

基于CMIP6和VIC模型的湘江流域未来水文过程变化预测

汤玉莹

湖南师范大学地理科学学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年3月5日; 录用日期: 2025年4月6日; 发布日期: 2025年4月17日

摘要

随着全球气候变化的加剧, 其对流域水文过程的影响日益显著。湘江流域作为中国南方重要的水资源区域, 其径流变化不仅直接影响区域水资源的可持续利用, 还对生态安全和社会经济发展具有深远意义。本研究基于VIC (Variable Infiltration Capacity) 水文模型, 结合第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)气候模式数据, 系统预测未来变化情况。研究结果显示, 湘江流域未来时期(2020~2099年)的气候及径流变化在时间和空间尺度上均表现出显著特征。年际尺度上, 在SSP2-4.5 (中等排放情景)和SSP5-8.5 (高排放情景)下, 未来时期降水量和平均温度均呈现增加趋势, 且高排放情景下增幅更为显著; 径流量在两个情景下均显著增加, 中等排放情景下增幅更大。年代尺度上, 2020s、2030s和2060s为降水与径流枯水期, 2040s、2050s、2070s、2080s和2090s则为丰水期。SSP2-4.5情景下极端降水和径流事件可能集中在2040s、2080s和2090s, 而SSP5-8.5情景下则可能出现在2040s和2070s; 径流量时间分布与降水变化高度一致, 进一步验证了降水是径流变化的主导驱动因子, 湘江流域未来径流变化主要是由降水引起。这些研究为未来流域水资源管理和自然灾害预防提供了重要参考。

关键词

CMIP6和VIC模型, 湘江流域

Projection of Future Hydrological Process Variations in the Xiangjiang River Basin Based on CMIP6 and VIC Models

Yuying Tang

College of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha Hunan

Received: Mar. 5th, 2025; accepted: Apr. 6th, 2025; published: Apr. 17th, 2025

Abstract

With the intensification of global climate change, its impacts on hydrological processes in river basins are becoming more and more significant. As an important water resource region in southern China, the runoff changes in the Xiangjiang River Basin not only directly affect the sustainable utilization of regional water resources, but also have far-reaching significance on ecological security and socio-economic development. This study is based on the VIC (Variable Infiltration Capacity) hydrological model, combined with the climate model data from the Sixth International Coupled Model Intercomparison Program (CMIP6), to systematically predict future changes. The results show that the climate and runoff changes in the Xiangjiang River Basin in the future period (2020~2099) exhibit significant features at both temporal and spatial scales. At the interannual scale, both precipitation and mean temperature show increasing trends in the future period under SSP2-4.5 (medium emission scenario) and SSP5-8.5 (high emission scenario), and the increase is more significant under the high emission scenario; runoff increases significantly under both scenarios, and the increase is greater under the medium emission scenario. On the chronological scale, the 2020s, 2030s, and 2060s are dry periods for precipitation and runoff, and the 2040s, 2050s, 2070s, 2080s, and 2090s are abundant periods. Extreme precipitation and runoff events are likely to be concentrated in the 2040s, 2080s, and 2090s under the SSP2-4.5 scenario, and the 2040s, 2080s, and 2090s under the SSP5-8.5 scenario 2040s and 2070s. The temporal distribution of runoff is highly consistent with precipitation changes, which further verifies that precipitation is the dominant driving factor of runoff changes, and future runoff changes in the Xiangjiang River Basin are mainly caused by precipitation. These studies provide important references for future water resource management and natural disaster prevention in the basin.

Keywords

CMIP6 and VIC Models, Xiangjiang River Basin

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水文过程是一个复杂且受自然和人类活动共同影响的过程。长期以来，世界各国学者为了解释水文过程规律做出了巨大努力。随着学者对水文过程的深入了解，开始建立概念性水文模型，Freeze 和 Harlan 于 1969 年最先提出分布式流域模型，用参数和权重体现区域差异，开始考虑更复杂但对径流影响很大的地形、植被、土地利用和气象变化等因素[1]。本研究使用的 VIC (Variable Infiltration Capacity)模型由 Washington 大学、California 大学 Berkely 分校以及 Princeton 大学的研究者基于 Wood 等人[2] [3]的思想共同研制出的大尺度分布式水文模型，是一种基于 SVATS (Soil Vegetation Atmospheric Transfer Schemes)思想的大尺度分布式水文模型，称为“可变下渗力模型”。水文模型现在被认为是水和环境资源管理的一个重要和必要的工具，水文模型因其有助于模拟与气候变化相关的水分平衡变化而得到越来越多水文学者的应用[4]-[6]。

在世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)的耦合模拟工作组(WGCM)主持下，耦合模型比较项目(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)开始了。迄今为止，WGCM 已经组织了 6 次模式比较计划，其中 CMIP6 是第六次耦合模型比较计划。相较于 CMIP5 计划，CMIP6 提出了共享

社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs), 有了较大的进步[7][8]。CMIP6 作为一个复杂且庞大的国际气候合作项目, 汇聚了全球众多科研机构和学者的智慧, 为深入探讨气候变化规律、评估未来气候风险以及制定应对策略提供了强有力的科学支撑[9]。

流域预测研究是水文学和气象学领域中的一个重要方向, 是对未来气候和径流变化进行合理应对的有效手段。将水文模型与未来气候情景下的气象数据结合起来预测未来径流也是现在常用且优秀的手段[10]。主要是以未来的气象数据驱动水文模型[11], 从而预测未来径流的变化。将水文模型与 GCM 结合起来预测未来径流已广泛应用于国内外的研究中。在长江流域利用 54 个气候变化模拟集合评估了中国长江流域(YRB)对未来气候变化的水文响应[12]。Gu 采用 31 个 CMIP5 模式[13], 预估了中国 151 个中小流域的未来径流变化及其对未来干旱变化的影响。

为了应对气候变化对水资源管理和自然灾害预防的挑战, 我们在湘江流域建立了 VIC 分布式水文模型, 对陆面水文过程进行了研究[14]。为了预测未来径流, 我们采用等距离累积分布函数方法(EDCDFm)降尺度偏差校正后的 CMIP6 数据来驱动 VIC 模型, 以便更准确地评估未来气候变化对径流的影响。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

