin shows a significant increasing trend, with Xiaodeshi Station having the fastest growth rate, followed by Pingshan Station, and Shigu Station having the slowest. The trend rate of SSP5-8.5 scenario is greater than that of SSP2-4.5 scenario. The Jinsha River Basin will show a trend of wetting in the future, with severe hydrological drought in the near future (2030-2064) and weakening in the far future (2065-2099). From a spatial perspective, the drought frequency, duration, and intensity of Shigu and Pingshan stations on the main stream of the Jinsha River are higher than those of Xiaodeshi stations on the tributary of the Yalong River.

**Key words:** climate change; CMIP6; runoff; hydrological drought; the Jinsha River Basin

IPCC 第六次评估报告明确指出,人类活动导致全球气候以前所未有的速度变暖,加剧了极端水文气象事件的频率和强度<sup>[1]</sup>。全球变暖将加速全球水文循环过程,更改降水的时空分布格局,加剧区域干旱和洪水的风险,可能导致干燥地区变得更干燥,

湿润地区变得更湿润<sup>[2]</sup>。已有研究表明,无定河流域、锡尔河流域未来径流增加,而水文干旱将变得更加严重<sup>[3-4]</sup>;渭河流域水文干旱未来近期较严重,远期将缓解<sup>[5]</sup>。21世纪以来,长江流域2003年、2022年以及澜湄流域2019年发生的特大干旱均造

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2021YFC3200302);中国长江三峡集团有限公司科研项目(0704184)

**作者简介:**张丹(1994—),女,工程师,博士,主要从事水资源管理研究。E-mail:zhangdan\_main@163.com

**通信作者:**梁瀚续(1999—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:767355988@qq.com

成了严重的经济损失<sup>[6]</sup>。流域径流情势和水旱灾害与地区安全和发展密切相关,厘清气候变化背景下的径流情势和水旱灾害的演变规律有助于降低水安全风险,促进社会和经济可持续发展。

金沙江流域地跨高原山地气候区和亚热带季风区,气候变化敏感。上游属长江源区,生态脆弱;下游人口密集,工农业较为发达。作为南水北调西线工程和滇中引水工程的调水源地,金沙江流域水资源丰富,同时也是我国最大的水电基地,理论水能资源蕴藏量达 1.12 亿 kW,对长江上游经济带建设具有重要战略意义。然而近年来金沙江流域水旱灾害频发<sup>[7-8]</sup>,对经济社会发展造成严重影响。为进一步强化金沙江流域水资源综合管理,保障水安全,亟须揭示流域径流及干旱的时空演变特征,特别是未来气候变化背景下的演变规律。但当前的研究是主要基于第五次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)的金沙江流域未来径流预估,较少涉及干旱<sup>[9-10]</sup>,流域未来水文干旱趋势有待进一步探索。此外,最近研究发现,与 CMIP5 相比,CMIP6(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)模式改进了对气候物理过程的模拟,降低了降水、气温及潜在蒸散发模拟的不确定性,同时显示出更大的升温速率和降水增幅,未来极端干湿情况可能变得更为严重,尤其是在高原地区<sup>[11-12]</sup>。然而,目前基于 CMIP6 气候变化情景下径流及干旱预估的研究还较为缺乏,尤其是在流域尺度上。基于此,本文利用 CMIP6 的 11 种全球气候模式(global climate models, GCMs),即 ACCESS-ESM1-5、BCC-CSM2-MR、CanESM5、EC-Earth3、EC-Earth3-Veg、GFDL-CM4、INM-CM4-8、IPSL-CM6A-LR、MIROC6、MPI-ESM1-2-HR、MPI-ESM1-2-LR,系统性解析气候变化背景下金沙江流域未来径流及水文干旱的时空演变趋势,以期金沙江流域水资源管理和水旱灾害防治提供参考。

1 研究区概况与数据来源

金沙江是长江流域重要的干流,金沙江流域位于 24°N ~ 36°N, 90°E ~ 106°E。流域地势由西北向东南倾斜,海拔落差超过 6 000 m,最高处位于发源地各拉丹东雪山附近,海拔为 6 575 m;最低处位于流域出口宜宾附近,海拔为 249 m(图 1)。金沙江流域具有典型的高原气候和季风气候特征,气候垂直差异明显<sup>[13]</sup>。金沙江上游区域位于高原山地气候区内,年降水量为 249 ~ 810 mm,年径流量为 199 亿 ~ 415 亿 m<sup>3</sup>,出口水文站为石鼓,控制面积约 21 万 km<sup>2</sup>;雅砻江流域大部分位于高原山地气候区内,

年降水量为 613 ~ 911 mm,年径流量为 367 亿 ~ 675 亿 m<sup>3</sup>,出口水文站为小得石,控制面积约 12 万 km<sup>2</sup>;金沙江中下游区域大部分位于亚热带季风气候区内,年降水量为 631 ~ 1105 mm,年径流量为 259 亿 ~ 763 亿 m<sup>3</sup>,出口水文站为屏山,控制面积约 47 万 km<sup>2</sup>。金沙江流域蕴藏丰富的水能资源,共规划超 40 座梯级水电站,包括金沙江上游 8 座,中游干流河段 8 座,下游干流 4 座,支流雅砻江 21 座,总装机容量超过 9 000 万 kW。

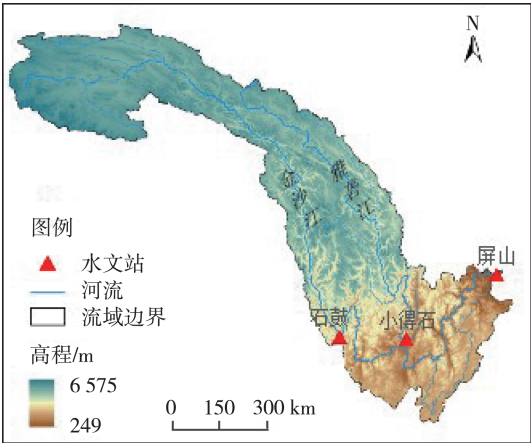


图 1 金沙江流域水系及水文站点分布

Fig.1 Sketch of main rivers and hydrological stations in the Jinsha River Basin

本文采用的数据主要包括 VIC(variable infiltration capacity)模型的驱动数据(气象、水文和下垫面数据)和未来气候变化情景下的 CMIP6 全球气候模式数据等。其中, VIC 模型气象驱动数据为 CN05.1,时段为 1966—2014 年,该数据集是国家气候中心根据中国 2 400 多个国家级地面气象台站的观测资料制作的格点化观测数据<sup>[14]</sup>,包括逐日降水、气温(最高气温、最低气温)、风速等气象要素数据,空间分辨率为 0.25°,已广泛用于气候变化研究、水文模型驱动和气候模式评估等领域<sup>[15-16]</sup>。CMIP6 全球气候模式数据包括 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种情景,分别代表中等强迫情景和高等强迫情景,是现阶段输出相对较为完整的情景试验,选取时段分别为历史时期(1966—2014 年)和未来时期(2030—2099 年)。水文资料包括金沙江流域石鼓、小得石、屏山水文站 1984—2011 年的实测月流量数据,来源于长江流域水文年鉴。下垫面数据中 DEM 数据来自中国科学院地理空间数据云 SRTMDEM 数据集,空间分辨率为 90m;土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心;土壤数据来源于国家青藏高原科学数据中心;植被数据来源于马里兰大学([http://www. landcover. org/data/landcover/ data..shtml](http://www.landcover.org/data/landcover/data.shtml))。

