

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.037

柳宏才, 张会兰, 孙嘉宁, 等. 基于 VIC 模型的金沙江流域水文要素分析和径流预测研究[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 272-284.

LIU Hongcai, ZHANG Huilan, SUN Jianing, et al. Research on hydrological element analysis and runoff prediction in the Jinsha River Basin based on the VIC model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 272-284.

基于 VIC 模型的金沙江流域水文要素分析和径流预测研究

柳宏才¹, 张会兰^{1,2}, 孙嘉宁¹, 庞建壮¹, 安妮¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 重庆缙云三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 重庆 400711)

摘要: [目的] 金沙江流域是西南高山峡谷区的重要生态区域。在全球气候变暖背景下, 预测并评估金沙江气候及未来径流变化对流域尺度的水土流失防治、防洪减灾和水土资源规划具有重要意义。[方法] 基于 VIC 模型模拟金沙江流域的水文过程, 对 CMIP6 全球气候模式下的 2 种排放情景 (SSP2-4.5、SSP5-8.5) 的 20 个气候模式及多模式集合平均 (MMEA) 的数据进行降尺度处理, 预测 2015—2100 年径流变化趋势。[结果] (1) 历史径流模拟显示, 模型模拟值与实测值的纳什效率系数超过 0.6, BIAS (相对偏差) 绝对值控制在 0.15 以内, 表明 VIC 模型适用于模拟金沙江流域水文过程; (2) VIC 模型模拟的水文过程分量显示, 降水量从上游到下游递增, 蒸散发在中下游较高, 地表径流和基流的多年平均值从上游到下游递增, 且存在显著差异; (3) 基于 EEMD (集合经验模态分解) 的统计降尺度方法对比单模式和 (MMEA) 的模拟结果发现, 观测数据与 MMEA 匹配度最高。在未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下, 模拟结果显示高辐射高排放情景 (SSP5-8.5) 下水文要素变化更显著, 尤其是蒸散发增加趋势明显。[结论] 径流量模拟显示, SSP2-4.5 情景下年平均径流量变化不明显, 而 SSP5-8.5 情景下年平均径流量呈小幅增长趋势。未来年内月径流量在 SSP5-8.5 情景下大多数月份高于 SSP2-4.5 情景。研究结果以期为金沙江流域水资源评估与管理、生态综合治理提供一定参考依据。

关键词: VIC 模型; 金沙江流域; CMIP6; 气候模式; 水文要素; 径流预测

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0272-13

Research on Hydrological Element Analysis and Runoff Prediction in the Jinsha River Basin Based on the VIC Model

LIU Hongcai¹, ZHANG Huilan^{1,2}, SUN Jianing¹, PANG Jianzhuang¹, AN Ni¹,

(1. Beijing Forestry University, School of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China; 2. Three-gorges reservoir area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, Chongqing 400711, China)

Abstract: [Objective] The Jinsha River Basin is an important ecological area in the southwestern mountainous gorge region. Predicting and assessing climate and future runoff changes in the Jinsha River Basin under the background of global warming is of great significance for soil and water conservation, flood control, disaster reduction, and water resource planning at the basin scale. [Methods] This study simulates the hydrological processes of the Jinsha River Basin using the VIC model and downscales data from 20 climate models and the Multi-Model Ensemble Average (MMEA) under two emission scenarios (SSP2-4.5, SSP5-8.5) from the CMIP6 global climate models to predict runoff trends from 2015 to 2100. [Results] (1) The historical runoff simulation indicates that the Nash efficiency coefficient between the simulated and observed values exceeds 0.6, and the absolute value of BIAS is controlled within 0.15, demonstrating that the VIC model is suitable for simulating the hydrological process in the Jinsha River Basin. (2) The hydrological process components simulated by the VIC model show that precipitation increases from the upstream to the downstream regions, evapotranspiration is higher in the middle and lower reaches, and the multi-year average values of surface

收稿日期: 2024-06-09

修回日期: 2024-06-28

录用日期: 2024-07-12

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-09-18

资助项目: 西南高山峡谷区水土流失综合防治技术与示范 (2022YFF130009505); 国家自然科学基金项目 (51309006)

第一作者: 柳宏才 (1999—), 男, 硕士, 主要从事流域水文研究。E-mail: lhc990207@163.com

通信作者: 张会兰 (1984—), 女, 博士, 教授, 主要从事流域水沙过程和流域水文研究。E-mail: zhanghl@bjfu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

runoff and base flow increase from the upstream to the downstream regions with significant differences, further validating the model's applicability. (3) A comparison of single-model and MMEA simulation results using the EEMD-based (Ensemble Empirical Mode Decomposition) statistical downscaling method reveals that the MMEA matches the observed data the best. Under future SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, the simulation results indicate that hydrological elements change more significantly under the high-radiation and high-emission scenarios (SSP5-8.5), with a particularly noticeable increase in evapotranspiration. [Conclusion] The runoff simulations show that the annual average runoff remains relatively unchanged under the SSP2-4.5 scenario, while it shows a slightly increasing trend under the SSP5-8.5 scenario. Future monthly runoff simulations indicate that most months under the SSP5-8.5 scenario have higher runoff compared to the SSP2-4.5 scenario.

Keywords: VIC model; Jinsha River Basin; CMIP6; climate models; hydrological elements; runoff prediction

Received: 2024-06-09

Revised: 2024-06-28

Accepted: 2024-07-12

Online(www.cnki.net): 2024-09-18

水土流失是农业、生态学和环境科学中一个重要的问题,涉及到土壤的流失和水资源的管理。在生态环境中,水土流失占据着重要的地位,直接影响着土壤的质量和稳定性,对生态系统的恢复和生物多样性的维护至关重要。同时,水土流失也是水资源管理的重要方面,影响着地表径流和地下水的补给。地表径流是水土流失中的主要动力因素之一,与降雨、蒸发等过程相互作用,共同影响着水文循环的运行。各水文过程分量之间的相互关系复杂而密切,地表径流与温度、土壤的下渗能力、蒸散发等因素密切相关。在未来气候变化的背景下,水土流失问题可能进一步加剧。气候变化可能导致降雨模式的变化,加剧地表径流和土壤侵蚀的风险,因此,水土流失及其相关的预测性研究具有重要的意义和价值。

水文模型在研究流域水循环及能量交换过程中^[1]扮演着至关重要的角色。集总式水文模型^[2]和分布式水文模型^[3]是2种常用的模型类型,在描述水文循环过程中的空间变化方面有着明显的区别。集总式水文模型将降水和蒸发等输入参数统一处理,因此在模拟复杂流域中存在一定的局限性。而分布式水文模型的一大特点是将下垫面分为大量网格,更加细致地考虑流域内的空间差异,能够更真实地模拟出水文循环过程中的空间变化,在模拟精度和适用性上具有明显优势^[4-5]。可变下渗容量(variable infiltration capacity, VIC)分布式水文模型以其高模型精度、良好的操作性和能够同时计算水量和能量平衡的特点,在全球^[6-7]和国内^[8-10]多个流域得到广泛应用和验证。VIC模型不仅考虑地形、土壤和植被等因素对水文过程的影响,还能够有效地模拟降水入渗、蒸发、径流等关键过程,从而为流域水文规律的研究提供可靠的工具。其高模型精度和良好的操作性使得VIC模型在实际应用中得到广泛认可,并被证明在不

同尺度的流域中都具有较强的适用性^[11]。

气候变化对地表径流的主要驱动作用是不可忽视的,直接影响全球大多数流域的水文循环^[12]。全球气候模式(GCMs)作为一种有效的研究工具,可以更好地理解气候变化对地表径流过程的影响^[13-15]。其中,第六次和第五次耦合模式比较计划(CMIP6和CMIP5)起到关键作用,提供丰富的气候模拟数据。2021—2022年,IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第六次评估报告的发布引起广泛的关注。该报告采用不同的共享社会经济路径(SSPs)和RCPs(representative concentration pathway)的组合情景,这些情景的设置对于探讨未来全球气候变化以及制定相关政策具有重要意义,旨在强调未来辐射强迫情景和社会经济情景的一致性。共享社会经济路径分为SSP1、SSP2、SSP3、SSP4和SSP5,每条路径代表着不同的社会经济发展轨迹,反映人类社会在未来的可能发展方向。目前的核心试验包括SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5,分别代表不同的辐射强迫水平和社会脆弱性^[16-17]。在此背景下,CMIP6模式的应用成为评估未来气候变化的重要工具。CMIP6相较于CMIP5有着显著的改进^[18],降低降水、气温及潜在蒸散发模拟的不确定性,使研究者能够更加准确地评估气候变化对地表径流过程的影响^[19]。GCMs驱动水文模型计算流域水文状况已成为研究气候变化对水资源影响的常用手段^[20],众多水文模型中,VIC因其广泛的应用而备受关注。VIC模型能够有效地模拟地表径流、土壤湿度和蒸发等关键水文过程,使其成为研究气候变化对水资源影响的理想选择^[21-22]。例如,郑巍斐等^[23]基于CMIP5提供的GCMs数据驱动VIC模型,对长江上游流域的径流过程变化趋势进行预测;COATS等^[24]利用4个通用环流模式驱动VIC水文模型,预测塔霍盆地6

条河流年最大日径流量的未来变化趋势;康丽莉等^[25]通过把 VIC 水文模型应用到黄河流域,并利用 CMIP5 全球气候模式动力降尺度结果驱动 VIC 模型来模拟黄河流域未来气候及水文过程。