湘江, 作为长江流域的重要支流之一, 不仅是湖南省的母亲河, 也是中国中部地区水资源的重要组成部分。湘江流域横跨东经 110°至 114°, 北纬 24.5°至 28.5°之间, 地处北半球的亚热带地区, 拥有广阔的流域面积, 大约为 94,660 平方公里。湘江流域的气候条件十分典型, 属于亚热带季风气候, 其年平均气温约为 17℃, 温暖湿润。流域的多年平均年降水量达到 1470.9 毫米, 降水量的年内分布呈现出明显的单峰状特征。湘江流域是一个人口密集、经济发达的区域, 拥有众多城市, 是中国中部地区最发达的区域之一。湘江不仅为该地区的工农业生产提供了宝贵的水资源, 同时也是当地居民生活用水的重要来源。

2.2. VIC 模型参数

本研究在湘江流域自南向北选取了来源于湖南省水利厅水文水资源的湘潭水文站点的日径流数据作为整个流域的径流量, 时间跨度为 1960~2019 年, 主要用于水文模型参数的率定和验证。本研究选取了湘江流域及周边 127 个气象站的逐日降水、最高气温、最低气温和风速插值到湘江流域 0.125°分辨率网格用于制作 VIC 模型的输入强迫数据。植被参数源自欧洲空间局(ESA)发布的全球 300 米分辨率土地覆被分类产品; 土壤数据输入划分为 0~30 cm 表层土壤和 30~100 cm 亚表层土壤; 地形数据采用航天飞机雷达地形测绘任务(SRTM)获取的 90 米空间分辨率数字高程模型。

2.3. VIC 模型率定和验证

研究时段(1960~2019)被划分为两个连续阶段——前 30 年(1960~1989)作为参数率定期, 后 30 年(1990~2019)作为模型验证期。然后在验证期内用率定好的参数运行模型, 评价模型在验证期内对径流的模拟表现。模型对径流的模拟表现评价主要通过 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)和决定系数(R^2)和相对误差(Bias), 表达式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_o - Q_s)^2}{\sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2}$$

$$R^2 = \frac{[\sum (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_s - \bar{Q}_s)]^2}{\sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum (Q_s - \bar{Q}_s)^2}$$

$$\text{Bias} = \frac{\sum(Q_s - Q_o)}{\sum Q_o} \times 100\%$$

式中 Q_o 和 Q_s 分别为月尺度观测和模拟的径流量； $\overline{Q_o}$ 和 $\overline{Q_s}$ 为月尺度观测和模拟径流量均值。 NSE 和 R^2 的值越接近 1，同时 $Bias$ 的值越接近 0，则表示模拟效果越好，VIC 模型表现越好。

2.4. CMIP6 模式数据

全球气候模式(Global Climate Models, GCMs)可以详细描述大气运动、热量交换和海 - 陆 - 气 - 冰相互作用等随时间的变化[15]，是研究气候变化和对未来气候描述的有效工具。基于数据的完整性，本研究筛选了来自五个不同国家的 6 个模型(CanESM5、FGOALS-g3、GFDL-CM4、IPSL-CM6A-LR、MPI-ESM1-2-HR 139 和 MRI-ESM2-0) (见表 1) [16]，并提取研究区历史时期 1975~2015 年以及 SSP2-RCP4.5 (SSP2-4.5)与 SSP5-RCP8.5 (SSP5-8.5)排放情景下未来时期 2015~2099 年的模拟数据(见表 2)。数据包括过去和未来时期的日降水、日最高温、日最低温和日平均风速数据来进行研究。

Table 1. Basic information on the six CMIP6 global climate models
表 1. 六个 CMIP6 全球气候模式的基本信息

模式名称	本文缩写	机构	国家
CanESM5	Can	加拿大环境部气候模拟与分析中心	加拿大
FGOALS-g3	FGO	中国科学院	中国
GFDL-CM4	GFDL	美国国家海洋和大气管理局普林斯顿地球物理流体动力学实验室	美国
IPSL-CM6A-LR	IPSL	皮埃尔 - 西蒙拉普拉斯研究所	法国
MPI-ESM1-2-HR	MPI	马克斯普朗克气象研究所	德国
MRI-ESM2-0	MRI	筑波气象研究所	日本

Table 2. Future climate scenarios and implications
表 2. 未来气候情景及含义

	情景名称	路径	排放情况
历史模型(1985~2014)	Historical		历史条件
未来模型(2020~2099)	SSP2-4.5	中等未来强迫路径	未来二氧化碳排放量在本世纪中叶开始下降之前徘徊在当前水平，到 2100 年不会达到净零
	SSP5-8.5	高未来强迫路径	开采化石燃料和能源密集、无节制，目前的二氧化碳排放水平到 2050 年大约翻一番。

2.5. 等距累积概率分布匹配法(EDCDFm)

为了驱动 VIC 模型，我们将 CMIP6 模型数据插值入湘江流域 0.125°分辨率内的网格中。紧接着将各个 GCM 逐网格的日最高气温、日最低气温和日降水量基于实测数据对应格点序列的累积分布函数(CDF)进行偏差校正(Bias Correction, BC)以保证数据更可靠性。本研究采用 Li [17]提出的等距离累积分布函数法(EDCDFm)，在历史期将模式变量的 CDF 修正为和实测数据一致，未来情景的模式输出则根据模式历史期与实测数据等距累积概率分布匹配的 CDF 差值进行修正，此方法能有效捕捉气候要素极值，提高模式降尺度后的准确度和模型模拟的精度。EDCDFm 的公式如下：

$$x_{m-c.adjst.} = F_{o-c}^{-1} \left(F_{m-c} \left(x_{m-c} \right) \right)$$

$$x_{m-p,adjst.} = x_{m-p} + F_{o-c}^{-1} \left(F_{m-p} \left(x_{m-p} \right) \right) - F_{m-c}^{-1} \left(F_{m-p} \left(x_{m-p} \right) \right)$$

式中 $x_{m-c,adjst.}$ 和 $x_{m-p,adjst.}$ 分别为历史时期和未来时期校正后的气象数据, F_{o-c} 、 F_{m-c} 和 F_{m-p} 分别为实测历史时期、模型历史时期和模型未来时期的累积分布函数, x_{o-c} 、 x_{m-c} 和 x_{m-p} 分别为实测历史时期、模型历史时期和模型未来时期的气象因子值。