## 2 研究方法

### 2.1 VIC 模型

VIC 模型可以同时模拟水量和能量平衡,通过参数网格化表征土壤蓄水容量、地表植被和降水的空间不均匀性对产流的影响,因而广泛运用于高寒及山区流域的水文模拟<sup>[17-18]</sup>。VIC 模型将土壤分为 3 层,上两层反映土壤水分的动态变化,下层反映土壤含水量的季节变化;同时将陆-气之间的主要水文气象过程参数化,包括土壤层蒸发( $E$ )、地表植被蒸腾( $E_t$ )、冠层蒸发( $E_c$ )、侧向热通量( $L$ )、感热通量( $S$ )、向下的长波辐射( $R_L$ )、向下的短波辐射( $R_s$ )、地热通量( $\tau_c$ )、下渗( $i$ )、渗透( $Q$ )、基流( $B$ )和径流( $R$ )。模型中每个网格独立计算,实现各网格的陆面过程后,利用汇流程序将陆面过程的结果汇集到流域出口<sup>[19]</sup>。VIC 模型产流和汇流过程需要的输入数据主要包括植被参数、植被类型、土壤参数、气象驱动、流向、流程以及有效面积等数据。该模型有 8 个需要确定的水文参数,其中顶部薄层土壤的厚度( $d_1$ )取 0.1 m,基流非线性增长指数( $C$ )取 2;剩余 6 个参数需根据流域的径流资料进行率定, $B$  为蓄水容量曲线参数,表征网格含水量在空间上的分布情况,取值范围为 0 ~ 0.6; $D_s$ 为非线性基流占最大基流速率的比例,取值范围为 0 ~ 1; $D_m$ 为基流在底层土壤中一日内的最大值,取值范围为 0 ~ 30 mm; $W_s$ 为非线性基流发生时下层土壤与土壤最大含水量的比值,取值范围为 0 ~ 1; $d_2$ 和  $d_3$ 分别为第二层和第三层土层的厚度,取值范围为 0.1 ~ 1.5 m。

为探究未来气候条件下金沙江流域径流的变化,将全流域按  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  空间分辨率划分为 712 个网格以搭建 VIC 模型。采用多目标海鞘群算法<sup>[20]</sup>,以月径流的纳什效率系数(NSE)和相对偏差(BIAS)为目标函数进行参数率定,辅以决定系数( $R^2$ )评价模拟效果<sup>[21]</sup>。其中 NSE 和  $R^2$  越接近于 1, BIAS 越接近于 0,表明模拟效果越好。

### 2.2 GCMs 空间降尺度与偏差校正

利用双线性插值法对 CMIP6 中的 11 种 GCMs 的最高气温、最低气温和降水日数据进行空间降尺度,然后使用分位数映射(quantile mapping, QM)法根据 CN05.1 数据集对降尺度后的日数据进行统计偏差校正,最后用泰勒图<sup>[22]</sup>评估历史训练期(1966—2014 年)偏差校正效果。

双线性插值是利用目标点  $M = (x, y)$  周围 4 个临近点的值在横坐标和纵坐标方向上做线性内插来取得目标点函数值  $f(M)$ (图 2)。首先在  $x$  方向上进行线性插值,得到:

$$f(R_1) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}f(Q_{21}) \quad (1)$$

$$f(R_2) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}f(Q_{22}) \quad (2)$$

其中  $R_1 = (x, y_1)$   $R_2 = (x, y_2)$

在  $y$  方向上进行线性插值,得到:

$$f(M) \approx \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1}f(R_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}f(R_2) \quad (3)$$

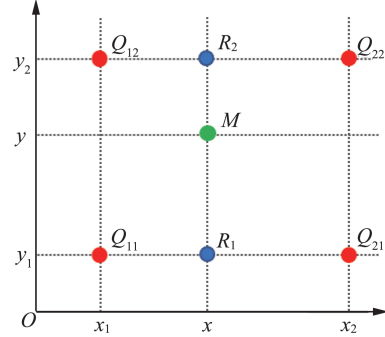


图 2 双线性插值示意图

Fig.2 Diagram of bilinear interpolation

QM 法是典型的频率订正法,对日尺度降水和温度的误差校正效果较好<sup>[23]</sup>。与所有统计后处理算法一样,QM 法假定气候模型的偏差是平稳的,即历史与未来时期的偏差分布一致。该方法首先构建历史训练期观测值和模拟值累积概率分布函数之间的传递函数,再利用构建的传递函数校正未来时段的模拟值<sup>[24]</sup>。本文选取经验累积概率分布函数作为累积概率分布函数,选取较为简单的一次线性函数作为传递函数。经验 QM 法构造如下:

$$Y = F_o^{-1}[F_{b,m}(X_{f,m})] \quad (4)$$

式中:  $Y$  为偏差校正的结果;  $F_o$ 、 $F_{b,m}$  分别为实测数据和模式数据在历史训练期的经验累积分布函数;  $X_{f,m}$  为模式  $m$  在预测期的原始数据。

### 2.3 干旱指数计算

采用标准化径流指数(standardized runoff index, SRI)<sup>[25]</sup>表征水文干旱。该指标仅以径流数据为输入,基于径流的变化来衡量区域缺水程度<sup>[26]</sup>,计算简单、灵活,广泛应用于水文干旱评估<sup>[27]</sup>。以 1 月为研究的时间尺度,对各月径流分别建立  $\Gamma$  分布函数,而后利用等概率变换将径流的累积分布转化至标准正态分布。

### 2.4 干旱识别

水文干旱被定义为 SRI 连续小于干旱阈值的月份序列。在研究时段内,当 SRI 低于干旱阈值时,表示干旱事件开始;当 SRI 重新高于干旱阈值时,表示干旱事件结束。干旱频次是指发生干旱的事件次数;干旱历时是指单次干旱从开始到结束的持续时