目前,国内大多数研究分析金沙江流域的径流特征,将大尺度分布式模型应用在金沙江的研究较少,在金沙江流域展开 VIC 模型的适用性研究,并以此模型为基础进行流域水文特征的分析及未来的水文预测具有一定的意义和创新性。基于此,本文利用大尺度分布式 VIC 水文模型对金沙江流域的水文过程进行模拟,探究模型在模拟金沙江流域水文过程的适用性,并对 CMIP6 发布的 2 种排放情景(SSP2-4.5 和 SSP5-8.5)下的 21 个气候模式的月降水和气温进行降尺度处理,分析气候变化背景下的未来时期的水文要素及径流的变化趋势,研究结果以期为金沙江流域水资源评估与管理、生态综合治理提供一定参考依据。

1 研究区概况

金沙江位于长江上游流域(90°—105°E,24°—36°N),约占长江流域总面积的 26.3%,发源地位于青海省唐古拉山主峰东北部的一座无名山^[26]。蜿蜒流经青藏高原、横断山脉,并横穿过云贵高原,跨越多种地形地貌,承载着丰富的水资源和生态环境。受季风影响,流域内具有典型的高原气候和季风气候特征,气候垂直差异明显^[27]。金沙江流域可以划分为上、中、下 3 段。上段位于青海省玉树藏族自治州境内,该段河流蜿蜒穿过青藏高原,流经高山峡谷,水势湍急,地形险峻;中段和下段则流经四川省、西藏自治区和云南省交界地带,河势渐趋平缓,水流逐渐变得宽广,河谷两岸呈现出丰富的地貌景观,为当地的农业生产和

生态环境提供良好的条件。作为长江上游流域的一部分,金沙江对于长江的水量和水质有着不可替代的作用,同时,金沙江流域的地理位置也决定其在西南地区经济发展和生态保护中的重要地位。金沙江流域概况见图 1。

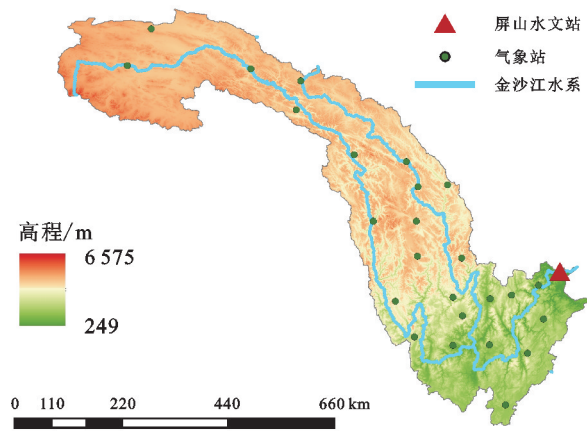


图 1 金沙江流域概况

Fig. 1 Map of Jinsha River Basin

2 数据和模型

2.1 数据来源

本研究所用到的金沙江流域的 DEM 数据来自地理数据空间云(<https://www.gscloud.cn/>);气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),本研究选取流域周边 25 个气象站点(图 1);径流数据来源于屏山水文站的实测数据;土壤性质数据来源于寒区旱区科学中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>);植被数据选用马里兰大学公开发布的全球 1 km 分辨率的土地覆盖类型数据,各类数据信息见表 1。

表 1 VIC 模型输入数据

Table 1 Input data of VIC model

数据类型	数据来源	数据内容	时空精度
数字高程数据	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)	SRTMDEM 数字高程数据	90 m
气象驱动数据	中国气象数据网(http://data.cma.cn/)	全国 699 个气象站点的 70 年日值气象数据集	点数据
实测径流数据	屏山水文站	2000—2015 年实测径流数据	日数据
土地覆盖数据	马里兰大学土地覆盖数据集	全球土地覆盖数据集	1 km
土壤性质数据	寒区旱区科学中心(http://westdc.westgis.ac.cn/)	基于世界土壤数据库中国土壤数据集	5 km

本研究使用的未来气候数据来自于 CMIP6 中可公开获取的 2015—2100 年的全球气候模式数据(<https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>),主要包括 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 2 个情景,ACCESS-CM2 及多模式集合平均 MMEA(multi-model ensemble average)等 21 个 GCM,21 个 CMIP6 下的 GCMs 分别来自于多个国家,其主要信息见表 2。

2.2 研究方法

2.2.1 统计分析方法

(1)Mann-Kendall 趋势检验法

M-K 趋势检验法是一种用于分析时间序列的趋势性变化的统计方法^[28-29],常用于环境科学、水文学、气象学等领域,本研究利用此方法分析水文要素的变化趋势。

表 2 21 种 CMIP6 气候模式基本信息

Table 2 Basic information of 21 CMIP6 climate models

序号	模式名称	国家	分辨率 (纬度网格数×经度网格数)
1	ACCESS-CM2	Australia	144×192
2	ACCESS-ESM1-5	Australia	145×192
3	AWI-CM-1-1-MR	Germany	192×384
4	CanESM5	Canada	64×128
5	CESM2-WACCM	America	192×288
6	CMCC-CM2-SR5	Italy	192×288
7	CMCC-ESM2	Italy	192×288
8	CNRM-ESM2-1	France	128×256
9	EC-Earth3	European Union	256×512
10	EC-Earth3-Veg	European Union	256×512
11	EC-Earth3-Veg-LR	European Union	160×320
12	FGOALS-f3-L	China	180×288
13	GFDL-ESM4	America	180×288
14	INM-CM-4-8	Russia	120×180
15	INM-CM-5-0	Russia	120×180
16	IPSL-CM6A-LR	France	143×144
17	KACE-1-0-G	Korea	144×192
18	MIROC6	Japan	128×256
19	MPI-ESM1-2-HR	Germany	192×384
20	MRI-ESM2-0	Japan	160×320
21	MMEA	—	—

M-K 趋势检验法优势在于所分析的时间序列样本无需满足特定分布规律,并且极少受到异常值的影响,使得分析结果更为可靠。该方法计算简便易行,便于操作。M-K 趋势检验的原理是根据数据序列中每个数据点与其他数据点的大小关系,以判断是否存在趋势性变化。该方法不要求数据服从特定的概率分布,因此在实际应用中具有广泛的适用性。

$$\text{sgn} = \begin{cases} +1 & (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:sgn 为符号函数,根据变量 x_i 、 x_j 的差值而变化。

$$S = \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

式中: k 为样本集总样本个数; S 为正态分布,当 $S > 0$ 时,表示该组要素具有一定的增加趋势,反之则有下降趋势。

$$\sigma(S) = \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}} \quad (3)$$

式中: $\sigma(S)$ 为标准差,当 $n > 10$ 时,标准的正态统计变量由 Z 值计算。

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: Z 为变化趋势的显著性。 Z 值是一种用于量化时间序列变化趋势显著性的统计指标, Z 值代表数据序列的增加或减小趋势的程度。当 $Z > 0$ 时,表明数据序列呈现增加趋势,即随着时间的推移,数据值逐渐增加;而当 $Z < 0$ 时,则表示序列呈现减小趋势,即数据值逐渐减小。 Z 值的绝对大小用于量化这种变化趋势的显著性,通常情况下,取 1.64, 1.96, 2.58 作为显著性的阈值,表明数据序列分别通过 90%, 95%, 99% 的置信区间。

(2) 泰勒图

泰勒图(Taylor Diagram)是用于量化衡量某个对象与验证数据之间的吻合程度^[28]。在对比多种模式或分析它们之间的相对性能时,泰勒图显得尤为有效。泰勒图基于相关系数、中心化均方根误差和标准差的三角余弦关系式构建而成。通过泰勒图可以直观地比较 2 个场之间的差异,无论是模式之间的比较还是模式与观测数据之间的比较。泰勒图将模拟结果与实际观测数据进行对比,以图形化方式展示其吻合程度和差异。通过观察图形的形态可以清晰地揭示模式与观测数据之间的差异,包括偏差、波动等情况,从而更好地评估模式的性能和准确性^[29]。空间相关系数(R)的计算公式为:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r}) / \sigma_f \sigma_r \quad (5)$$

中心化均方根误差(E')的计算公式为:

$$E' = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(f_n - \bar{f}) - (r_n - \bar{r})]^2} \quad (6)$$

模式场的标准差(σ_f)及观测场的标准差(σ_r)的计算公式为:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2} \quad (7)$$

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r})^2} \quad (8)$$

式中: N 为研究区域的总格点数; f_n 为第 n 个格点上的模式值; r_n 为第 n 个格点上的观测值; $\bar{f}$ 为模式值在整个研究区域的平均值; $\bar{r}$ 为观测值在整个研究区域的平均值。其计算公式为:

$$E' = \sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f \sigma_r R \quad (9)$$

泰勒图上模式点到原点的距离反映模式场标准差与观测场标准差之间的比率,而模式点到观测值的

距离则反映模式预测与观测数据之间的差异程度。如果模式点与观测点越接近,通常意味着模拟结果越准确。模式点到原点的连线与底边之间的夹角余弦值表示模式和观测数据之间的相关性。如果夹角余弦值接近 1,则表明模式与观测数据之间具有较高的相关性。本研究用此方法分析不同 GCMs 的模拟效果。