3. 结果分析

3.1. VIC 模型模拟效果评估

图 1 展示了研究流域 VIC 模拟的 1960~2019 月径流与实测月径流对比图无论是率定期还是验证期, VIC 模拟的月径流与实测流量很好吻合, 模拟的汛期和枯水期径流量、出现时间与实测值基本一致。在整个时期流域的 NSE、 R^2 都为 0.91, Bias 为 2.12%。VIC 模型在长年月尺度上径流过程进行了很好的再现, 充分证明了该模型在模拟湘江流域水文过程方面的适用性和准确性。将率定好的模型参数用于整个研究时段模拟, 将其作为基准情景, 并以 CMIP6 未来数据驱动模型以得到未来气候、径流变化情况。

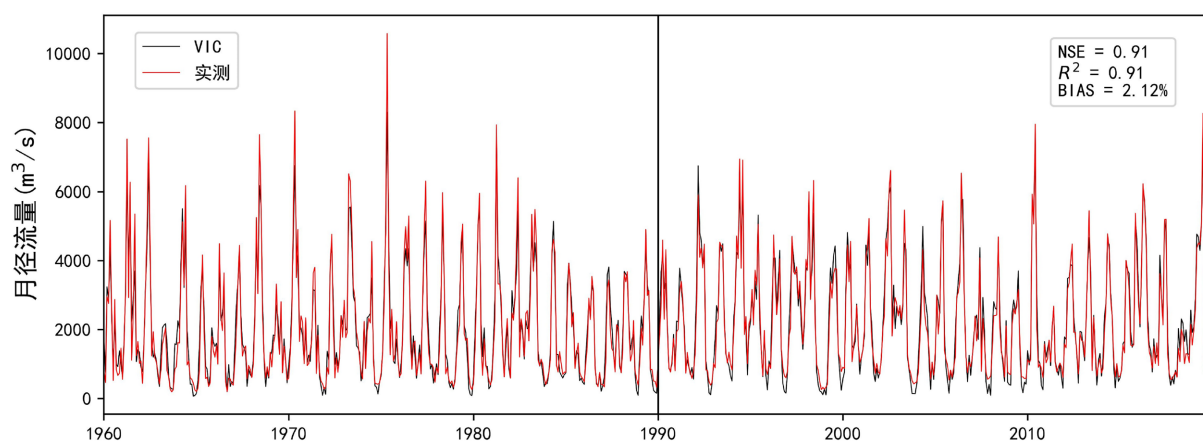


Figure 1. Comparison of observed and simulated runoff on monthly time scales for the calibration and validation periods in the Xiangjiang River Basin (red and black lines are measured and simulated runoff, respectively). The left side of the black demarcation line is the calibration period and the right side is the validation period

图 1. 湘江流域校准期和验证期月时间尺度的观测和模拟径流的比较(红色和黑线条分别为实测径流和模拟径流)。黑色分界线左侧为校准期, 右侧为验证期

3.2. CMIP6 模拟精度变化

通过统计降尺度偏差校正后, 基于气候模式的年降水量、年蒸散量和年径流量在历史期(1985~2014 年)的模拟误差显著减小, 表明经过校正的模式驱动数据能够更准确地反映实际水文过程, 从而使得多年平均尺度的水文模拟结果更加可靠。为了验证校正后数据的准确性, 本文将采用的 6 个 CMIP6 模型在校正前与校正后结果与基于观测数据的年降水量和年径流量在历史期内各个流域进行了详细对比(见图 2)。偏差校正后, 每个模型的年降水量、年蒸散量和年径流深均更接近实测值, 且与观测数据之间的偏差显著减小, 校正效果尤为显著; 年蒸散量的模拟结果、年径流深的模拟结果在校正后与实测值的偏差明显缩小, 校正后的径流模拟结果更加符合实际水文情势。

3.3. 未来气候变化分析

对于降尺度计算结果, 我们对模型性能进行了系统评估。结果表明, EDCDFm 偏差校正后的模型数据能够很好的反应湘江流域的气候、水文过程。基于这一可靠的偏差校正基础, 我们将进一步深入分析

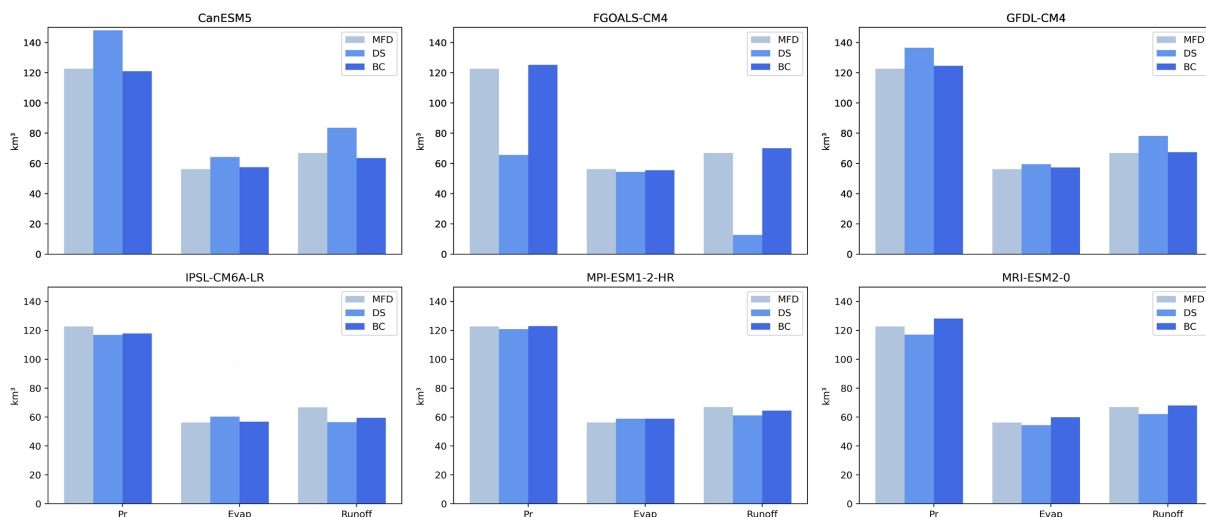


Figure 2. The annual precipitation, annual evapotranspiration, and total annual runoff of the watershed averaged over many years during the historical period (1975 to 2014) based on the measured data (MFD), before (DS) and after (BC) corrections for the deviations of the values of each model

