

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.010.

隆院男, 张雨林, 蒋昌波, 等. 基于 CMIP6 的气候变化下资水流域径流响应研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 114-125.

Long Yuannan, Zhang Yulin, Jiang Changbo, et al. Study on Runoff Response of Zishui Basin Under Climate Change Based on CMIP6[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 114-125.

基于 CMIP6 的气候变化下资水流域径流响应研究

隆院男^{1,2}, 张雨林³, 蒋昌波^{1,2}, 莫军成³, 黄春福^{1,2}, 宋昕熠^{1,2}

(1.长沙理工大学 水利与环境工程学院, 长沙 410114; 2.洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 长沙 410114; 3.湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司, 长沙 410007)

摘要: [目的]探究未来气候变化情景下资水流域的径流响应情况,为实现流域可持续发展、制定防洪抗旱决策提供科学支持。[方法]基于 3 个 CMIP6 全球气候模式,通过构建流域 SDSM 降尺度模型和 SWAT 水文模型,预估了 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 气候情景下资水流域 2030—2089 年的气温与降水变化,并进一步探究流域径流对气候变化的响应。[结果]未来资水流域呈较显著暖湿化趋势,空间上流域全范围升温且以新宁、邵阳站附近增幅最大;降水增加区域主要集中在以冷水江为中心的中下游地区,减少区域位于洞口站以西。在此背景下,未来桃江站与邵阳站年均径流与流域降水的变化趋势基本一致,邵阳站以上的上游区域可利用水资源量减小的可能性较大。枯水期流域水资源将面临更加紧缺的风险,且汛期有提前的趋势,主汛期水资源分配的均匀程度将上升。[结论]在气候暖湿化的背景下,资水流域水资源管理将遭遇更严峻的挑战,应加强水资源保护和流域综合管理。

关键词: CMIP6; 气候变化; 径流响应; 资水流域; SDSM 模型; SWAT 模型

中图分类号: P333.1; P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0114-12

Study on Runoff Response of Zishui Basin Under Climate Change Based on CMIP6

Long Yuannan^{1,2}, Zhang Yulin³, Jiang Changbo^{1,2}, Mo Juncheng³, Huang Chunfu^{1,2}, Song Xinyi^{1,2}

(1.School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3.Hunan Water Resources & Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the runoff response of Zishui Basin under future climate change scenarios, and to provide scientific support for the sustainable development of the basin and the decision-making of flood control and drought control. [Methods] Based on three CMIP6 global climate models, the SDSM downscaling model and SWAT hydrological model were constructed to predict the changes of temperature and precipitation in the Zishui Basin during 2030—2089 under SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios, and to further explore the response of runoff to climate change. [Results] Zishui Basin will present a significant warming and humidification trend in the future, and this trend will increase with the increase of discharge scenario. Spatially, the temperature rise of the whole basin is the largest in the vicinity of Xinning and Shaoyang stations. The increasing areas of precipitation mainly concentrate in the middle and lower reaches with Lengshuijiang as the center, while the decreasing area is located west of Dongkou station. In this context, the future annual runoff of Taojiang station and Shaoyang

收稿日期: 2023-08-15

修回日期: 2023-10-10

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(52079010); 湖南省重点研发计划(2020SK2130); 湖南省研究生科研创新资助项目(CX20220910); 湖南省水利科技项目(XSKJ2019081-09)

第一作者: 隆院男(1985—), 男, 湖南宁乡人, 博士, 副教授, 主要从事水文遥感和流域水文模型研究。E-mail: lynzhh@csust.edu.cn

通信作者: 蒋昌波(1970—), 男, 陕西石泉人, 博士, 教授, 主要从事水动力过程及其数值模拟研究。E-mail: jcb36@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

station will have the same variation trend with the watershed precipitation, and the amount of available water resources in the upstream area above Shaoyang station is more likely to decrease. Water resources in the basin will face the risk of more shortage in the dry season, and the flood season tends to advance, and the evenness of water resources allocation in the main flood season will increase. [Conclusion] Under the background of climate warming and humidification, the management of water resources in Zishui Basin will encounter more severe challenges, and the protection of water resources and the integrated management of Zishui Basin should be strengthened.