2.2.2 统计降尺度方法与精度评价 在中长期水文情况评估与预测中,气候输入是不可或缺的驱动数据,因此必须将其与气候预报相结合。CMIP 利用 GCM 提供 21 世纪末全球空间尺度的气候变化预测。然而,由于计算资源和输入数据的限制,模型通常无法完全表示局地尺度的气候特征,不利于地方规划的需要。因此,对数据进行降尺度处理是必要的。降尺度方法包括动力降尺度和统计降尺度,其中,统计降尺度由于计算简便且结果较可靠,应用更广泛^[30]。有国内学者提出一种基于 EEMD 方法的统计降尺度方法^[31],该技术利用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)、深层神经网络(multi-layer perceptron, MLP)、贝叶斯模型平均(bayes model averaging, BMA)、马尔科夫链(markov chain, MC)、快速傅里叶转化(fast fourier transforms, FFT)和洗牌算法(shuffle procedure, SP)等方法,有效提高 CMIP 未来预测的精度,降低其不确定性,为模拟未来情景提供有效的驱动数据,并能直接驱动局地尺度的水文模型来模拟未来水文过程。

2.2.3 VIC 模型介绍 VIC 模型作为一种大尺度分布式陆面水文模型,被广泛应用于模拟陆地上的水文过程。其主要特点在于全面考虑土地利用、土壤、植被和气象等因素对水文过程的影响,从而能够更准确地模拟陆地水循环。

VIC 模型考虑不同类型的蒸散发过程,主要包括裸露地面的蒸发、植被的蒸腾及植被冠层截留的水分的蒸发等。这些过程的综合考虑使得 VIC 模型能够较准确地估算不同条件下的蒸散发量。另外, VIC 模型在垂直方向上考虑土壤的分层结构。模型将土壤划分为不同的层次,当中层土壤饱和后,下层土壤开始响应降雨过程。这种分层结构的考虑使得模型能够更好地模拟降水对土壤水分的影响,进而准确预测径流和地下水的变化。

VIC 模型还考虑不同的陆面覆盖类型对土壤水分的影响。它能够综合考虑植被覆盖、土壤类型和地形等因素对水文过程的影响,通过计算陆面覆盖类型的下渗、土壤体积分数、基流和地表径流等参数来实现这一过程。VIC 模型的每个网格单元都具有自己的地表高程、土壤性质、植被覆盖和气象数据,能够独

立计算多种热通量和水文过程^[32]。

VIC 模型能量平衡的计算公式为:

$$R_n = \tau G + S + L \quad (10)$$

式中: R_n 为净辐射; L 为蒸发潜热通量; S 为感热通量; τG 为地表热通量。

$$R_n = (1 - \alpha) R_s + \epsilon (R_L - \sigma T_a^4) \quad (11)$$

式中: R_s 为短波辐射; R_L 为长波辐射; ϵ 为比辐射率; α 为陆面植被地表反射率; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数。

$$H = \frac{\rho_a c_p}{r_h} (T_s - T_a) \quad (12)$$

式中: H 为感热通量; T_s 为地表温度; ρ_a 为空气密度; T_a 为大气温度; c_p 为空气比定压热容。

$$G = \frac{k}{d_1} (T_s - T_1) \quad (13)$$

式中: k 为土壤热传导系数; T_1 为 d_1 深度处的土壤温度。

$$\frac{C_s \cdot (T_1^+ - T_1^-)}{2 \cdot \Delta t} = \frac{G}{d_2} = \frac{k \cdot (T_1 - T_2)}{d_2^2} \quad (14)$$

式中: C_s 为土壤热传导能力系数; T_2 为在深度 d_2 处土壤层的恒定温度; T_1^+ 为时段初土壤层 d_1 处的温度; T_1^- 为时段末在土壤层 d_1 处的温度。结合公式(3)~公式(4)和公式(3)~公式(5)可以得出地表热通量(G):

$$G = \frac{\frac{k}{d_2} (T_s - T_2) + \frac{C_s \cdot d_2}{2 \cdot \Delta t} (T_s - T_1^-)}{1 + \frac{d_1}{d_2} + \frac{C_s \cdot d_1 \cdot d_2}{2 \cdot \Delta t \cdot l}} \quad (15)$$

潜热通量(L)的计算公式为:

$$L = \rho_w L_e E \quad (16)$$

式中: E 为网格内植被蒸腾与蒸发、裸土蒸发之和; L_e 为气化潜热; ρ_w 为液态水密度。

本研究将金沙江流域按 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 划分为 711 个网格单元,每个格网单独计算其陆面产流结果,然后利用汇流程序将产流结果汇集到流域出口。

2.2.4 VIC 模型率定的参数及评价指标 本文将金沙江流域 2000—2009 年作为模型率定期,2010—2015 年作为模型验证期。选取金沙江流域出口控制水文站屏山站 2000—2009 年的日尺度、月尺度径流数据进行率定,将顶薄层土壤的厚度 d_1 设为 0.1 m,通过调试下渗曲线指数(B)、最底层土壤发生的最大基流速率 D_{smax} (D_m)、基流非线性增长发生时与 D_{smax} 的比例(D_s)、基流非线性增长时最底层土壤最大水分含水量的比值(W_s)、第 2,3 层土层深度(d_2 、 d_3)这 6 个参数,各参数的物理意义和取值范围见表 3。本文选取水文学中常用的 Nash-Sutcliffe 模型效率系数(NS)、相关系数(R)和相对偏差(BIAS)来评估模拟性能,

模拟效果评价指标及其公式见表 4。在公式的 3 个评价指标中: $Q_{i,c}$ 为第 i 天的模拟流量; $Q_{i,o}$ 为第 i 天的实测流量; n 为模拟历时的总时长。

表 3 VIC 模型主要参数及取值范围

Table 3 Main parameters and value range of VIC model			
参数	描述	取值范围	单位
B	可变下渗曲线参数	0~0.5	—
D_s	非线性基流与最大基流速率的比例	0~1.0	—
W_s	非线性基流发生时下层土壤与土壤最大含水量的比值	0~1.0	—
d_2	第 2 层土壤厚度	0.1~2.0	m
d_3	第 3 层土壤厚度	0.1~2.0	m
D_m	最大基流速率	1.0~40.0	mm

表 4 模拟效果评价指标及其公式

指标评价名称	公式
Nash-Sutcliffe 效率系数(NS)	$NS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \overline{Q_o})^2 - \sum_{i=1}^n (Q_{i,c} - Q_{i,o})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \overline{Q_o})^2}$
相关性系数(r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \overline{Q_o})(Q_{i,c} - \overline{Q_o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \overline{Q_o})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{i,c} - \overline{Q_o})^2}}$
相对偏差(BIAS)	$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{i,c} - \sum_{i=1}^n Q_{i,o}}{\sum_{i=1}^n Q_{i,o}} \times 100\%$

3 结果与分析

3.1 VIC 模型在金沙江流域的适用性检验

采用历史径流数据对 VIC 在金山江流域的适用性进行检验,参数的率定结果 B 为 0.61, D_s 为 0.21, D_m 为 24, W_s 为 0.91, d_2 为 0.10, d_3 为 1.30。金沙江流域的模型模拟效果评价见表 5。日尺度的模拟结果显示,率定期的 NSE 及相关性系数均超过 0.75($p<0.05$),相对偏差的分析结果为 -0.12;验证期的 NSE 及相关性系数同样超过 0.75($p<0.05$),相对偏差值为 0.02。验证期较率定期而言,NSE 及相关性系数相差不大,而相对偏差值的模拟更加优异。在月尺度上,无论率定期

或者验证期,NS 效率系数及相关性系数的模拟效果均优于日尺度,相对偏差方面,日尺度和月尺度在 2 个时期的结果基本相似。这表明 VIC 模型在金沙江流域无论是在率定期还是验证期,都可较为准确地模拟该流域径流过程。模拟结果的 NSE 均超过 0.6,并且 BIAS 的绝对值都 <0.15 ,符合要求。因此,可以得出 VIC 模型在金沙江流域具有较好的适用性,并且可用于未来情景下对径流及其他水文要素的预测。

表 5 金沙江流域参数模拟结果

Table 5 Parameter simulation results of Jinsha River basin						
计算时段	NS 效率系数(NS)		相关性系数(R)		相对偏差(BIAS)	
	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度
率定期	0.79	0.83	0.85	0.92	-0.12	-0.12
验证期	0.79	0.87	0.79	0.87	0.02	0.02

图 2 为金沙江流域控制水文站屏山站的日尺度模拟流量与实测流量的散点图。通过观察可以发现,图 2 中大部分点均匀分布在拟合线的两侧,说明模拟值与实测值之间的拟合程度较高($R^2=0.78$, $p<0.05$)。进一步观察可以发现,在流量较低的区域,实测流量与模拟流量的点分布更加集中,而在流量较高的区域,点的分布则相对离散。

在率定期的日流量散点图(图 2)可以看出,散点主要集中在轴线左侧,这表明当模拟流量与实测流量处于较低水平时,模拟值与实测值相对均匀地分布在对称轴两侧。然而,当模拟流量与实测流量较高时,部分点偏向于左上方的位置,这说明率定期的 VIC 模型在模拟洪峰时存在一定的低估现象。与率定期相比,验证期的日流量模拟结果的散点分布更加均匀。说明验证期的模拟值与实测值之间的偏差较小,模型的稳定性和可靠性得到提升。