图 2. 基实测数据(MFD)、各个模型数值偏差校正前(DS)和校正后(BC), 历史期(1975~2014 年)流域多年平均的年降水量、年蒸散量和年总径流量

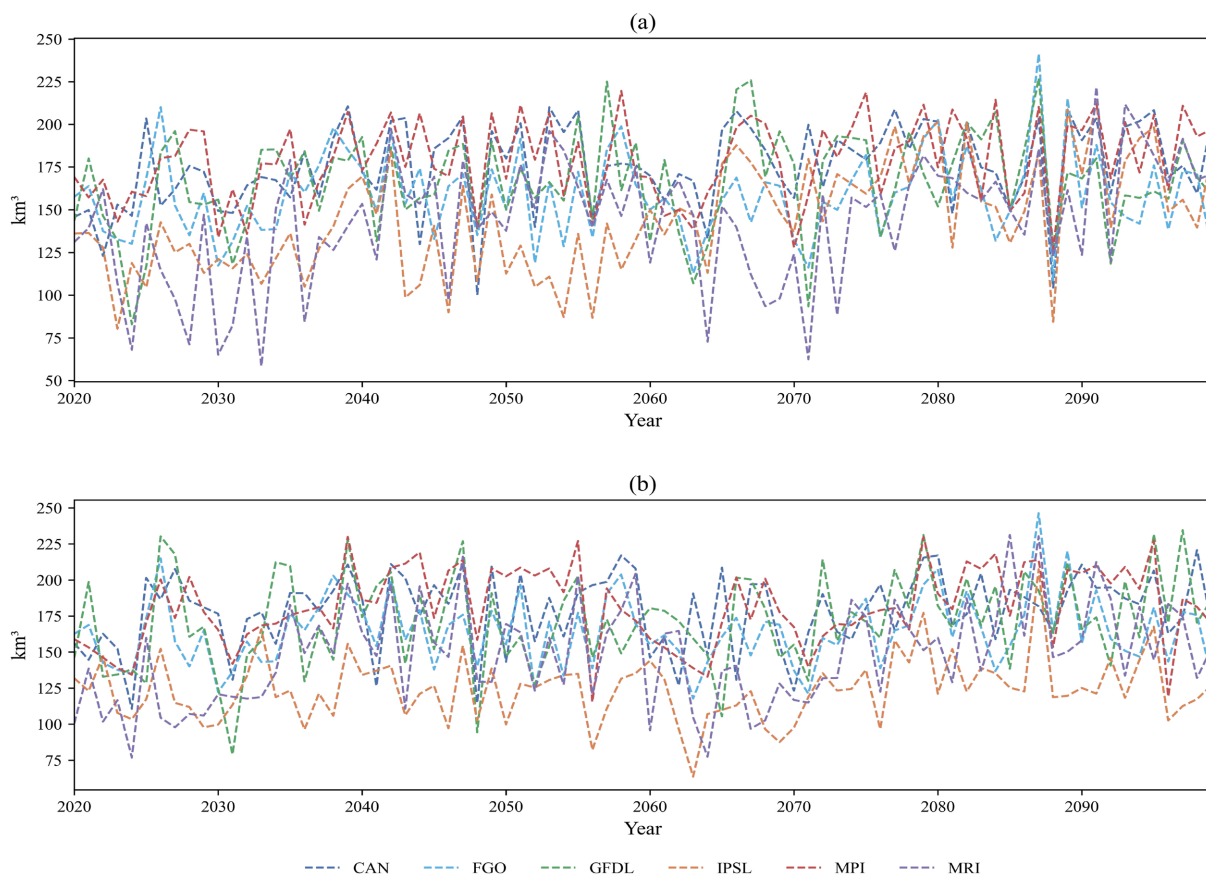


Figure 3. Interannual variability of precipitation in the Xiangjiang River Basin during the period 2020~2099 under two emission scenarios, SSP2-4.5 (upper panel) and SSP5-8.5 (lower panel), simulated based on six climate models

图 3. 湘江流域 2020~2099 年期间在 SSP2-4.5 (上图)和 SSP5-8.5 (下图)两种排放情景下, 基于六种气候模型模拟的降水量年际变化

未来气候变化情景下的区域气候响应特征以及变化趋势。

基于 CMIP6 多模式集合模拟结果, 本研究分析了湘江流域 2020~2099 年期间在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种排放情景下的降水量年际变化如图 3 所示(见图 3)。结果表明, 两种情景下湘江流域未来降水量均呈现显著增加趋势, 其中 SSP5-8.5 高排放情景下的增湿效应稍明显。具体而言, SSP2-4.5 情景下流域降水量平均增率为 $2.8 \text{ km}^3/10\text{a}$, 而在 SSP5-8.5 情景下则达到 $3.0 \text{ km}^3/10\text{a}$ 。通过对六个 CMIP6 模式的分析发现, 不同模式间存在一定差异。

本研究同样系统分析了湘江流域 2020~2099 年期间在 SSP2-4.5 中等排放情景和 SSP5-8.5 高排放情景下的平均温度年际变化(见图 4)。研究结果表明, 在全球气候持续变暖的背景下, 两种情景下湘江流域未来平均温度均呈现显著增加趋势, 其中 SSP5-8.5 高排放情景下的增温效应更为明显。SSP2-4.5 情景下流域平均温度平均增率为 $0.35^\circ\text{C}/10\text{a}$, 而在 SSP5-8.5 情景下则达到 $0.59^\circ\text{C}/10\text{a}$, 增幅较 SSP2-4.5 情景高出 68.6%。凸显了减排措施对缓解气候变暖的重要性, 如果人类不加节制地延续高排放模式, 湘江流域的气温将持续攀升, 进而对区域气候水文系统产生深远影响。

研究多模型集合分析发现不同模式间存在显著差异, 在 SSP2-4.5 情景下, 各模式模拟的温度增率分别为 $0.35^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.42^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.51^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.31^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.30^\circ\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.23^\circ\text{C}/10\text{a}$; 而在 SSP5-8.5 情景下, 相应增率分别为 $0.88^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.95^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.51^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.62^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.15^\circ\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.45^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。除个别模式外, 绝大多数模型在高排放情景下的温度增率均显著高于中等排放情景, 其中 FGOALS-g3 模式在 SSP5-8.5 情景下的增温速率达到 $0.95^\circ\text{C}/10\text{a}$, 显示出最强的增温响应。