Keywords:CMIP6; climate change; runoff response; Zishui Basin; SDSM model; SWAT model

气候变化是 21 世纪面临的全球最大挑战之一,已成为世界各国学者们关注的热点前沿话题。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在最新评估报告(AR6)中指出,到 21 世纪 30 年代中期全球温度将上升至少 1.5℃^[1]。在全球气候变暖的背景下,大气环流和水文循环持续增强,洪涝、干旱等极端水文事件发生的频率与强度显著上升,流域生态平衡和水资源管理受到严重威胁^[2-3]。

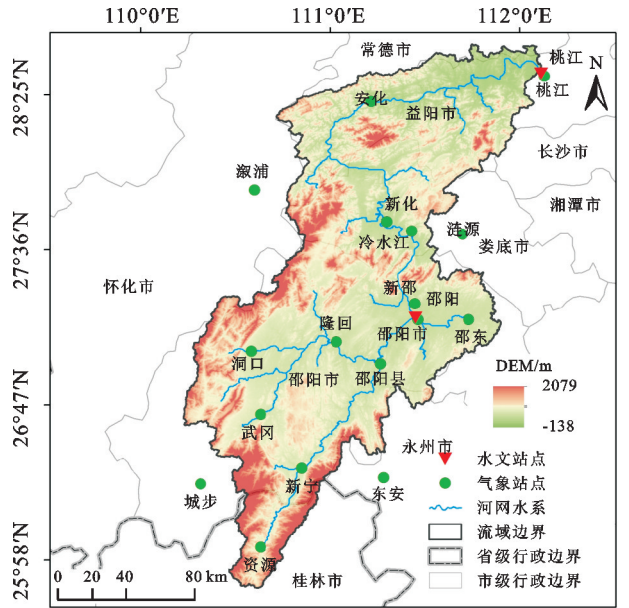
全球气候模式(General Circulation Model, GCM)是预估未来气候变化的重要工具,其输出结果可为评估气候变化对水文水资源、生态环境的影响提供必要的数据支撑^[4]。在国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)的有力推动下, GCM 不断发展与完善,目前 CMIP 已进行至第 6 阶段,气候变化研究正在向 CMIP6 全球气候模式转换^[5]。在与 CMIP5 保持良好衔接的基础上, CMIP6 改进了其长期存在的模型偏差和辐射强迫量化差问题,并提出了一套基于不同社会经济驱动模式的新排放情景,即不同典型排放路径(Representative Concentration Pathway, RCP)和社会共享经济路径(Shared Socioeconomic Pathway, SSP)的 SSP-RCPs 组合情景^[6-7]。此外,由于 GCMs 的分辨率通常低至 250~600 km,其输出难以直接应用于区域尺度的气候变化研究中,而降尺度技术以更高分辨率弥补粗 GCMs 输出和局部气候变量值的差距,有效地解决了气候模式和水文模型空间尺度不统一的问题^[8-9]。其中,SDSM 模型作为一种合理可靠的统计降尺度工具,已广泛应用于全球不同区域的未来气候变化研究中。

资水是洞庭湖四大水系之一,也是湖南省重要的水电基地和粮食基地。气候变化下的径流响应直接影响资水流域水库调度和发电运行,且对农业生产、社会发展及生态环境具有重大意义^[10]。当前在资水流域所开展的研究主要集中于历史时期降水、径流和干旱演变规律的实证研究,亟需在未来气候预估与径流模拟方面开展相关研究^[11-13]。因此,本文基于 3 个

CMIP6 全球气候模式,经 SDSM 模型进行降尺度处理后预估 SSP1-2.6, SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 气候情景下资水流域 2030—2089 年的气温与降水变化,并进一步通过构建 SWAT 水文模型探究流域径流对气候变化的响应。

1 研究区概况

资水流域地处北纬 25°48′—28°61′,东经 110°12′—112°10′,呈 S 形状斜贯于湘中腹地,其控制站桃江水文站以上的流域面积约 26 748 km²。该区属于亚热带季风气候区,四季交替明显,季节性特征显著,年均气温在 20℃左右,多年平均降水量为 1 483.3 mm^[14-15]。流域多年平均流量约 760 m³/s,年内分配与降雨季节性变化一致,主要集中于 4—7 月,约占全年总量的 54%^[16]。由于资水流域暴雨量大,河道弯曲狭窄,水系呈羽状分布,雨水集流快,河流水位迅涨迅落,所形成的洪水具有山区洪水的特征,峰高量大,最大洪峰流量多出现在 6—8 月。资水流域示意图如图 1 所示。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 资水流域示意图
Fig. 1 Diagram of Zishui Basin

2 数据源及方法

2.1 数据源

2.1.1 水文气象数据 研究所选取的气象数据为资水流域及邻近区域 17 个国家基本气象站点 1971—2020 年的逐日气候观测数据,此数据来自于国家气象局(<http://data.cma.cn/>),包括日平均气温、日最高最低气温、降水、风速、相对湿度、日照时数、气压等气候要素。水文数据由湖南省水文水资源勘测中心提供,收集了资水干流的邵阳和桃江水文站 2010—2019 年的实测月径流数据,其中邵阳站为资水流域上游水文站,桃江站位于流域下游出口处,是资水控制站。