在月尺度的流量模拟过程中(图 3),率定期的点整体分布在轴线左侧,再次印证 VIC 模型在率定期内月尺度的模拟值偏小的情况。而验证期的散点分布相对均匀,与模拟结果相一致,进一步验证模型的稳定性和准确性。

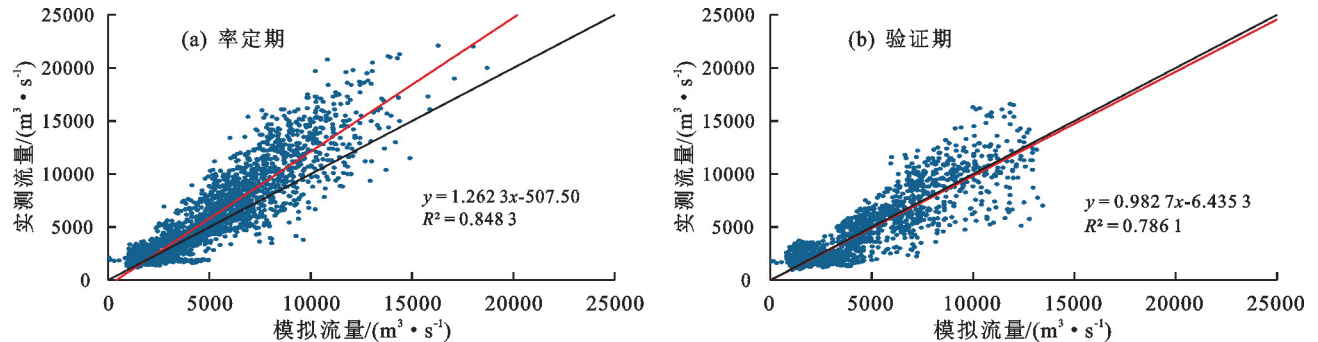


图 2 屏山站日流量实测值与模拟值散点图

Fig. 2 Scatter diagram of measured and simulated daily flow of Pingshan Hydrology Station

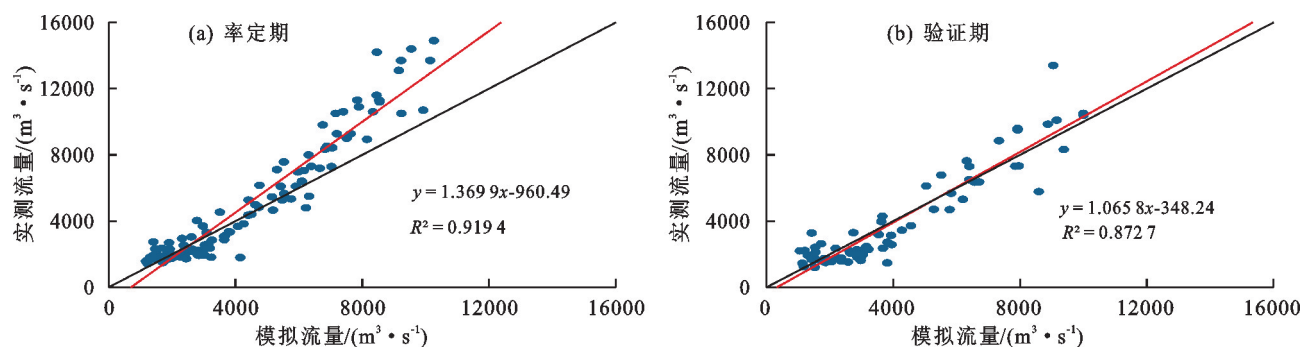


图 3 屏山站月流量实测值与模拟值散点图

Fig. 3 Scatter diagram of measured and simulated monthly discharge of Pingshan Hydrology Station

图 4 和图 5 分别为在率定期和验证期屏山站的日尺度和月尺度实测流量与模拟流量之间的比较情况。从图 4 可以看出,在率定期,洪峰的模拟效果比较理想,

模拟径流的变化趋势与实测径流的变化趋势基本一致。然而,不论是日尺度还是月尺度的对比,模拟流量值均在不同程度上偏低,与之前分析的散点图结果相吻合。

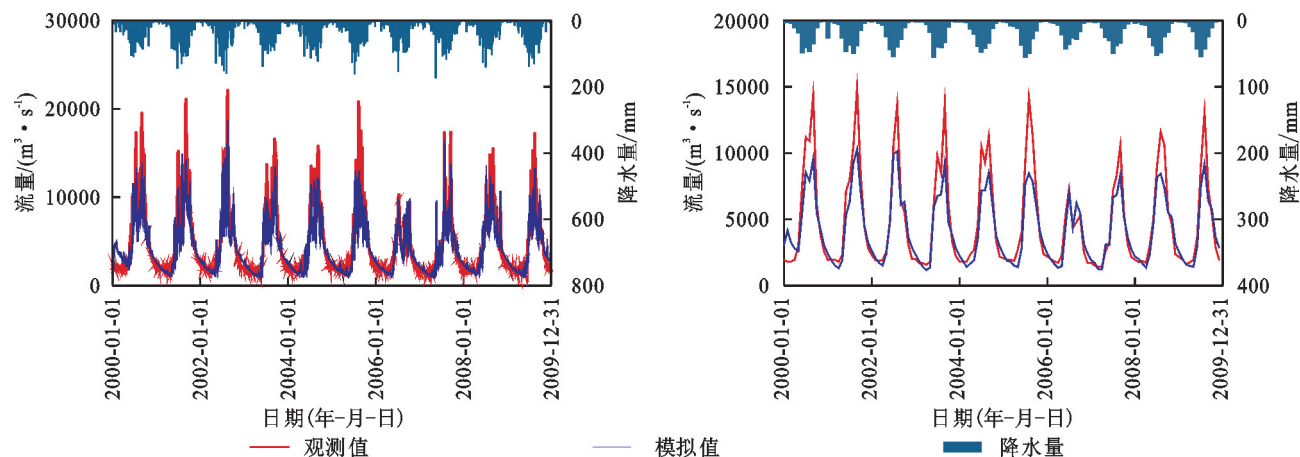


图 4 屏山站率定期(2000—2009)日尺度、月尺度实测与模拟流量值对比

Fig. 4 Comparison of measured and simulated flow values on daily and monthly scales at Pingshan Station rate periodically (2000—2009)

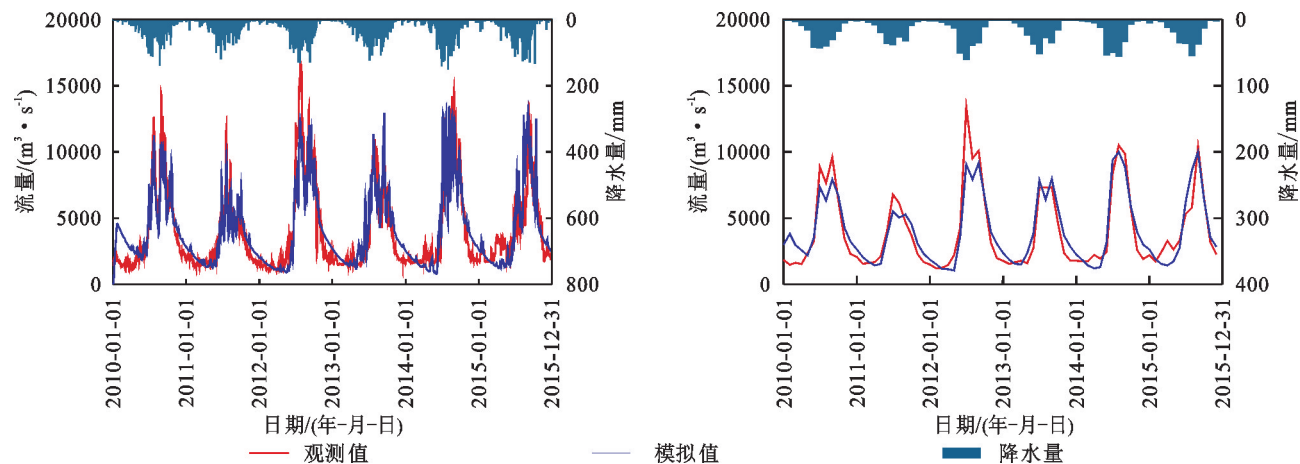


图 5 屏山站验证期(2010—2015)日尺度、月尺度实测与模拟流量值对比

Fig. 5 Comparison of measured and simulated flow values at daily and monthly scales at Pingshan Station during the verification period (2010—2015)

通过分析发现,在率定期模拟中存在模拟值偏低的现象,可能是由于 VIC 模型参数的限制性及气象资料不足所致。在验证期和率定期的模拟开始阶段发现,模拟的径流量值高于实测值,可能是由于模拟过程中的“边缘效应”引起的。