间;干旱频率是干旱月数与时段总月数之比;干旱烈度定义为单次干旱事件中 SRI 与阈值之差累积和的绝对值。本文采用游程理论<sup>[28]</sup>识别水文干旱,同时为增加干旱识别的精度,参考文献[27,29],将间隔时间很短(小于1月)的两次干旱事件进行合并,具体步骤为:当 SRI 小于干旱阈值时,初步判定本月为干旱月;将间期小于1月的两次干旱事件合并为一次干旱事件,干旱历时为两次干旱历时与间隔期之和,干旱烈度为两次干旱烈度之和(图3)。依据文献[30-31],水文干旱阈值设定为-1,且 SRI 范围为(-2,-1.5]和(-∞,-2]分别代表重旱和特旱。

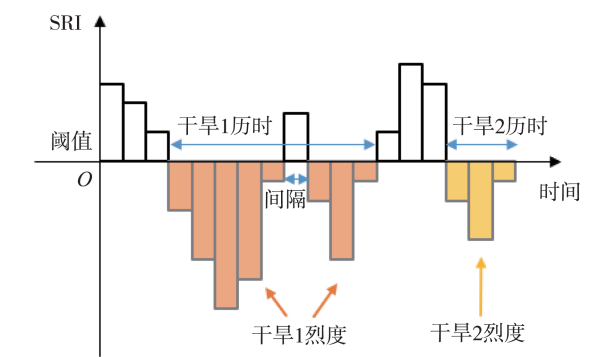


图3 游程理论示意图  
Fig.3 Schematic diagram of run theory

### 3 结果与分析

#### 3.1 VIC 模型率定与验证

2011年后,金沙江和雅砻江上库容超10亿m<sup>3</sup>的向家坝、锦屏1级、溪洛渡、鲁地拉、观音桥、白鹤滩和乌东德水电站相继蓄水发电<sup>[32]</sup>,极大地改变了年内径流过程。因此,选取1984—2011年的气象水文资料率定和验证VIC模型,其中1984—1990年、1991—2005年、2006—2011年分别作为VIC模型的预热期、率定期和验证期。根据参数率定结果,VIC模型最优取值组合为B、D<sub>s</sub>、D<sub>m</sub>、W<sub>s</sub>、d<sub>2</sub>、d<sub>3</sub>分别取0.59、0.01、20mm、0.5、0.1m、0.9m。表1为VIC模型径流模拟效果,图4为各水文站月径流模拟结果。由表1和图4可见,金沙江流域各水文站月径流的模拟值与实测值拟合效果均较好,NSE均大于0.83,R<sup>2</sup>均大于0.92,且BIAS均小于20%,表明构建的VIC模型在金沙江流域具有较好的适用性,可以进一步应用于未来气候变化情景下的径流预估。

表1 VIC模型径流模拟效果

| 水文站 | 率定期  |                |      | 验证期  |                |      |
|-----|------|----------------|------|------|----------------|------|
|     | NSE  | R <sup>2</sup> | BIAS | NSE  | R <sup>2</sup> | BIAS |
| 石鼓  | 0.84 | 0.93           | 0.17 | 0.83 | 0.94           | 0.19 |
| 小得石 | 0.93 | 0.94           | 0.03 | 0.90 | 0.92           | 0.04 |
| 屏山  | 0.94 | 0.94           | 0.02 | 0.90 | 0.93           | 0.03 |

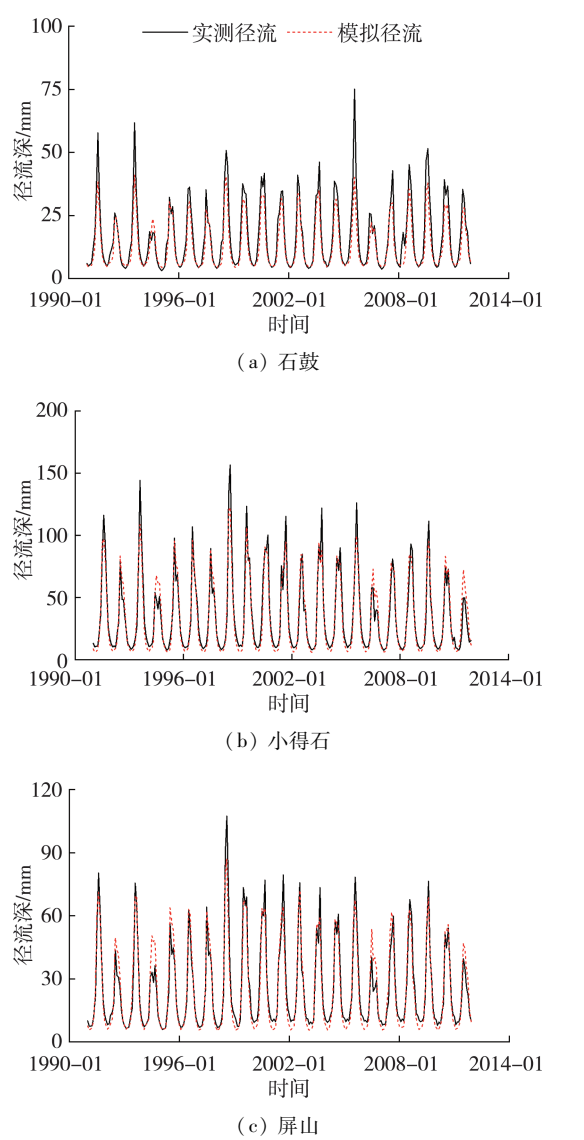


图4 各水文站月径流模拟结果  
Fig.4 Monthly runoff simulation results of each hydrological station

#### 3.2 气候变化下流域未来降水、气温和径流预估

##### 3.2.1 GCMs 模拟能力评估

采用QM对双线性插值后的GCMs日气象数据进行统计偏差校正,用泰勒图评估1966—2014年金沙江流域最高气温、最低气温及降水的模拟效果(图5),GCMs模式的气象要素值与观测值的距离越接近,代表模式模拟精度越高。由图5(a)~(d)可见,不同GCMs模式下,最高气温和最低气温模拟场与观测场在日、月尺度上点的分布均非常接近,日尺度和月尺度的相关系数分别大于0.82和0.94,表明各GCMs模式对最高、最低气温都具有较强的模拟能力。对比观测数据与11种单模式和多模式集合平均(MME)模式可以发现,观测数据与MME模式最接近,表明MME模式的模拟效果最好。由图5(e)(f)可见,由于降水在时空上具有波动性较大、