2.1.2 NCEP 及 GCMs 数据 本文将 NCEP-DOE 再分析数据作为逐日大尺度气候因子观测资料,该数据是 NCEP/NCAR 再分析数据的改进版本,数据集时间段为 1960—2014 年,网格分辨率为 144×72 。参考现有研究成果^[17-19],选取的 CMIP6 气候模式为 CanESM5, NorESM2-MM 和 MPI-ESM1-2-HR 模式,各模式基本信

息见表 1。在 CMIP6 提供的多个情景中,将历史情景数据应用于模式气候模拟能力评估,选择 SSP1-2.6, SSP2-4.5 和 SSP5-8.53 种 SSP-RCP 组合情景下的气候变量以预估未来气候变化,预估时段为 2030—2089 年。各 SSP-RCP 情景代表的含义见表 2^[6],由于预测期较长,将未来时期划分为 3 个时段,即近期 2030—2049 年、中期 2050—2069 年、远期 2070—2089 年,并以 2010—2019 年作为基准期。

以上数据均来自于加拿大气候影响情景网站(<https://climate-scenarios.canada.ca>),共同包含平均海平面气压、海平面风速、气温等 26 个大气环流因子,且网格分辨率已统一至 128×64 。

表 1 3 个 CMIP6 模式的相关信息

Table 1 Related information of three CMIP6 GCMs

模式名称	国家	所属研究中心	网格分辨率
CanESM5	加拿大	加拿大气候模拟与分析中心	128×64
MPI-ESM1-2-HR	德国	德国普朗克气象研究所	288×192
NorESM2-MM	挪威	挪威气候中心	384×192

表 2 SSP-RCP 组合情景的含义

Table 2 Meaning of SSP-RCP scenarios

SSP-RCP 情景	含义
SSP1-2.6	CMIP5 中 RCP2.6 的更新版本,代表可持续发展路径,温室气体排放量处于严格监管的低水平,2100 年辐射强迫稳定在约 2.6 W/m^2
SSP2-4.5	CMIP5 中 RCP4.5 的更新版本,代表中度发展路径,温室气体排放量处于中等水平,2100 年辐射强迫稳定在约 4.5 W/m^2
SSP5-8.5	CMIP5 中 RCP8.5 的更新版本,代表以化石燃料为主的发展路径,温室气体排放处于无监管的高水平,2100 年辐射强迫达到约 8.5 W/m^2

2.1.3 下垫面数据 下垫面数据是构建 SWAT 模型的重要基础资料,主要包括数字高程(Digital Ele-

vation Model,DEM)、土地利用和土壤数据,相关信息见表 3。

表 3 下垫面数据的基本信息

Table 3 Basic information of underlying surface data

数据类型	年份	来源	空间分辨率
DEM 数据	2015 年	地理空间数据云网站(http://www.gscloud.cn/search)	$30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$
土地利用数据	2015 年	中国科学院地理科学与资源研究所	$1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$
土壤数据	2009 年	世界和谐土壤数据库	$1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$

2.2 研究方法

2.2.1 SDSM 降尺度模型 SDSM 模型是英国 Wilby 等^[20]提出的一种建立当前和未来逐日气象要素单站情景集合的降尺度工具。该模型融合了天气发生器和多元线性回归技术,不仅克服了年际变化率预估过低的问题,且借助随机模拟技术使逐日序列的方差更接近实测值^[21]。其基本原理是构建多年实测气象数据与 NCEP-DOE 大尺度预报因子的统计经验关系,并使用独立的气象观测数据来验证这种统计关系,最后将 GCMs 输出的大尺度气象数据作为输入变量,生成小

尺度或站点尺度的未来逐日气候要素序列^[22-23]。

SDSM 降尺度模型的核心在于定量统计关系的建立,其关键步骤是选择合适的预报因子,这决定着模型模拟效果的好坏。本文将研究区 17 个气象站的日最高气温、日最低气温和日降水量作为预报量,预报因子筛选的过程中考虑不同格网的预报因子对站点预报量的影响,即基于 SDSM4.2 软件的 Screen Variables 模块,根据单个预报因子与预报量间的解释方差和偏相关系数选出预报量在各网格的最优预测因子组合,并基于 Calibrate Model 模块优选出流

域范围内各站点解释预报变量最好的网格,该网格所对应的预报因子组合便为筛选出的预报因子。

2.2.2 SWAT 模型 SWAT 模型是由美国农业部农业研究中心的 Jeff Arnold 博士所开发的基于物理机制的、连续性的半分布式流域水文模型^[24]。在水文过程模拟中,SWAT 模型在将目标流域分成多个子流域的基础上进一步划分为数个水文响应单元(Hydrologic Research Unit,HRU)。HRU 是同一子流域中有着相同土壤类型、土地利用类型和坡度的区域,也是最小的水文模拟单元,通过计算各 HRU 的产流量,再经汇流累计便可得整个流域的总径流量。上述运算的基础是水量平衡原理,即:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