因此,模型的率定期模拟值偏低可能受到参数限

制和气象资料不足的影响,并且在验证期和率定期,模拟开始阶段的径流量值高于实测值,可能与模拟过程中的“边缘效应”有关^[33-34]。

3.2 基于 VIC 模型网格单元的流域水文要素空间趋势分析

本研究从率定期 VIC 模型输出文件中提取金沙

江流域的 4 种关键水文要素数据,分别是每个网格单元对应的多年平均降水量(P)、多年平均蒸散发

(E)、多年平均地表径流(R)和多年平均基流(B)。对这些水文要素数据进行空间可视化处理见图 6。

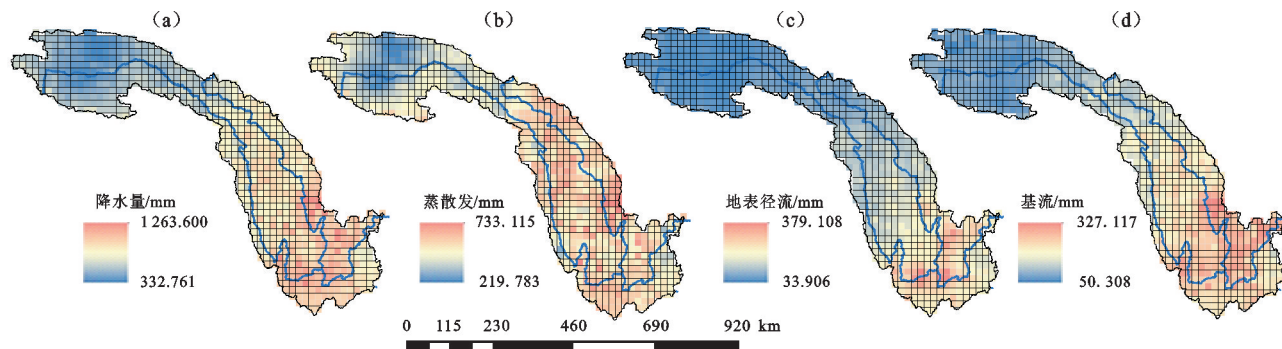


图 6 金沙江流域率定期 4 种水文要素的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of four hydrological elements in the Jinsha River basin

根据 VIC 模型在金沙江流域的输出数据观察到率定期多年平均降水量的值为 332~1 263 mm,降水量低的区域主要分布在上游区域,而降水量高的区域则主要分布在中下游区域。降水量在金沙江流域的空间分布上呈现出上游最低、中游次之、下游最高的显著差异。对于蒸散发数据,其值主要为 219~733 mm。在空间分布上,上游区域的蒸散发值偏低,而中游及下游区域的蒸散发值则偏高。多年平均地表径流的值为 33~379 mm,且在空间分布上呈现出从上游到下游逐渐增加的趋势。同时,多年平均基流的值在 50~327 mm 波动,其空间分布也表现为上游至下游的逐渐增加,上游、中游及下游之间的差异十分明显。根据 4 种 VIC 模型在金沙江流域输出的水文要素,结合流域水量平衡相对误差公式为:

$$\Delta R = \left| \frac{P - E - R - B}{P} \times 100\% \right| \quad (17)$$

根据分析可以得出,金沙江流域率定期的平均水量平衡相对误差(图 7)。水量平衡相对误差为 0.04%~2.58%。进一步观察发现,这一误差在空间分布上呈一定的规律,即上游区域偏高,下游区域偏低。综合可知, VIC 模型对金沙江流域的模拟效果与预期基本一致,说明该模型在该流域的应用效果良好。

以 VIC 模型在金沙江流域率定期为每个网格单元输出的多年平均水文要素数据为基础,运用 M-K 趋势检验法分析各网格单元内数据序列的变化趋势。当 Z 值的绝对值分别超过 2.58, 1.96, 1.64 时,表示通过 99%, 95%, 90% 的置信度检验。从图 8 可以看出,率定期降水量在大部分网格区域表现出不显著的变化趋势,全流域内显著变化的网格占比 24.33%,这些网格在流域中上游表现为显著的上升趋势,而在流域下游的较小区域内则呈显著下降趋势。对于蒸散发,有 18.85% 的网格表现出显著的变化,而大部分网格则无显著变化,其中上游区域的部分网格呈显著上升趋势。

势。地表径流方面,显著变化的网格占比 25.88%。流域中上游的部分网格地表径流呈增加趋势,而中游及下游的部分网格则表现出较显著的降低趋势。对于基流,有 36.43% 的网格显示出显著的变化趋势。在空间分布上,上游区域的变化并不明显,而中游及下游的半数以上网格则呈显著下降趋势。

由此可以得出,金沙江流域率定期的平均水量平衡相对误差(图 7)。由图 8 可以看出,水量平衡相对误差为 0.04%~2.58%,并且在空间上体现为上游区域偏高而下游区域偏低。整体而言, VIC 模型对金沙江流域的模拟效果与预期相符。

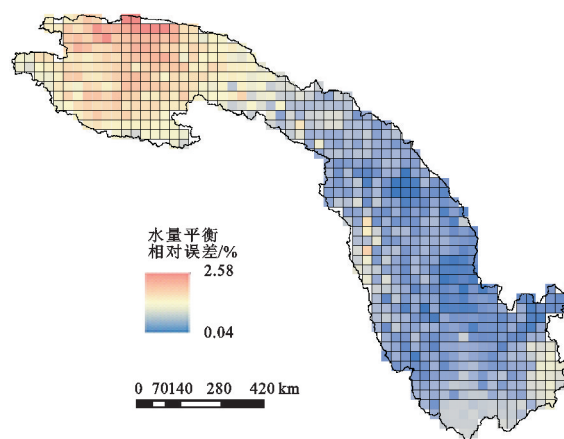


图 7 金沙江流域水量平衡相对误差

Fig. 7 Relative error of water balance in Jinsha River Basin

3.3 基于 CMIP6 气候模式的流域预测

3.3.1 GCM 模拟能力评估 金沙江的上、中、下游因地理空间差异显著,故本研究在这 3 个区域各选 1 个气象站点进行评估。

上游选择伍道梁站(52908),中游选择巴塘站(56247),下游选择昭通站(56586)。为评估这些站点在 2000—2014 年 21 种全球气候模型(GCM)对月尺度最高温度、最低温度和降水量的模拟效果,使用泰勒图法见图 9。

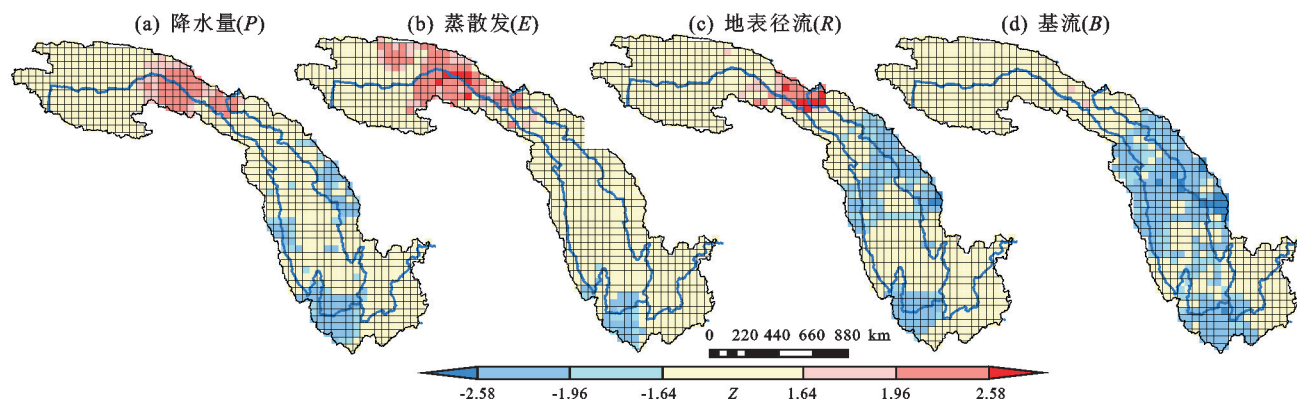


图 8 金沙江流域率定期水文要素 M-K 趋势检验结果

Fig. 8 M-K trend test results of periodic hydrological factors in the Jinsha River basin rate