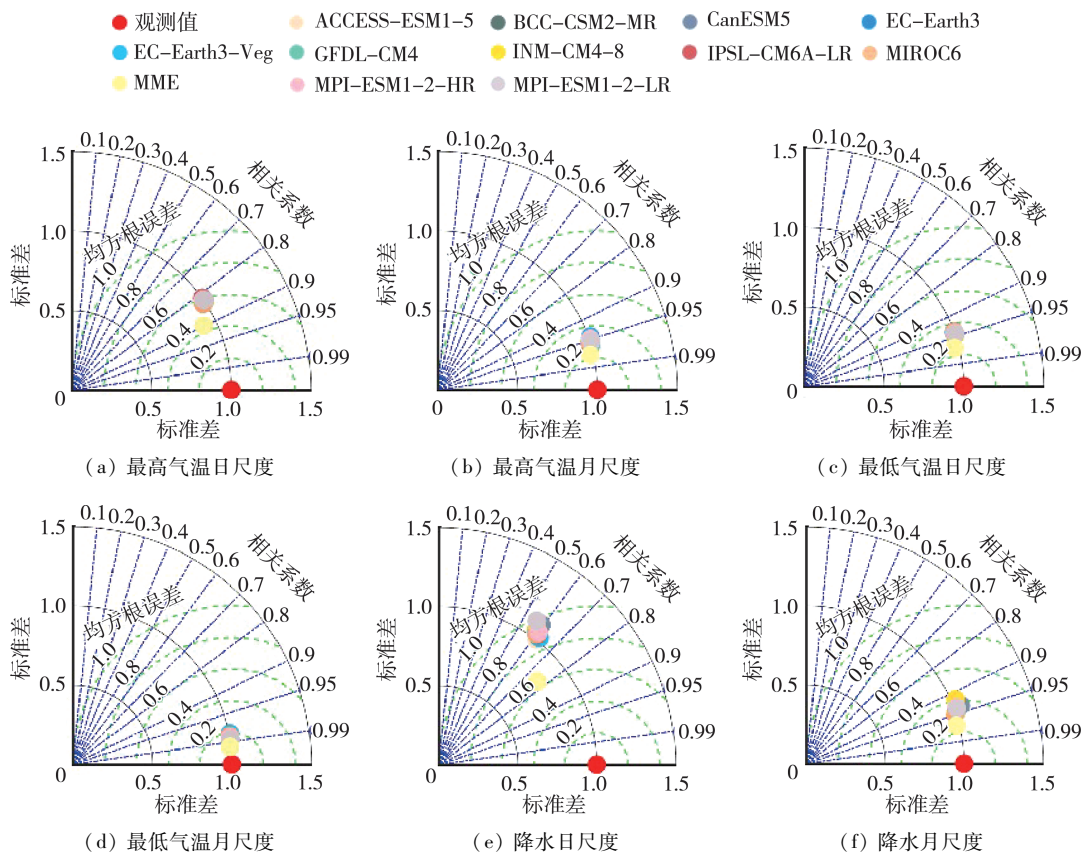


图 5 1966—2014 年不同 GCMs 模式气象要素的泰勒图

Fig. 5 Taylor diagram of meteorological element values from different GCMs from 1966 to 2014

异质性较强的特点,不同 GCMs 模式对降水的模拟精度明显低于气温。ACCESS-ESM1-5 是日尺度降水模拟效果最好的单模式,效果最差的是 MPI-ESM1-2-HR;MIROC6 是月尺度降水模拟效果最好的单模式,效果最差的是 INM-CM4-8。MME 模式下,日尺度和月尺度模拟降水与实测降水的相关系数分别为 0.76 和 0.97,月尺度上的模拟效果明显优于日尺度。尽管不同 GCMs 模式对降水的模拟效果具有一定偏差,但总体上是可接受的,可以用于金沙江流域未来气候预估。此外,单个模式气候预估的不确定性较大,MME 模式可以降低气候模式的不确定性,对气温和降水的模拟效果明显更优,预估气候变化结果的可信度更高。

### 3.2.2 未来气候与径流的变化趋势

基于 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下校正后的 MME 模式,预估金沙江流域未来(2030—2099 年)气温和降水的变化趋势。结果表明,未来最高、最低气温和降水均呈显著增加趋势,最高气温(最低气温)在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下增加的趋势率分别为  $0.028^{\circ}\text{C}/\text{a}$  ( $0.024^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ) 和  $0.070^{\circ}\text{C}/\text{a}$  ( $0.063^{\circ}\text{C}/\text{a}$ );未来降水在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下增加的趋势率分别为  $1.13\text{ mm}/\text{a}$  和  $2.71\text{ mm}/\text{a}$ 。气温和降水的增速均为 SSP5-8.5 情景大于 SSP2-4.5

情景。

用校正后的未来时期气温及降水的 MME 模式驱动 VIC 模型,预估未来不同气候情景下各水文站的径流变化情况,结果如图 6 所示(图中\*表示在 0.05 水平上显著)。SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种情景下金沙江流域各水文站未来径流均呈显著增加趋势,石鼓站趋势率分别为  $0.61\text{ mm}/\text{a}$  和  $0.93\text{ mm}/\text{a}$ ,小得石站趋势率分别为  $0.75\text{ mm}/\text{a}$  和  $1.48\text{ mm}/\text{a}$ ,屏山站趋势率分别为  $0.69\text{ mm}/\text{a}$  和  $1.34\text{ mm}/\text{a}$ ,雅砻江流域小得石站增速最快。各水文站径流增加的趋势率 SSP5-8.5 情景大于 SSP2-4.5 情景,与预估流域未来降水的变化趋势基本一致。不同时期的径流变化表明,相较 1991—2011 年,金沙江流域各水文站多年平均径流在未来近期(2034—2064 年)变幅较小,石鼓、小得石和屏山站分别变化  $-5.2\%$  ~  $-3.3\%$ 、 $2.2\%$  ~  $3.4\%$  和  $-0.5\%$  ~  $0.8\%$ ;在未来远期(2065—2099 年)变幅较大,石鼓、小得石和屏山站分别变化  $8.5\%$  ~  $17.4\%$ 、 $8.9\%$  ~  $14.4\%$  和  $8.2\%$  ~  $14.8\%$ 。

### 3.3 气候变化下金沙江流域未来干旱特征预估

图 7 为未来各水文站 1 月尺度的 SRI 时间序列。各水文站在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种情景下 SRI 均呈显著增大趋势,其中石鼓趋势率分别为