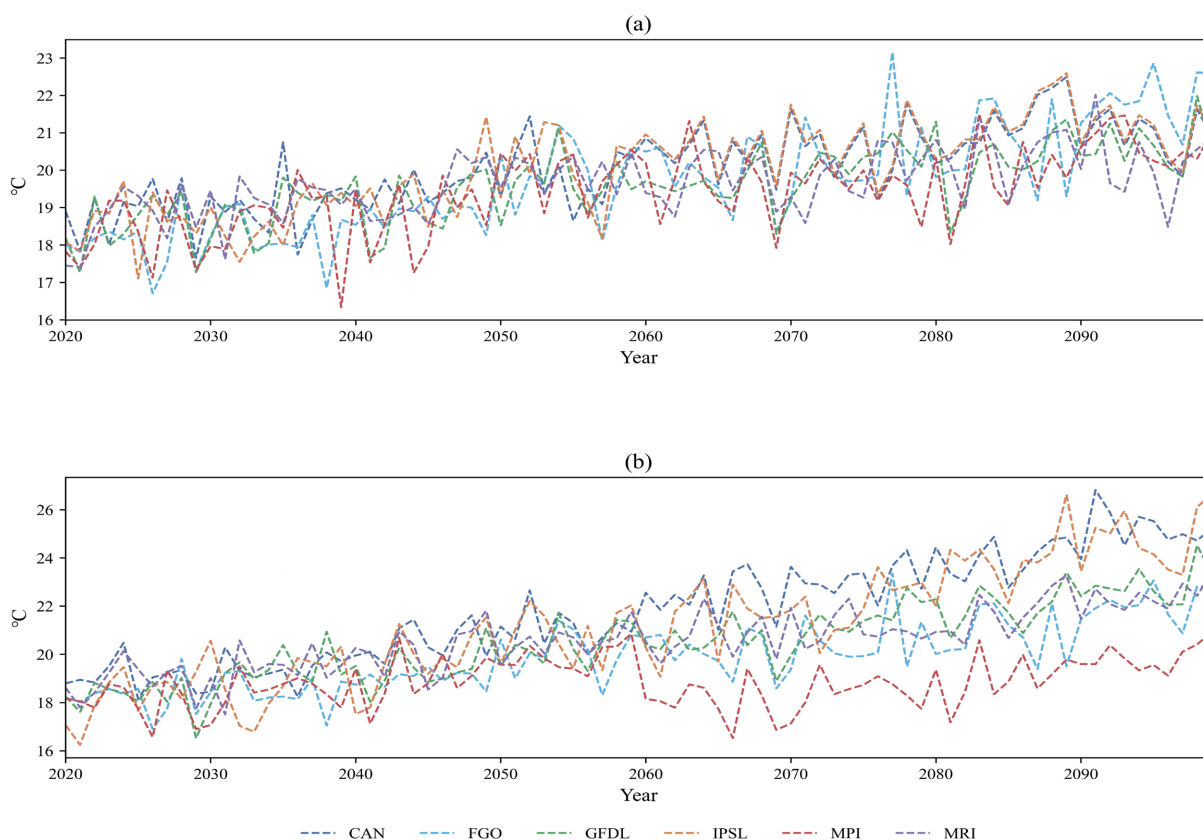


Figure 4. Interannual variations of annual mean temperature in the Xiangjiang River Basin during 2020~2099 under two emission scenarios, SSP2-4.5 (upper panel) and SSP5-8.5 (lower panel), simulated based on six climate models

图 4. 湘江流域 2020~2099 年期间在 SSP2-4.5 (上图)和 SSP5-8.5 (下图)两种排放情景下, 基于六种气候模型模拟的年均温年际变化

3.4. 未来水文过程变化分析

基于 VIC 水文模型，以降尺度处理后 6 个气候模式的两种未来情景 CMIP6 数据作为模型输入，本研究通过多模式、多情景的模拟分析，系统评估了研究区域未来径流变化的可能趋势。

为反映研究期内水文变量年总量的时间变化特征，本文绘制了湘江流域 2020~2099 年平均年径流量过程线(见 图 5)。研究结果表明，六个模型在两种情景下流域未来径流量均呈现显著增加趋势。具体而言，在 SSP5-8.5 高等排放情景下，流域平均径流量的增加速率为 2.1 km³/10a，而在 SSP2-4.5 中等排放情景下，增加速率更为显著，达到 2.4 km³/10a。在 SSP2-4.5 中等排放情景下，不同气候模型模拟的湘江流域径流量增加速率存在显著差异，其值分别为 0.24 km³/10a、3.1 km³/10a、1.4 km³/10a、2.3 km³/10a、2.6 km³/10a 和 4.6 km³/10a。而在 SSP5-8.5 高排放情景下，各模型的径流量增加速率进一步分化为 0.59 km³/10a、1.1 km³/10a、0.8 km³/10a、2.3 km³/10a、2.4 km³/10a 和 4.8 km³/10a。