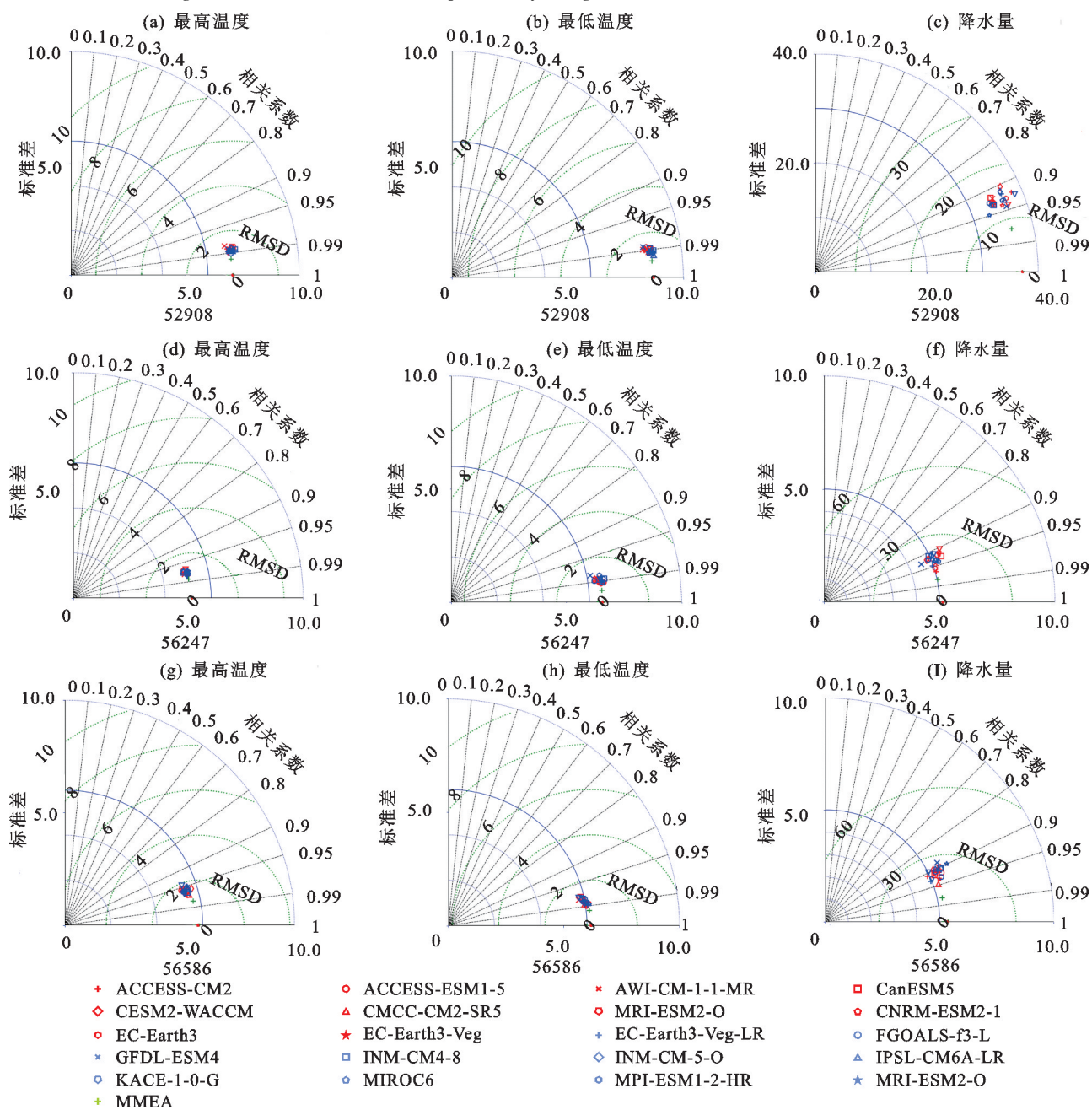


图 9 3 个气象站点 2000—2014 年不同 GCM 相对实测最高温度、最低温度、降水量泰勒图

Fig. 9 Taylor chart of the maximum temperature, minimum temperature and precipitation measured by different GCM at three meteorological stations from 2000 to 2014

在泰勒图中,GCM 模拟值与观测值之间的距离越近,表示该模型的模拟精度越高。各 GCM 在模拟最高温度和最低温度方面均表现出较强的能力。3 个气象站点的最高温度模拟相关系数为 0.95~0.99,其中上游的伍道梁站(52908)的模拟效果最为出色,多模式的相关系数接近 0.99。在最低温度的模拟上,3 个站点的多模式相关性也接近 0.99。在模拟降水量方面,由于降水在时空上具有较大的波动性,GCM 的模拟精度相对较低。3 个站点的多模式相关系数仍然为 0.90~0.95,显示出一定的模拟能力。

对比 20 种单模式和 MMEA 时发现,观测数据与 MMEA 的匹配度最高,表明 MMEA 在模拟效果上明显优于其他气候模式。因此,选择 MMEA 作为预测工具能降低气候模式的不确定性,提高预测的可信度。

3.3.2 基于未来 2 种情景下的未来径流模拟 从图 10 可以看出,在 SSP2-4.5 情景下,未来金沙江流域的逐年平均径流量呈非显著变化,模拟的最小值为 1 043.25 亿 m^3 ,最大值为 1 403.54 亿 m^3 。在 SSP5-8.5 情景下,流域的逐年平均径流量呈现出波动上升趋势,模拟的最小值为 1 072.51 亿 m^3 ,最大值为 1 449.91 亿 m^3 。通过比较 2 个情景下的模拟结果可以明显看出,SSP5-8.5 情景下未来逐年径流量的增长幅度大于 SSP2-4.5 情景下的模拟结果。

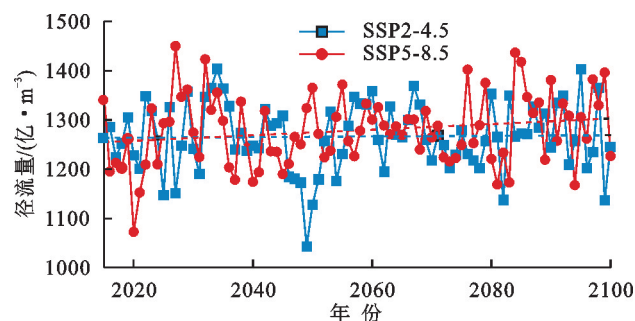


图 10 金沙江流域未来 2 种情景下逐年径流量模拟结果

Fig. 10 Annual runoff simulation results of Jinsha River Basin under two scenarios in the future

图 11 为 2 种情景下模拟的多年平均年内径流量。4 月的多年平均月径流量模拟值最低,而 7 月的模拟值最高。对比 2 个情景的模拟结果发现,除 9 月外,SSP5-8.5 情景下多年内每个月的平均月内径流量模拟值均高于 SSP2-4.5 情景下的相应模拟值。这一对比结果进一步验证在高强迫情景下未来金沙江流域的径流量增加趋势将更加明显。

3.3.3 基于未来 2 种情景下的未来水文分量模拟 经过降尺度处理,本文利用未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景

下的降水、温度及风速的 MMEA 数据来驱动 VIC 模型,模拟金沙江流域未来时期的 4 种关键水文要素,包括多年平均降水量(P)、多年平均蒸散发(E)、多年平均地表径流(R)和多年平均基流(B)。从图 12 可以看出,2 种不同情景下的水文要素空间分布趋势。在 SSP2-4.5 情景中,模拟结果表明,未来多年平均降水量在上游区域显著上升,中下游区域变化不明显,下游的小面积区域则出现显著上升;蒸散发在中上游区域显著上升,中下游部分区域无显著变化,而其他区域则显著上升。地表径流在上游区域呈现不显著的增加趋势,中游区域显著上升,而下游大部分区域变化不显著,仅有小部分区域出现显著下降趋势;基流在上游大部分区域显著上升,而中下游大部分区域则无显著变化,其中中游有部分区域表现出显著的下降趋势。

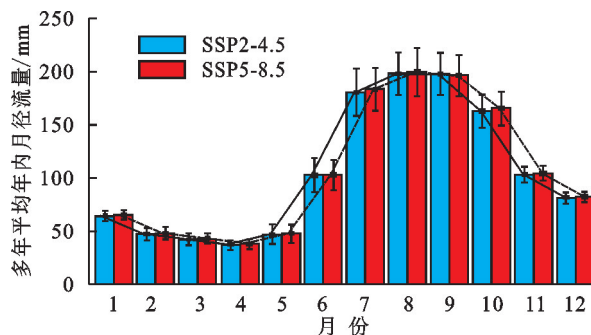


图 11 金沙江流域未来多年平均年内月径流量模拟

Fig. 11 Simulation results of average annual monthly runoff in the Jinsha River Basin in the future

SSP5-8.5 情景下的模拟结果呈现出不同的趋势,多年平均降水量在中上游及下游区域显著上升,中下游的一部分区域则无显著变化;蒸散发几乎在整个流域都呈显著上升趋势;地表径流在上游主要区域呈显著上升趋势,仅上游小面积区域和下游部分区域分别表现为无显著变化和显著性上升,而中下游其他区域则显著下降;基流在上游大部分区域显著上升,而中下游大部分区域则呈显著下降趋势。

对比 2 种情景下的模拟结果可以发现,在 SSP5-8.5 情景下, P 、 R 、 B 3 种水文要素在中上游有更多的网格单元呈显著上升趋势,中游呈显著下降的网格数更多,而下游则有更多网格呈上升趋势。对于 E ,SSP5-8.5 情景下的模拟结果显示,全流域基本上都呈现出显著上升的趋势。表明在更严峻的气候变化情景(SSP5-8.5)下,金沙江流域的水文要素变化更为显著,尤其是蒸散发的增加趋势更为明显。

4 研究意义与展望

本研究基于 VIC 模型对金沙江流域气候变化及水文过程进行模拟分析。结果表明,VIC 模型在金沙

江流域对径流的模拟效果较好,均达到 NS 效率系数 >0.6 且 BIAS 的绝对值 <0.15 的要求。对金沙江流域的水文要素结果分析显示,率定期金沙江流域 P 、 E 、 R 、 B 4 种水文要素具有显著变化趋势的网格数占总网格数的百分比分别是 25.88%, 36.43%, 24.33% 及 18.85%。其次,以 CMIP6 多情景结果作为输入,对未来 2 种情景 (SSP2-4.5 及 SSP5-8.5) 下的 P 、 E 、 R 、 B 4 种水文分量的变化趋势进行分析,结果表明,4 种水文要素在 SSP5-8.5 情景的模拟之下有更多的网格呈显著上升趋势。未来径流的模拟结果显示,在 SSP2-4.5 情景下,未来年平均径流量的变化不明显;