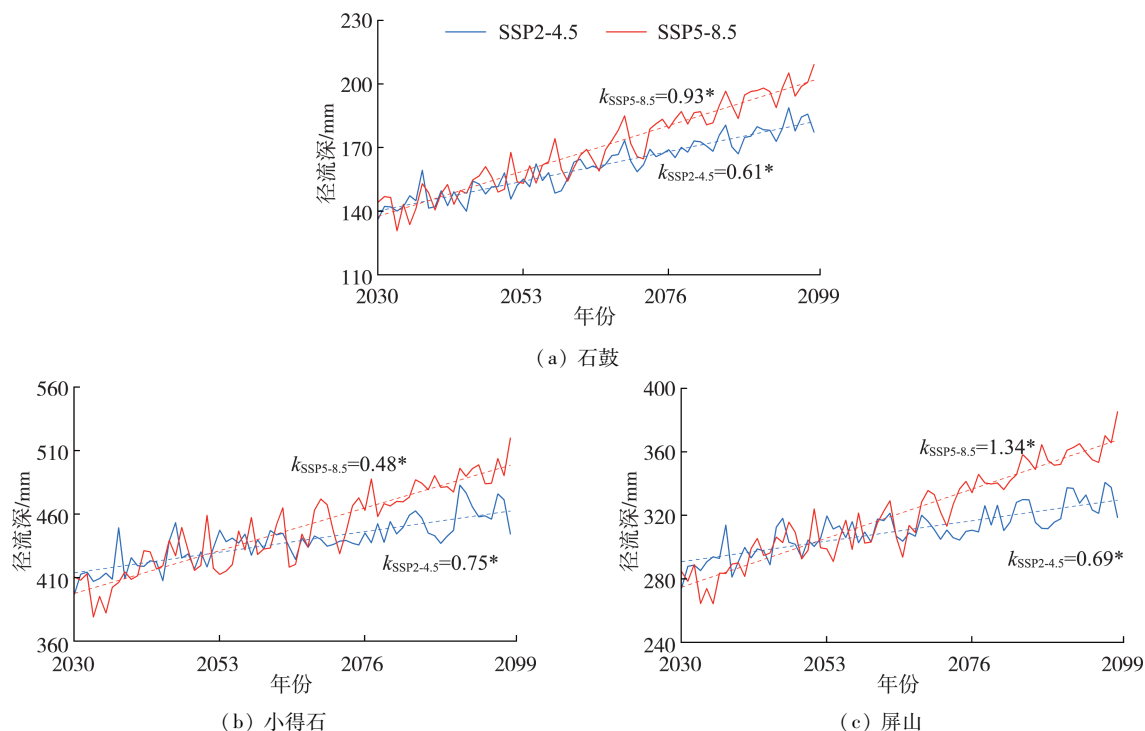


图 6 未来各水文站年径流变化

Fig.6 Changes of annual runoff at hydrological stations in future in the Jinsha River Basin

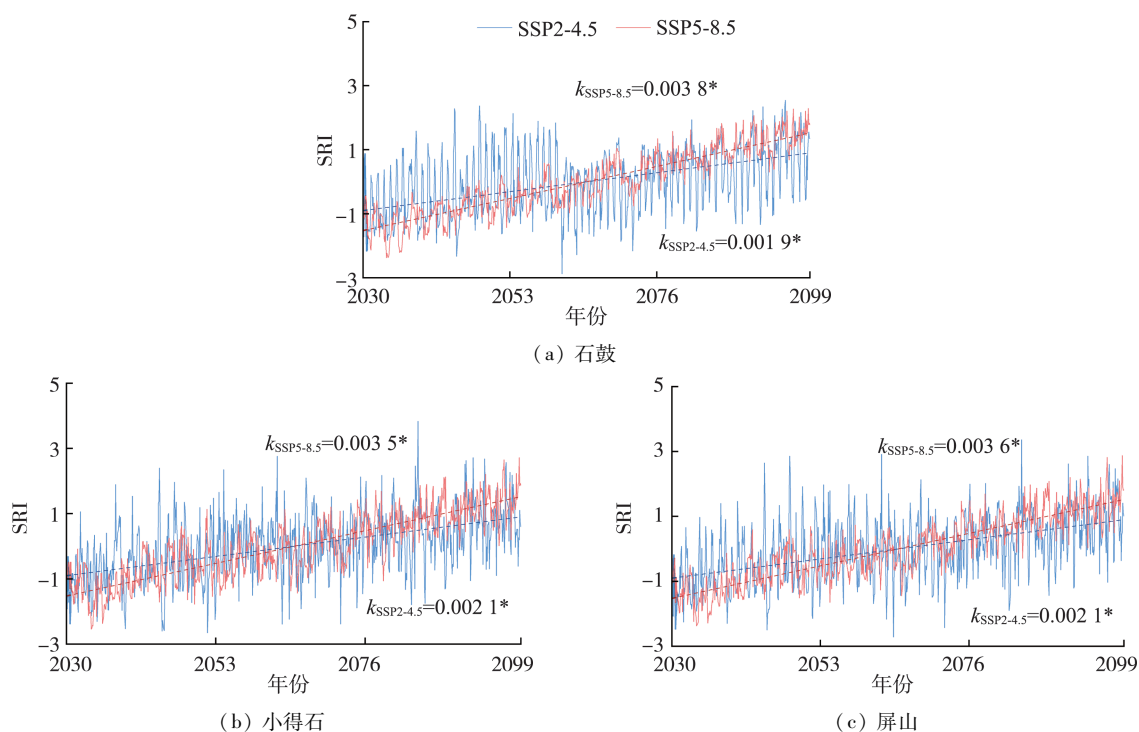


图 7 未来各水文站 1 月尺度的 SRI 时间序列

Fig.7 Time series of SRI on one month scale at hydrological stations in future in the Jinsha River Basin

0.0019/月和 0.0038/月,小得石趋势率分别为 0.0021/月和 0.0035/月,屏山趋势率分别为 0.0021/月和 0.0036/月,表明整个金沙江流域未来呈湿润化趋势。在 SSP2-4.5 情景下,石鼓站干旱开始时间主要集中于夏季(47%),小得石和屏山站主要集中于春、秋两季(>63%);在 SSP5-8.5 情景下,各水文站干旱开始时间均集中于夏、秋两季(>60%)。

表 2 为未来不同气候情景下各水文站的干旱特征。总体而言,在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下,未来干旱特征变量均为近期较强、远期较弱。具体来说,在 SSP2-4.5 情景下,近期各水文站干旱频次为 21~28,干旱频率为 21.7%~27.9%,平均历时为 3.4~5.6 月,平均烈度为 1.9~2.2;远期各水文站干旱频次为 6~11,干旱频率为 3.1%~6.4%,平均