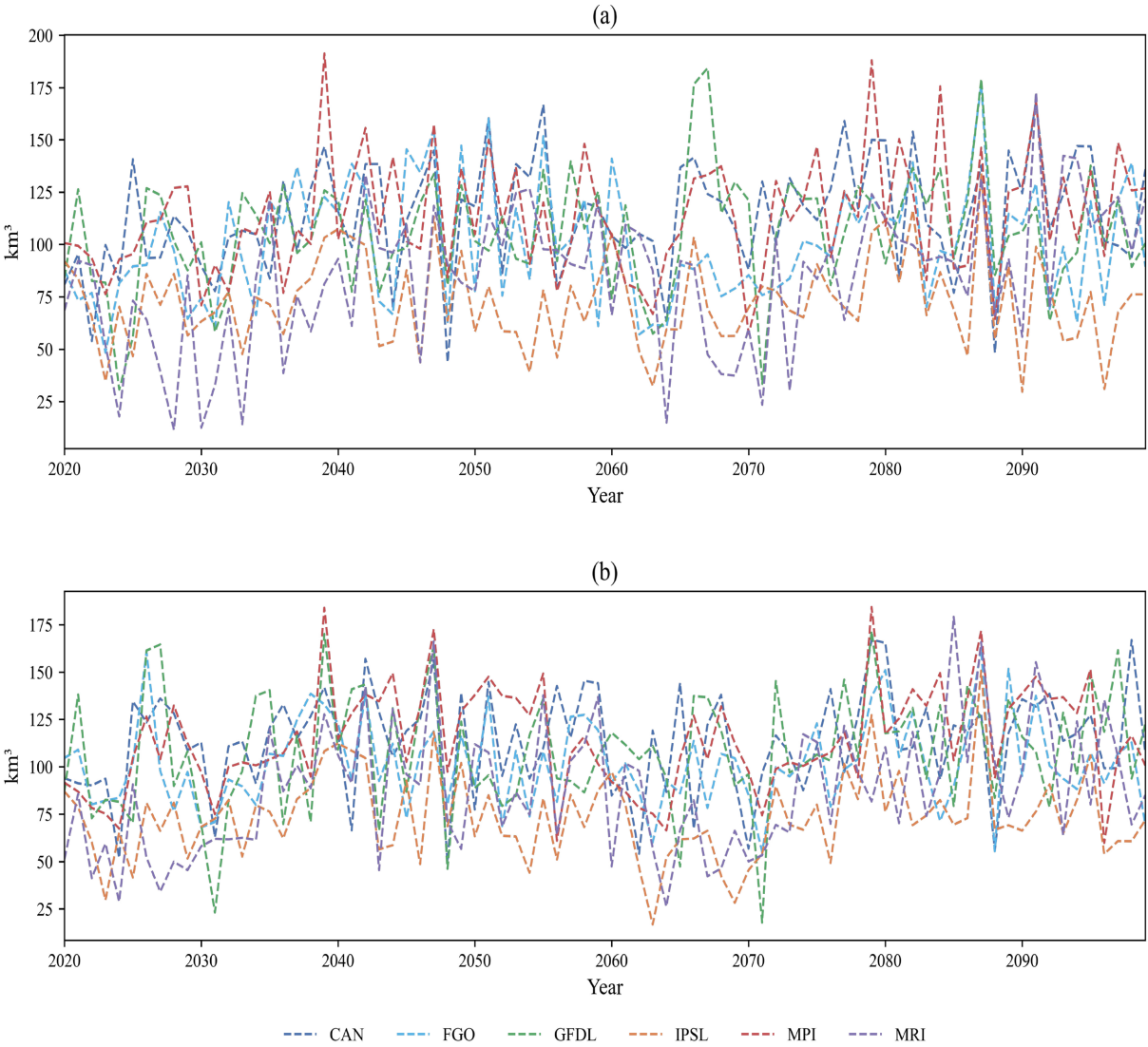


Figure 5. Interannual variability of annual runoff in the Xiangjiang River Basin during the period 2020~2099 under two emission scenarios, SSP2-4.5 (upper panel) and SSP5-8.5 (lower panel), simulated based on six climate models

图 5. 湘江流域 2020~2099 年期间在 SSP2-4.5 (上图)和 SSP5-8.5 (下图)两种排放情景下，基于六种气候模型模拟的年径流量年际变化

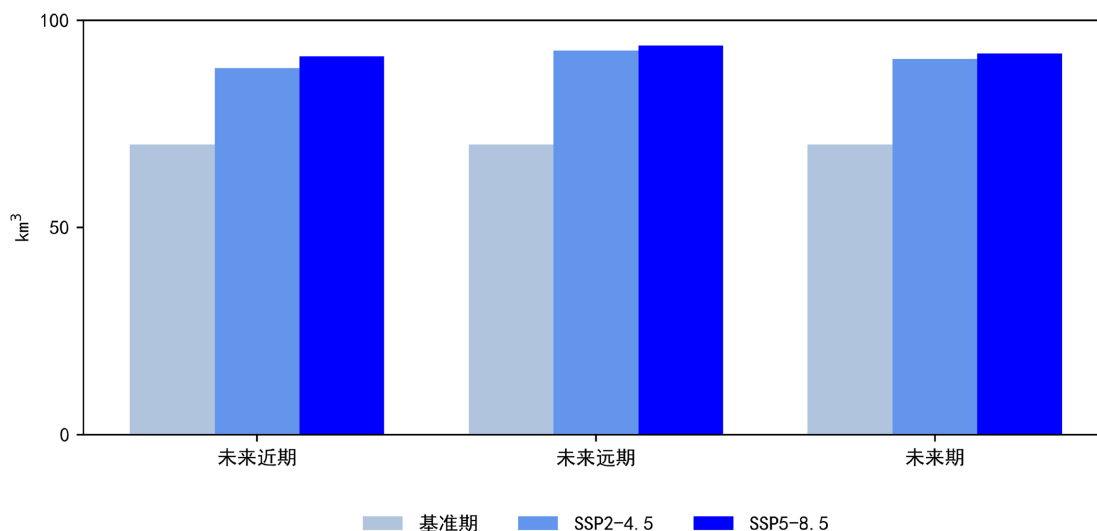


Figure 6. Annual runoff in the near future, far future and entire future period under high and medium emission scenarios versus base period