而在 SSP5-8.5 情景下,未来年平均径流量呈小幅增长的趋势。未来多年平均年内月径流量的模拟结果显示,SSP5-8.5 情景下的年内月径流量绝大多数月份大于 SSP2-4.5 情景下的模拟结果。史雯雨等^[35]在金沙江流域的研究表明,金沙江气温呈增加趋势,且未来将呈持续上升趋势;秦鹏程等^[36]基于 CMIP5 多模式预估金沙江流域的未来降水、气温、径流等水文要素,结果呈增加趋势;何旭等^[37]利用 MME 集合平均法对 8 个偏差校正后的 CMIP6 模式进行处理表明,未来金沙江流域中上游的气温、降水等水文要素呈增大和上升趋势。

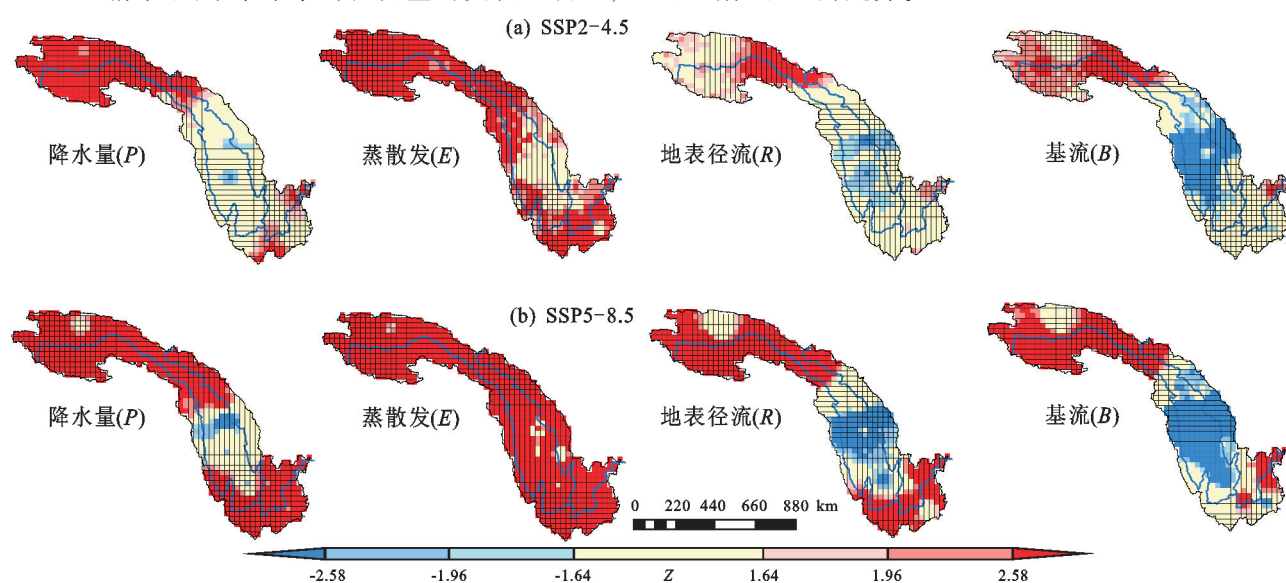


图 12 金沙江流域未来 2 种情景下的水文要素 M-K 趋势检验

Fig. 12 M-K trend test of hydrological elements in the Jinsha River Basin under two scenarios in the future

金沙江流域作为长江流域的上游区域,流域面积较大,上中下游的土壤下垫面条件、气候条件具有较为明显的差异,空间异质性明显,而本研究未对金沙江流域的上中下游进行划分,且仅选择流域的出口水文站屏山站的径流数据,导致结果存在一定的不确定性。在此后的研究中可以将金沙江进行小流域区域性划分,探究不同区域的水文特征,并选择多个水文站数据,以增加模型模拟结果的精确性。目前,VIC 模型已被广泛应用,不同水文模型对径流过程的模拟和预测可能存在一定差异。本研究使用单一的水文模型预估未来的径流存在许多不确定因素^[38],例如,水文模型的结构、模型参数率定等条件^[39]。在未来的研究中,可以考虑采用其他水文模型对研究区域进行进一步的模拟,以确保未来径流情势的预测更加可靠,减少模型误差对结果的影响。

本研究使用 VIC 模型对金沙江流域的径流进行模拟,未考虑源区冰川的影响,对历史时期的径流模拟也未考虑梯级水库对径流的影响,将对模拟结果造

成一定的误差。通过采用 MME(多模式集合)方法,有效降低由 GCM(全球气候模型)异质性带来的不确定性,从而提高预测的准确性。本研究仅聚焦于气候变化,未考虑未来人类活动^[40](例如,梯级水库、土地利用与覆被变化)对径流预估的不确定性影响。未来的研究需综合考虑径流变化的多种驱动因子,尤其是人类活动的影响,更深入地分析流域未来径流变化情况。

5 结论

(1)以金沙江流域为研究对象,基于金沙江流域出口水文站屏山站 2000—2015 年的实测径流数据构建大尺度分布式 VIC 水文模型,无论率定期还是验证期,VIC 模型在金沙江流域对径流的模拟效果较好,均达到 NS 效率系数 >0.6 且 BIAS 的绝对值 <0.15 的要求。结果表明,VIC 模型在金沙江流域的适用性较好,并且可以用于未来情景下径流及其他水文要素的预估。

(2)对每个网格单元的降水量(P)、蒸发量(E)、地表径流(R)和基流(B)4种多年平均水文要素进行空间可视化处理,并进行 M-K 趋势性检验,结果表明,率定期金沙江流域 P 、 E 、 R 、 B 4种水文要素具有显著变化趋势的网格数占总网格数的百分比分别为 25.88%,36.43%,24.33%及 18.85%。

(3)比较未来不同 GCM 模式的模拟情况,MMEA 的模拟效果最优,以 MMEA 的数据为基础,对未来 2 种情景(SSP2-4.5 及 SSP5-8.5)下的 P 、 E 、 R 、 B 4种水文分量的变化趋势进行分析,结果表明,4种水文要素在 SSP5-8.5 情景的模拟之下有更多的网格呈显著上升趋势。未来径流的模拟结果显示,在 SSP2-4.5 情景下,未来年平均径流量的变化不明显;而在 SSP5-8.5 情景下,未来年平均径流量呈小幅增长的趋势。未来多年平均年内月径流量的模拟结果显示,SSP5-8.5 情景下的年内月径流量绝大多数月份大于 SSP2-4.5 情景下的模拟结果。

参考文献:

- [1] 王中根,刘昌明,左其亭,等.基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J].地理科学进展,2002,21(5):430-439.
WANG Z G, LIU C M, ZUO Q T, et al. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM[J].Progress In Geography,2002,21(5):430-439.
- [2] 赵人俊.流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M].北京:水利电力出版社,1984.
ZHAO R J. Hydrological simulation of watershed: Xin'An-jiang model and northern Shaanxi model[M].Beijing: Water Resources and Electric Power Publishing House,1984.
- [3] ABBOTT M B, Refsgaard J C.分布式水文模型[M].郝芳华,王玲译.郑州:黄河水利出版社,2003.
ABBOTT M B, Refsgaard J C. Distributed hydrological modelling[M]. HAO F H, WANG L. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Publishing House,2003.
- [4] 徐宗学,程磊.分布式水文模型研究与应用进展[J].水利学报,2010,41(9):1009-1017.
XU Z X, CHENG L. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models[J].Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(9):1009-1017.
- [5] 汪伟,方秀琴,杜晓彤,等.基于 VIC 模型的柳江流域分布式水文模拟与应用[J].水土保持研究,2020,27(3):328-335.
WANG W, FANG X Q, DU X T, et al. Distributed hydrological simulation and application in Liujang River Basin based on VIC model[J].Research of Soil and Water Conservation,2020,27(3):328-335.
- [6] NIJSSEN B, LETTENMAIER D P, LIANG X, et al. Streamflow simulation for continental-scale river basins [J].Water Resources Research,1997,33(4):711-724.
- [7] ABDULLA F A, LETTENMAIER D P, WOOD E F, et al. Application of a macroscale hydrologic model to estimate the water balance of the Arkansas-Red River Basin [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,1996,101:7449-7459.
- [8] 何思为,南卓铜,张凌,等.用 VIC 模型模拟黑河上游流域水分和能量通量的时空分布[J].冰川冻土,2015,37(1):211-225.
HE S W, NAN Z T, ZHANG L, et al. Spatial-temporal distribution of water and energy fluxes in the upper reaches of the Heihe River simulated with VIC model[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2015,37(1):211-225.
- [9] 宋星原,余海艳,张利平,等.VIC 陆面水文模型在白莲河流域径流模拟中的应用[J].水文,2007,27(2):40-44.
SONG X Y, YU H Y, ZHANG L P, et al. Application of VIC land surface hydrological model in flow simulation of Bailian River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2007,27(2):40-44.
- [10] 金君良,王国庆,刘翠善,等.大尺度分布式水文模型 VIC 在嘉陵江流域径流模拟中的应用[J].水资源与水工程学报,2012,23(1):55-58.
JIN J L, WANG G Q, LIU C S, et al. Application of large scale distributed hydrological model to runoff simulation in Jialingjiang River Basin[J].Journal of Water Resources and Water Engineering,2012,23(1):55-58.
- [11] 韩潇,张亚萍,周国兵,等.基于 VIC 模型的涪江流域径流模拟[J].水文,2022,42(5):76-81.
HAN X, ZHANG Y P, ZHOU G B, et al. Discharge simulation based on VIC model over the Fujiang River Basin [J].Journal of China Hydrology,2022,42(5):76-81.
- [12] 孙晓露,任政,龚家国,等.基于 CMIP5 模式与 VIC 模型耦合的滦河流域未来气候及径流变化研究[J].中国农村水利水电,2023(3):39-46.
SUN X L, REN Z, GONG J G, et al. Future climate and runoff changes in the Luanhe River Basin based on CMIP5 coupled with VIC model[J].China Rural Water and Hydropower,2023(3):39-46.
- [13] GLEICK P H. Climate change, hydrology, and water resources[J].Reviews of Geophysics,1989,27(3):329-344.
- [14] SUN J L, LEI X H, TIAN Y, et al. Hydrological impacts of climate change in the upper reaches of the Yangtze River Basin[J].Quaternary International,2013,304:62-74.
- [15] 郭生练,郭家力,侯雨坤,等.基于 Budyko 假设预测长江流域未来径流量变化[J].水科学进展,2015,26(2):151-160.
GUO S L, GUO J L, HOU Y K, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River Basin [J]. Advances in Water Science, 2015,26(2):151-160.
- [16] 庞凯文.气候变化对黄河流域水资源空间均衡的影响评