表 2 未来不同气候情景下各水文站干旱特征

Table 2 Drought characteristics at each hydrological station under different climate scenarios in future

| 水文站 | 情景       | 时期 | 干旱频次 | 干旱频率/% | 平均历时/月 | 平均烈度 | 重、特旱频次 | SRI 最小值 |
|-----|----------|----|------|--------|--------|------|--------|---------|
| 石鼓  | SSP2-4.5 | 近期 | 21   | 27.9   | 5.6    | 2.2  | 9      | -2.9    |
|     |          | 远期 | 11   | 6.4    | 2.5    | 0.9  | 2      | -2.2    |
|     | SSP5-8.5 | 近期 | 15   | 32.1   | 9.0    | 3.9  | 7      | -2.4    |
|     |          | 远期 | 0    |        |        |      |        | -0.8    |
| 小得石 | SSP2-4.5 | 近期 | 27   | 21.7   | 3.4    | 1.9  | 9      | -2.7    |
|     |          | 远期 | 6    | 3.1    | 2.2    | 1.0  | 1      | -2.4    |
|     | SSP5-8.5 | 近期 | 21   | 32.1   | 6.4    | 2.8  | 7      | -2.5    |
|     |          | 远期 | 0    |        |        |      |        | -1.4    |
| 屏山  | SSP2-4.5 | 近期 | 28   | 25.7   | 3.9    | 1.9  | 13     | -2.7    |
|     |          | 远期 | 6    | 4.3    | 3.0    | 1.3  | 2      | -2.4    |
|     | SSP5-8.5 | 近期 | 14   | 28.1   | 8.4    | 4.2  | 9      | -2.4    |
|     |          | 远期 | 1    | 0.7    | 3.0    | 0.8  | 0      | -1.4    |

历时为 2.2 ~ 3.0 月,平均烈度为 0.9 ~ 1.3。在 SSP5-8.5 情景下,近期各水文站干旱频次为 14 ~ 21,干旱频率为 28.1% ~ 32.1%,平均历时为 6.4 ~ 9.0 月,平均烈度为 2.8 ~ 4.2;远期仅屏山站发生 1 次短历时干旱,烈度为 0.8。同时,重、特旱频次和 SRI 最小值也呈近期较强、远期较弱的特征,表明未来远期极端干旱事件的数量和强度有所降低。相较 SSP2-4.5 情景,SSP5-8.5 情景下干旱的频次、频率均大幅减少,远期几乎不发生干旱,而近期干旱平均历时、平均烈度和重、特旱频次均高于 SSP2-4.5 情景。从空间上看,金沙江干流石鼓和屏山站的干旱频率、平均历时、平均烈度以及重、特旱频次高于支流雅砻江的小得石站。

### 3.4 讨论

秦鹏程等<sup>[9-10,33]</sup>基于 CMIP5 多模式预估了金沙江流域未来降水、气温和径流均呈增加趋势;Sun 等<sup>[34-35]</sup>基于 CMIP5 多模式预估了长江上游呈湿润化趋势,干旱烈度将减弱。本文结果与前人结果具有一致性,主要是由于 CMIP5 和 CMIP6 的气候要素具有相似变化趋势<sup>[36]</sup>。然而,CMIP6 模式显著改善了气候物理过程的模拟,降低了降水、气温及潜在蒸散发模拟的不确定性,显示出更大的升温速率和降水增幅。本文基于最新的 CMIP6 模式,更为精准与系统地解析了金沙江流域未来径流及水文干旱的时空演变趋势。此外,金沙江流域是南水北调西线工程和滇中引水工程的调水源区,同时也是中国最大的水电基地,未来径流增加,水文干旱减弱,有望增加梯级水库群的水力发电量,促进国家西电东输的战略实施,同时有助于缓解调水工程对调水源区水安全与水力发电量的影响。未来可进一步研究气候变化情景下的径流及干旱变化对金沙江梯级水库发电影响以及水库的适应性优化调度方案。

金沙江流域历史径流模拟结果表明,上游站石

鼓模拟精度略低,可能是由于青藏高原气象观测站点稀疏,地形起伏较大,基于观测台站插值的 CN05.1 气象数据集在该区域存在较大的不确定性<sup>[14]</sup>;同时,本文选取 VIC 模型模拟径流,未考虑源区冰川的作用,可能给径流的模拟和预估带来一定误差。此外,本文仅使用单一水文模型来预估金沙江流域的未来径流,未来径流的模拟存在许多不确定因素,例如水文模型的结构、模型参数率定以及全球气候模式的结构和初始条件<sup>[37]</sup>。已有研究表明,水文模型的不确定性小于情景模式的不确定性<sup>[38]</sup>,但分析和研究所有因素的不确定性仍是当前面临的重要挑战。MME 模式能够有效降低 GCMs 异质性带来的不确定性,提高径流及水文干旱预测的准确性。需要注意的是,本文仅聚焦于气候变化,基于 CMIP6 多模式预估了金沙江流域未来气象要素并驱动 VIC 模型,未考虑未来人类活动<sup>[39-40]</sup>(例如取用水、水库修建和运行、土地利用与覆被变化)对径流及干旱预估的不确定性影响。未来需综合考虑径流变化的驱动因子,深化对变化环境下水文响应规律的理解,以期金沙江流域水资源管理和水旱灾害防治提供可靠依据。

## 4 结 论

a. 基于历史气象数据构建的 VIC 模型在金沙江流域适用性较好,各水文站月径流模拟的 NSE 均大于 0.83,  $R^2$  均大于 0.92;统计降尺度校正后的 GCMs 模式能够有效地捕捉金沙江流域最高气温、最低气温和降水的变化,且 MME 模式效果优于单一模式。因此,耦合统计降尺度的 GCMs 和 VIC 模型能够应用于金沙江流域未来气候变化下径流及水文干旱预估。

b. 未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种情景下金沙江流域气温和降水均呈显著增加趋势,MME 模式下

最高气温(最低气温)趋势率分别为  $0.028^{\circ}\text{C}/\text{a}$  ( $0.024^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ) 和  $0.070^{\circ}\text{C}/\text{a}$  ( $0.063^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ), 降水趋势率分别为  $1.13\text{ mm}/\text{a}$  和  $2.71\text{ mm}/\text{a}$ 。各水文站未来径流在两种情景下均呈显著增加趋势, 雅砻江流域小得石站增速最快, 且增加趋势 SSP5-8.5 情景大于 SSP2-4.5 情景; 未来远期(2065—2099 年)各站径流增幅较大, 为  $8\% \sim 17\%$ 。

c. 金沙江流域未来呈湿润化趋势, SRI 趋势率 SSP5-8.5 情景大于 SSP2-4.5 情景, 且水文干旱主要集中发生于夏、秋两季。未来干旱特征指标(频次、频率、历时、烈度、极端干旱强度)均为近期(2030—2064 年)较高, 远期(2065—2099 年)较低。从空间上看, 金沙江干流石鼓和屏山站的干旱频率、历时、烈度高于支流雅砻江小得石站。

## 参考文献:

[1] 姜大膀, 王娜. IPCC AR6 报告解读: 水循环变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 699-704. (JIANG Dabang, WANG Na. Water cycle changes: interpretation of IPCC AR6 [J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 699-704. (in Chinese))

[2] XIONG J H, GUO S L, ABHISHE K, et al. Global evaluation of the "dry gets drier, and wet gets wetter" paradigm from a terrestrial water storage change perspective [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022, 24: 6457-6476.