图 6. 未来近期、未来远期和整个未来时期在高排放和中等排放情景下的年径流量与基准期对比图

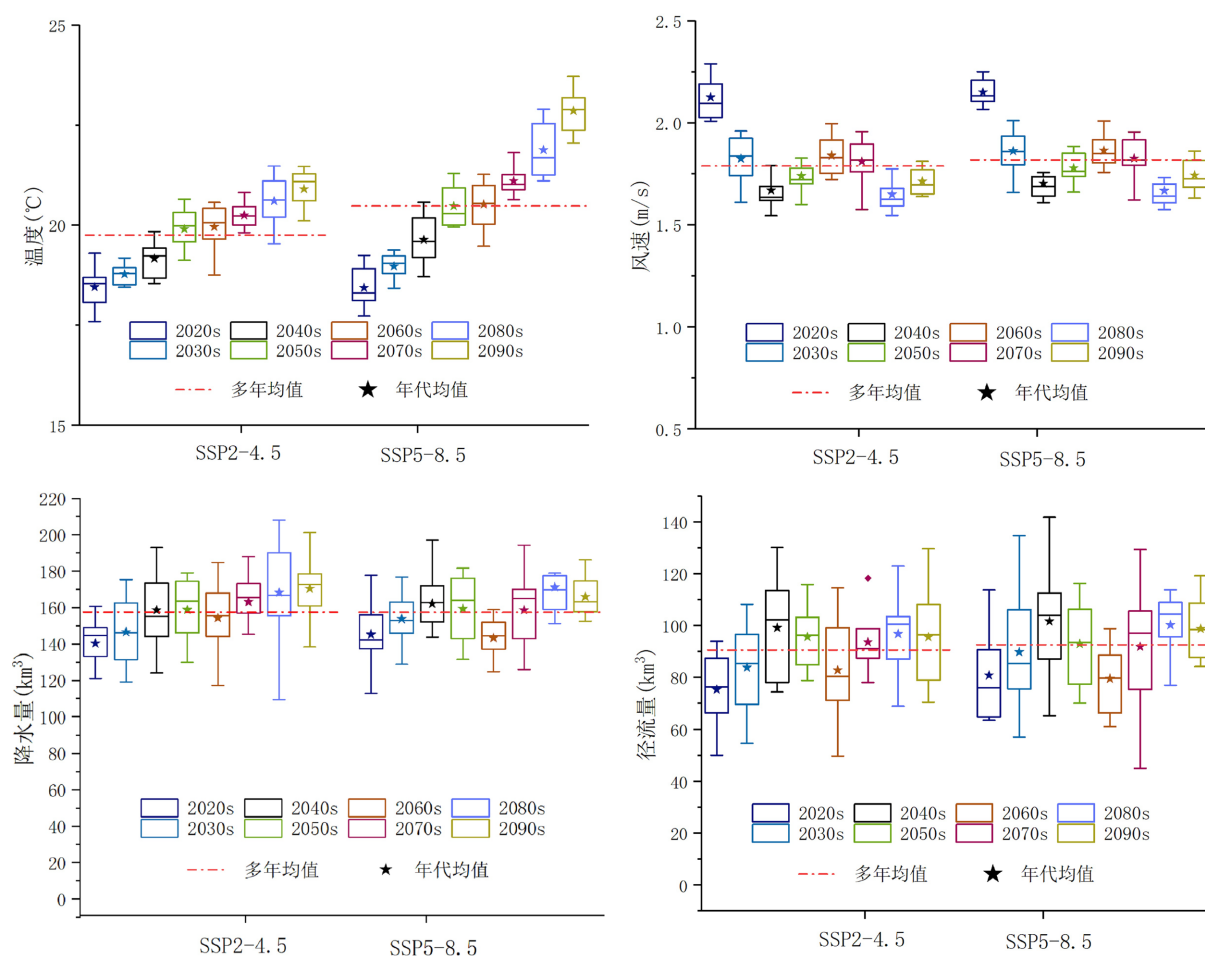


Figure 7. Dendrochronological changes in temperature, wind speed, precipitation and runoff in the Xiangjiang River Basin in the future period

图 7. 湘江流域未来期温度、风速、降水量和径流量年代变化

我们绘制出来平均多年年径流量与基准期径流量对比图(见图 6)。湘江流域在未来时期的年径流量预计将显著超过基准期(70 km^3), 并呈现出持续上升的趋势。在短期内, 根据 SSP2-4.5 情景, 多模型预测的平均多年径流量将达到 88.5 km^3 , 相比基准期增加了 18.5 km^3 , 增幅约为 26.4%。而在 SSP5-8.5 高排放情景中, 平均径流量预计为 91.3 km^3 , 较基准期增加了 21.3 km^3 , 增幅达到 30.4%。这一对比显示, 在高排放情景下, 湘江流域的径流量增幅(30.4%)高于中等排放情景(26.4%), 意味着高排放情景会在短期内促使径流量更显著地增加。未来远期, 中等排放情景下的年径流量预计为 92.7 km^3 , 较基准期增加了 22.7 km^3 , 增幅为 32.4%。在高排放情景中, 年径流量将进一步增至 93.9 km^3 , 较基准期增加 23.9 km^3 , 增幅为 34.1%。

本研究采用年代分析方法, 将 2020~2099 年划分为十个年代周期(2020s~2090s), 系统揭示了温度、风速、降水量与径流量的年代变化(见图 7)。研究结果通过箱线图进行可视化呈现, 其中红色参考线表征全周期要素均值。

研究结果表明, 在两种排放情景下, 流域年代际均温均呈现持续上升趋势。SSP2-4.5 情景中均温从 2020s 的 18.5°C 升至 2090s 的 20.9°C , 增幅达 2.4°C ; SSP5-8.5 情景则从 18.9°C 攀升至 22.4°C , 增幅达 3.5°C 。年代均风速最小值均出现在 2080s (分别为 1.65 m/s 和 1.67 m/s), 而最大值则出现在 2020s (分别为 2.13 m/s 和 2.15 m/s)。

在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种排放情景下, 流域年代平均降水量的最小值均出现在 2020s (分别为 140.3 km^3 和 145.1 km^3), 而最大值则出现在 2090s (分别为 170.4 km^3 和 171.4 km^3)。流域多年平均降水量分别为 157.5 km^3 (SSP2-4.5) 和 158.1 km^3 (SSP5-8.5)。流域年代平均径流量的最小平均值值出现在 2020s (75.3 km^3) 和 2060s (79.5 km^3), 而最大值则出现在 2050s (99.2 km^3) 和 2090s (101.7 km^3)。流域多年平均径流量在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下分别为 90.6 km^3 和 92.6 km^3 , 显示出排放强度对径流量的潜在影响。

从时间分布特征来看, 2020s 和 2030s 的年代平均降水、径流量显著低于多年均值, 而 2040s 之后(除 2060s 外)则普遍高于多年均值。这一分布规律表明, 2020s、2030s 和 2060s 为流域降水、径流枯水期, 而 2040s、2050s、2070s、2080s 和 2090s 则表现为降水、径流丰水期, 径流量的时间分布特征与降水量的变化趋势高度一致。此外, 研究还揭示了极端径流事件的发生规律。在 SSP2-4.5 情景下, 极端降水、径流事件可能集中发生在 2040s、2080s 和 2090s; 而在 SSP5-8.5 情景下, 极端降水、径流事件则可能主要出现在 2030s、2040s 和 2070s。