- 估[D].郑州:华北水利水电大学,2023.
- PANG K W. The impact assessment of climate change on spatial equilibrium of water resources in the Yellow River Basin[D].Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power,2023.
- [17] 易东英.基于 CMIP6 气候模式的黄河源区径流模拟与分析[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2022.
- YI D Y. Simulation and analysis of runoff in the source region of the Yellow River based on CMIP6 climate model [D].Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2022.
- [18] JIANG D B, HU D, TIAN Z P, et al. Differences between CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate over China and the East Asian monsoon[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*,2020,37(10):1102-1118.
- [19] 张丹,梁瀚续,何小聪,等.基于 CMIP6 的金沙江流域径流及水文干旱预估[J].*水资源保护*,2023,39(6):53-62.
- ZHANG D, LIANG H X, HE X C, et al. Estimation of runoff and hydrological drought in the Jinsha River Basin based on CMIP6[J].*Water Resources Protection*, 2023,39(6):53-62.
- [20] 张建云,王国庆.气候变化对水文水资源影响研究[M].北京:科学出版社,2007.
- ZHANG J Y, WANG G Q. Research on the impact of climate change on hydrology and water resources[M]. Beijing: Science Press,2007.
- [21] NIJSSEN B, O'DONNELL G M, LETTENMAIER D P, et al. Predicting the discharge of global rivers[J]. *Journal of Climate*,2001,14(15):3307-3323.
- [22] 吴志勇,郭红丽,金君良,等.气候变化情景下黑河流域极端水文事件的响应[J].*水电能源科学*,2010,28(2):7-9.
- WU Z Y, GUO H L, JIN J L, et al. Extreme hydrologic event response to climate change scenario in Heihe Basin [J].*Water Resources and Power*,2010,28(2):7-9.
- [23] 郑巍斐,杨肖丽,程雪蓉,等.基于 CMIP5 和 VIC 模型的长江上游主要水文过程变化趋势预测[J].*水文*,2018,38(6):48-53.
- ZHENG W F, YANG X L, CHENG X R, et al. Prediction of major water cycle change over Upper Yangtze River based on CMIP5 and VIC model[J]. *Journal of China Hydrology*,2018,38(6):48-53.
- [24] COATS R, LEWIS J, SCHLADOW G. Projected climate change impacts in the Tahoe Basin: Recent findings from global climate models [J]. *Quaternary International*, 2022,621:4-15.
- [25] 康丽莉,LEUNG L R,柳春,等.黄河流域未来气候-水文变化的模拟研究[J].*气象学报*,2015,73(2):382-393.
- KANG L L, LEUNG L R, LIU C, et al. Simulative study of future climate and hydrological change over the Yellow River Basin[J].*Acta Meteorologica Sinica*,2015,73(2):382-393.
- [26] 张信宝,文安邦.长江上游干流和支流河流泥沙近期变化及其原因[J].*水利学报*,2002,33(4):56-59.
- ZHANG X B, WEN A B. Variations of sediment in upper stream of Yangtze River and its tributary[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2002,33(4):56-59.
- [27] 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):104-110.
- JU Y, ZHANG K, LI B F, 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.
- [28] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*,1945,13(3):e245.
- [29] KENDALL M G. Rank correlation methods[J]. *British Journal of Psychology*,1990,25(1):86-91.
- [30] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,2001,106(D7):7183-7192.
- [31] 肖雨佳.CMIP6 模式对青藏高原降水的模拟和预估[D].北京:中国气象科学研究院,2021.
- XIAO Y J. Simulation and projection of precipitation over Tibetan Plateau by CMIP6 models[D].Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences,2021.
- [32] AHMED K F, WANG G L, SILANDER J, et al. Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U. S. northeast [J].*Global and Planetary Change*,2013,100:320-332.
- [33] 庞建壮,张会兰,许行,等.一种基于 EEMD 方法对气象输入数据频率分解的统计降尺度方法[P].北京:CN117290712A, 2023-12-26.
- PANG J Z, ZHANG H L, XU X, et al. A statistical downscaling method based on EEMD method for frequency decomposition of meteorological input data[P]. Beijing: CN117290712A,2023-12-26.
- [34] 冯雨菲.基于地表-地下联合模拟的挠力河流域未来水资源量评估[D].辽宁 大连:大连理工大学,2021.
- FENG Y F. Assessment of future water resources in the naoli river basin Based on Surface-Subsurface Simulation[D]. Dalian, Liaoning:Dalian University of Technology,2021.
- [35] 史雯雨,杨胜勇,李增永,等.近 57 年金沙江流域气温变化特征及未来趋势预估[J].*水土保持研究*,2021,28(1):211-217.
- SHI W Y, YANG S Y, LI Z Y, et al. Variation characteristics and the future trend estimation of temperature in chinsha river basin over the past 57 years[J].*Research of Soil and Water Conservation*,2021,28(1):211-217.

(下转第 314 页)

- Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [21] BAO S N, IBROM A, WOHLFAHRT G, et al. Narrow but robust advantages in two-big-leaf light use efficiency models over big-leaf light use efficiency models at ecosystem level[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 326: e109185.
- [22] 朱安然, 孙睿, 王梦佳. 植被光能利用率遥感估算[J]. 遥感学报, 2021, 25(6): 1227-1243.
- ZHU A R, SUN R, WANG M J. Estimation of light use efficiency by using remote sensing data[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(6): 1227-1243.
- [23] ZHANG Y H, HU Z W, WANG J Z, et al. Temporal upscaling of MODIS instantaneous FAPAR improves forest gross primary productivity (GPP) simulation[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 121: e103360.
- [24] RUNNING S W, ZHAO M. MOD17 user's guide. Daily GPP and annual NPP (MOD17A2/A3) products NASA earth observing system MODIS land algorithm[EB/OL]. [2015-10-07]. <http://modis.gsfc.nasa.gov>.
- [25] LIU L Y, LIU X J, CHEN J D, et al. Estimating maize GPP using near-infrared radiance of vegetation [J]. Science of Remote Sensing, 2020, 2: e100009.
- [26] CHEN S Y, SUI L C, LIU L Y, et al. Effect of the partitioning of diffuse and direct APAR on GPP estimation[J]. Remote Sensing, 2022, 14(1): e57.
- [27] HE M Z, JU W M, ZHOU Y L, et al. Development of a two-leaf light use efficiency model for improving the calculation of terrestrial gross primary productivity[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 173: 28-39.
- [28] ZHANG H L, BAI J, SUN R, et al. An improved light use efficiency model by considering canopy nitrogen concentrations and multiple environmental factors[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 332: e109359.
- [29] 徐静馨, 郑有飞, 王圣, 等. O_3 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4725-4732.
- XU J X, ZHENG Y F, WANG S, et al. Simulated ozone damage on gross primary productivity (GPP) in a winter wheat field[J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4725-4732.
- [30] KING D A, TURNER D P, RITTS W D. Parameterization of a diagnostic carbon cycle model for continental scale application[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(7): 1653-1664.
- [31] XU Z Z, ZHOU G S. Effects of water stress and nocturnal temperature on carbon allocation in the perennial grass, *Leymus chinensis* [J]. Physiologia Plantarum, 2005, 123(3): 272-280.
- [32] PEI Y Y, DONG J W, ZHANG Y, et al. Evolution of light use efficiency models: Improvement, uncertainties, and implications[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 317: e108905.
- (上接第 284 页)
- [36] 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 P C, LIU M, DU L M, et al. Climate change impacts on runoff in the Upper Yangtze River Basin[J]. Climate Change Research, 2019, 15(4): 405-415.
- [37] 何旭, 缪子梅, 田佳西, 等. 基于 CMIP 6 多模式的长江流域气温、降水与径流预估[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(2): 1-8.
- HE X, MIAO Z M, TIAN J X, et al. Temperature, precipitation and runoff prediction in the Yangtze River Basin based on CMIP 6 multi-model [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(2): 1-8.
- [38] 王媛, 苏布达, 王艳君, 等. “双碳”情景下抚河流域径流变化特征[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(2): 44-51.
- WANG Y, SU B D, WANG Y J, et al. Streamflow change in Fuhe River Basin under China's dual-carbon scenario [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(2): 44-51.
- [39] 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.
- [40] 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 L Q, BAI Q Y, LIU Y H. Propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 57-62.