[3] JIAO Y, YUAN X. More severe hydrological drought events emerge at different warming levels over the Wudinghe Watershed in northern China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(1): 621-635.

[4] SU F G, PRITCHARD H D, YAO T D, et al. Contrasting fate of western third pole's water resources under 21st century climate change [J]. Earths Future, 2022, 10(9): 2776.

[5] LI Y S, LU H, YANG K, et al. Meteorological and hydrological droughts in Mekong River Basin and surrounding areas under climate change [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 36(6): 100873.

[6] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策 [J]. 水利学报, 2022, 53(10): 1143-1153. (XIA Jun, CHEN Jin, SHE Dunxian, et al. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10): 1143-1153. (in Chinese))

[7] 吴桂炀, 陈杰, 陈启会, 等. 金沙江流域近 50 年气象水文干旱时空变化特征 [J]. 人民长江, 2019, 50(11): 84-90. (WU Guiyang, CHEN Jie, CHEN Qihui, et al. Spatiotemporal variation of hydro-meteorological drought in Jinsha River Basin in recent 50 years [J]. Yangtze River,

2019, 50(11): 84-90. (in Chinese)).

[8] 沈嘉聚, 杨汉波, 刘志武, 等. 长江上游径流对气象要素变化的敏感性分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 119-126. (SHEN Jiaju, YANG Hanbo, LIU Zhiwu, et al. Sensitivity analysis of annual runoff to annual variation of meteorological elements in upper reaches of the Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 119-126. (in Chinese))

[9] 秦鹏程, 刘敏, 杜良敏, 等. 气候变化对长江上游径流影响预估 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 405-415. (QIN Pengcheng, LIU Min, DU Liangmin, et al. Climate change impacts on runoff in the upper Yangtze River Basin [J]. Climate Change Research, 2019, 15(4): 405-415. (in Chinese))

[10] LIANG H X, ZHANG D, WANG W S, et al. Quantifying future water and energy security in the source area of the western route of China's South-to-North Water Diversion Project within the context of climatic and societal changes [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 47: 101443.

[11] ZHU H H, JIANG Z H, LI L. Projection of climate extremes in China, an incremental exercise from CMIP5 to CMIP6 [J]. Science Bulletin, 2021, 66(24): 2528-2537.

[12] HAMED M M, NASHWAN M S, SHAHID S, et al. Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: a comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia [J]. Atmospheric Research, 2022, 265: 105927.

[13] 鞠艳, 张珂, 李炳锋, 等. 金沙江流域实际蒸散发时空分布特征及其影响因子 [J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 104-111. (JU Yan, ZHANG Ke, LI Bingfeng, et al. Spatiotemporal distribution of actual evapotranspiration and its influencing factors in the Jinsha River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 104-110. (in Chinese))

[14] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111. (WU Jia, GAO Xuejie. 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))

[15] 王倩之, 刘凯, 汪明. NEX-GDDP 降尺度数据对中国极端降水指数模拟能力的评估 [J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(1): 31-43. (WANG Qianzhi, LIU Kai, WANG Ming. Evaluation of extreme precipitation indices performance based on NEX-GDDP downscaling data over China [J]. Climate Change Research, 2022, 18(1): 31-43. (in Chinese))

[16] 栗晓玲, 褚江东, 张特, 等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应 [J]. 水资源保护,

- 2022, 38 (1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 34-42. (in Chinese))
- [17] YUN X B, TANG Q H, WANG J, et al. Impacts of climate change and reservoir operation on streamflow and flood characteristics in the Lancang-Mekong River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590:125472.
- [18] 张林燕, 郑巍斐, 杨肖丽, 等. 基于 CMIP5 多模式集合和 PDSI 的黄河源区干旱时空特征分析[J]. 水资源保护, 2019, 35 (6): 95-99. (ZHANG Linyan, ZHENG Weifei, YANG Xiaoli, et al. Drought assessment of Xijiang River Basin based on standardized Palmer drought index[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (6): 95-99. (in Chinese))
- [19] LIANG X, LETTENMAIER D P, WOOD E F, et al. A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes for general-circulation models [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1994, 99 (D7):14415-14428.
- [20] MIRJALILI S, GANDOMI A H, MIRJALILI S Z, et al. Salp swarm algorithm: a bio-inspired optimizer for engineering design problems [J]. Advances in Engineering Software, 2017, 114: 163-191.
- [21] 刘永伟, 王文, 刘元波, 等. 基于 EnKF 法的径流数据同化对 SWAT 模型参数优化效果评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50 (2): 1-10. (LIU Yongwei, WANG Wen, LIU Yuanbo, et al. Evaluation of the optimization effect of streamflow data assimilation on SWAT model parameters based on the EnKF approach [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (2): 1-10. (in Chinese))
- [22] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2001, 106 (D7): 7183-7192.
- [23] TONG Y, GAO X J, HAN Z Y, et al. Bias correction of temperature and precipitation over China for RCM simulations using the QM and QDM methods[J]. Climate Dynamics, 2021, 57 (5/6): 1425-1443.
- [24] CANNON A J, SOBIE S R, MURDOCK T Q. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? [J]. Journal of Climate, 2015, 28 (17): 6938-6959.
- [25] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (2): 226-236.
- [26] 顾磊, 陈杰, 尹家波, 等. 气候变化下中国主要流域气象水文干旱潜在风险传播[J]. 水科学进展, 2021, 32 (3): 321-333. (GU Lei, CHEN Jie, YIN Jiabo, et al. Risk propagation from meteorological to hydrological droughts in a changing climate for main catchments in China [J]. Advances in Water Science, 2021, 32 (3): 321-333. (in Chinese))
- [27] 石朋, 詹慧婕, 瞿思敏, 等. 黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38 (3): 80-86. (SHI Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (3): 80-86. (in Chinese))
- [28] LIANG H X, ZHANG D, WANG W S, et al. Evaluating future water security in the upper Yangtze River Basin under a changing environment [J]. Science of The Total Environment, 2023, 889:164101.
- [29] JU X P, WANG Y K, WANG D, et al. A time-varying drought identification and frequency analyzation method: a case study of Jinsha River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603:126864.
- [30] 郑丽虹, 刘懿, 任立良, 等. 黄河流域气象干旱与水文干旱时空特征及其传递关系[J]. 水资源保护, 2022, 38 (3): 87-95. (ZHENG Lihong, LIU Yi, REN Liliang, et al. Spatio-temporal characteristics and propagation relationship of meteorological drought and hydrological drought in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (3): 87-95. (in Chinese))
- [31] 李昱, 席佳, 张弛, 等. 气候变化对澜湄流域气象水文干旱时空特性的影响[J]. 水科学进展, 2021, 32 (4): 508-519. (LI Yu, XI Jia, ZHANG Chi, et al. Impact of climate change on the spatio-temporal characteristics of meteorological and hydrological drought over the Lancang-Mekong River Basin [J]. Advances in Water Science, 2021, 32 (4): 508-519. (in Chinese))
- [32] ZHAO Y M, XU K, DONG N P, et al. Projection of climate change impacts on hydropower in the source region of the Yangtze River based on CMIP6 [J]. Journal of Hydrology, 2022, 606:127453.
- [33] LI J, WANG Z L, WU X S, et al. Evident response of future hydropower generation to climate change [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590:125385.
- [34] SUN F Y, MEJIA A, ZENG P, et al. Projecting meteorological, hydrological and agricultural droughts for the Yangtze River Basin [J]. Science of The Total Environment, 2019, 696:134076.
- [35] QIN P C, XU H M, LIU M, et al. Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation [J]. Journal of Hydrology, 2020, 580:123922.