总之, 在多种不同的排放情景下, 湘江流域的年代径流量以及极端径流事件的发生, 与气候变化背景下降水强度和频率的变动紧密相连。这一现象表明, 尽管温度和风速对径流变化有一定的影响, 但相关性并不显著。这一发现进一步证实了降水是推动湘江流域径流变化的核心因素。湘江流域地处亚热带湿润气候区, 其独特的气候特点使得增加的降水几乎全部转化为地表径流。因此, 径流的变化主要受降水的直接影响, 降水不仅是地表径流形成的物质基础, 其时空分布特征更是直接决定了流域水量的平衡状态。在这一背景下, 深入研究降水变化对湘江流域水资源的影响, 对于合理规划水资源利用、防范水旱灾害以及保护生态环境具有重要意义。

4. 结论

本文以湿润流域湘江流域为研究对象, 采用经过 EDCDFm 统计降尺度方法进行偏差校正后的 CMIP6 模式数据气候模式数据驱动 VIC 模型得出以下主要结论:

1) VIC 模型在湘江流域率定期与验证期的月径流模拟结果与实测数据高度吻合, 表明其能够精确刻画湿润流域水文过程。EDCDFm 偏差校正方法也能显著改善模式数据系统偏差, 表明未来模型驱动在湘江流域表现良好。

2) 在未来时期(2020~2099年),湘江流域的气候及径流变化在时间和空间尺度上均表现出显著特征。年际尺度上, SSP2-4.5 (中等排放情景)和 SSP5-8.5 (高排放情景)下,降水量与平均温度均呈增加趋势,其中高排放情景增幅更为显著。未来时期流域径流量在两个排放情景下均呈现显著增加趋势,而 SSP2-4.5 情景下流域径流量平均增加速率却大于 SSP5-8.5 情景下增长率。

3) 年代尺度上,在两个排放情景下, SSP2-4.5 情景下极端降水、径流事件可能集中发生在 2040s、2080s 和 2090s; SSP5-8.5 情景下极端降水、径流事件可能出现在 2040s 和 2070s。其中 2020s、2030s 和 2060s 为流域降水、径流偏枯期,而 2040s、2050s、2070s、2080s 和 2090s 则呈现降水、径流偏丰特征。径流量的时间分布特征与降水量的变化趋势高度一致验证了降水是驱动湘江流域径流变化的主导因子。

参考文献

- [1] Freeze, R.A. and Harlan, R.L. (1969) Blueprint for a Physically-Based, Digitally-Simulated Hydrologic Response Model. *Journal of Hydrology*, **9**, 237-258. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(69\)90020-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90020-1)
- [2] Wood, E.F. (1991) Global Scale Hydrology: Advances in Land Surface Modeling. *Reviews of Geophysics*, **29**, 193-201. <https://doi.org/10.1002/rog.1991.29.s1.193>
- [3] Wood, E.F., Lettenmaier, D.P. and Zartarian, V.G. (1992) A Land-Surface Hydrology Parameterization with Subgrid Variability for General Circulation Models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **97**, 2717-2728. <https://doi.org/10.1029/91jd01786>
- [4] Xiao, M., Udall, B. and Lettenmaier, D.P. (2018) On the Causes of Declining Colorado River Streamflows. *Water Resources Research*, **54**, 6739-6756. <https://doi.org/10.1029/2018wr023153>
- [5] Wang, Z., Zhong, R., Lai, C., Zeng, Z., Lian, Y. and Bai, X. (2018) Climate Change Enhances the Severity and Variability of Drought in the Pearl River Basin in South China in the 21st Century. *Agricultural and Forest Meteorology*, **249**, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.077>
- [6] Zhang, Y., You, Q., Chen, C. and Li, X. (2017) Flash Droughts in a Typical Humid and Subtropical Basin: A Case Study in the Gan River Basin, China. *Journal of Hydrology*, **551**, 162-176. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.044>
- [7] Jiang, D., Hu, D., Tian, Z. and Lang, X. (2020) Differences between CMIP6 and CMIP5 Models in Simulating Climate over China and the East Asian Monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, **37**, 1102-1118. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-2034-y>
- [8] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445-456.
- [9] 秦爽. 融合 CMIP6 的汉江上游流域径流预测研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [10] Wang, G.Q., Zhang, J.Y., Jin, J.L., Pagano, T.C., Calow, R., Bao, Z.X., et al. (2012) Assessing Water Resources in China Using PRECIS Projections and a VIC Model. *Hydrology and Earth System Sciences*, **16**, 231-240. <https://doi.org/10.5194/hess-16-231-2012>
- [11] Wang, S., Yan, Y., Yan, M. and Zhao, X. (2012) Quantitative Estimation of the Impact of Precipitation and Human Activities on Runoff Change of the Huangfuchuan River Basin. *Journal of Geographical Sciences*, **22**, 906-918. <https://doi.org/10.1007/s11442-012-0972-8>
- [12] Yu, Z., Gu, H., Wang, J., Xia, J. and Lu, B. (2017) Effect of Projected Climate Change on the Hydrological Regime of the Yangtze River Basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **32**, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00477-017-1391-2>
- [13] Gu, L., Chen, J., Yin, J., Xu, C. and Zhou, J. (2020) Responses of Precipitation and Runoff to Climate Warming and Implications for Future Drought Changes in China. *Earth's Future*, **8**, e2020EF001718. <https://doi.org/10.1029/2020ef001718>
- [14] 窦娇. 基于 VIC 模型的石羊河上游出山径流模拟与预测[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 西北师范大学, 2023.
- [15] Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T. and Nemani, R. (2022) NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Scientific Data*, **9**, Article No. 262. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>
- [16] 周嘉月, 卢麾, 阳坤, 等. 基于 CMIP6 的中高温升情景对中国未来径流的预估[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(3): 505-524.
- [17] Li, H., Sheffield, J. and Wood, E.F. (2010) Bias Correction of Monthly Precipitation and Temperature Fields from Inter-governmental Panel on Climate Change AR4 Models Using Equidistant Quantile Matching. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **115**, D10101. <https://doi.org/10.1029/2009jd012882>