- [36] HAMED M M, NASHWAN M S, SHAHID S, et al. Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: a comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia [J]. Atmospheric Research, 2022, 265: 105927.
- [37] DAMS J, NOSSENT J, SENBETA T B, et al. Multi-model approach to assess the impact of climate change on runoff [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 1601-1616.
- [38] WANG H M, CHEN J, XU C Y, et al. A framework to quantify the uncertainty contribution of GCMs over multiple sources in hydrological impacts of climate change [J]. Earth's Future, 2020, 8(8): 1602.
- [39] 薛联青, 白青月, 刘远洪. 人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律 [J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 57-62. (XUE Lianqing, BAI Qingyue, LIU Yuanhong. Study on the propagation of meteorological-hydrological drought in Tarim River Basin under the impact of human activities [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 57-63 (in Chinese))
- [40] YANG W, LONG D, BAI P. Impacts of future land cover and climate changes on runoff in the mostly afforested river basin in North China [J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 201-219.

(收稿日期: 2023-01-18 编辑: 王芳)

(上接第 31 页)

- [26] YANG Z, LIU P, CHENG L, et al. Deriving operating rules for a large-scale hydro-photovoltaic power system using implicit stochastic optimization [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 562-572.
- [27] 刘哲源, 刘攀, 李赫. 水风光互补适应性调度的集合卡尔曼滤波方法 [J]. 水力发电学报, 2022, 41(8): 42-53. (LIU Zheyuan, LIU Pan, LI He. An ensemble Kalman filter method for adaptive operation of hydro-wind-solar hybrid power systems [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(8): 42-53. (in Chinese))
- [28] LI H, LIU P, GUO S, et al. Long-term complementary operation of a large-scale hydro-photovoltaic hybrid power plant using explicit stochastic optimization [J]. Applied Energy, 2019, 238: 863-875.
- [29] 刘宝碇. 随机规划与模糊规划 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [30] CELESTE ALCIGEMES B, VENTURA LUISA A. Simple simulation-optimisation vs SDP for reservoir operation [J]. Water Management, 2017, 170(3): 128-138.
- [31] 王金文, 王仁权, 张勇传, 等. 逐次逼近随机动态规划及库群优化调度 [J]. 人民长江, 2002, 33(11): 45-47. (WANG Jinwen, WANG Renquan, ZHANG Yongchuan, et al. SDP with successive approximations and its application in the operation optimization of multireservoir system [J]. Yangtze River, 2002, 33(11): 45-47. (in Chinese))
- [32] CARLOS MENDEZ-GONZALEZ L, ALBERTO RODRIGUEZ-PICON L, JULIETA VALLES-ROSALES D, et al. Reliability analysis for electronic devices using beta-Weibull distribution [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2017, 33(8): 2521-2530.
- [33] LIU Zifa, ZHANG Zhe, ZHUO Ranqun, et al. Optimal operation of independent regional power grid with multiple wind-solar-hydro-battery power [J]. Applied Energy, 2019, 235: 1541-1550.
- [34] 张曦, 康重庆, 张宁, 等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析 [J]. 电力系统自动化, 2014(6): 6-13. (ZHANG Xi, KANG Chongqing, ZHANG Ning, et al. Analysis of mid/long term random characteristics of photovoltaic power generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014(6): 6-13. (in Chinese))
- [35] 吕清泉, 张珍珍, 马彦宏, 等. 区域光伏发电出力特性分析研究 [J]. 发电技术, 2022, 43(3): 413-420. (LYU Qingquan, ZHANG Zhenzhen, MA Yanhong, et al. Analysis and research on output characteristics of regional photovoltaic power generation [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 413-420. (in Chinese))
- [36] 侯婷婷, 周小兵, 张维, 等. 湖北省典型地区风电和光伏电站出力特性分析 [J]. 湖北电力, 2016, 40(1): 24-30. (HOU Tingting, ZHOU Xiaobing, ZHANG Wei, et al. Analysis on characteristics of wind power and photovoltaic power in the type area of Hubei Province [J]. Hubei Electric Power, 2016, 40(1): 24-30. (in Chinese))
- [37] 鲍正风, 张雅琦, 刘志武. 三峡电站中长期发电计划计算方法研究 [J]. 水利水电技术, 2011, 42(12): 88-92. (BAO Zhengfeng, ZHANG Yaqi, LIU Zhiwu. Study on the calculating method for mid-long term power generation plan of Three Gorges hydropower station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(12): 88-92. (in Chinese))
- [38] 王菁, 刘志武. 编制水电站年度发电计划相关问题的探讨 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2011, 35(1): 29-31. (WANG Jing, LIU Zhiwu. Discussion on annual generation schedule of hydropower plant [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2011, 35(1): 29-31. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-03-03 编辑: 王芳)