(1)

式中: t 为时间(d); SW_t 为时段末的土壤含水量(mm); SW_0 为时段初的土壤含水量(mm); R_{day} , Q_{surf} , E_a , W_{seep} , Q_{gw} 分别为第 i 天的降水量(mm)、地表径流量(mm)、蒸散发量(mm)、土壤进入包气带的水量(mm)和回流的水量(mm)。

SWAT 模型的构建以其在 ArcGIS 10.2 软件上的图

形用户界面 ArcSWAT 2012 作为操作平台,一般步骤包括 DEM 数据加载、子流域划分、土地利用数据和土壤类型数据加载、HRU 划分、气象观测数据输入及模型运行。模型模拟过程中,地表径流计算采用 SCS 曲线法,主河道汇流演算基于马斯京根法进行。

此外,各气候要素的流域平均值通过泰森多边形法计算而来,气候及径流变化分析过程中涉及到的统计方法有滑动平均法、气候倾向率法和 Mann-Kendall 趋势检验^[25-26],所采用的空间插值方法为协同克里金插值法。

3 结果与分析

3.1 SDSM 降尺度模型适用性分析

以 1979—1999 年为 SDSM 模型构建期,在此基础上,应用 2000—2014 年的 NCEP-DOE 再分析数据验证模型对当前气候模拟的可靠性,并选取决定系数(R -squared, R^2)、纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency, NSE)和均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)3 项评价指标对各站点日最高气温、日最低气温和降水的实测值与模拟值的月序列进行比较,其统计结果见表 4。

表 4 验证阶段各站点模拟指标

Table 4 Verification period each site simulation index statistical table

气象要素	R^2		NSE		RMSE	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
日最高气温	0.987~0.991	0.990	0.985~0.991	0.988	0.792~1.053	0.893
日最低气温	0.989~0.994	0.992	0.983~0.993	0.989	0.644~0.966	0.786
降水	0.417~0.665	0.538	0.302~0.607	0.448	48.633~88.025	61.698

注:日最高气温和日最低气温的均方根误差的单位为℃/d,降水的均方根误差的单位为 mm/月。

可以看到,SDSM 模型对气温的降尺度效果较好,能够准确地模拟出资水流域最高、最低气温的月尺度变化,各站点日最低气温和最高气温的 R^2 和 NSE 都在 0.99 左右,且两者的 RMSE 皆处于较低水平。相较之下,SDSM 模型降水模拟的精度相对较低,但总体精度尚可, R^2 和 NSE 分别介于 0.447~0.665,0.302~0.607, RMSE 的平均值为 61.698 mm/月,这与代慧慧^[27]、刘卫林^[28]、Huang^[29] 等的文章中应用 SDSM 降尺度模型模拟降水的效果类似。综合来看,SDSM 模型在资水流域具备较高的适用性与较好的参考价值,可以应用于资水流域未来气候变化预估。

3.2 气候模式模拟能力评估

基于各气候模式的历史情景数据,对比 2000—2014 年流域实测数据与各气候模式对日最高气温、日最低气温和降水的模拟结果,如图 2 所示。从图 2A 和图 2B 可以看出,各模式对流域气温都有较好的模拟效果。对于日最高气温的模拟,CanESM5 和

NorESM2-MM 模式对冬季日最高气温月值存在明显的热偏差现象,其中 NorESM2-MM 模式还在秋季呈现出一定的冷偏差,其他月份的模拟结果则与实测值很接近。MPI-ESM1-2-HR 模式下各月的模拟值均低于实测值,其偏差保持在较低的水平。日最低气温模拟方面,各气候模式下模拟得到的年内变化与实际情况高度吻合。其中,CanESM5 模式在春、冬季节的模拟效果稍差,而 NorESM2-MM 和 MPI-ESM1-2-HR 模式除在 7 月、8 月模拟值略偏高或偏低外,其余各月模拟值与实测值都十分接近,其偏差普遍低于 0.5℃。就降水模拟能力而言,各气候模式均能近似地模拟出月降水的变化趋势,但模式间的差异较大。对于 5—8 月,各模式的模拟结果和实测值相对较接近,且都准确模拟出了月降水极值出现在 6 月,但在极值模拟方面均存在高估的情况。对于其他月份,CanESM5 和 MPI-ESM1-2-HR 模式在 9—12 月和 5 月的模拟值明显低于实测值,在 1—4 月的表现与之相反,且 MPI-

ESM1-2-HR 模式的偏差更大。此外, NorESM2-MM 模式的模拟偏差整体处于更低的水平。

总体各气候模式对日最高气温、日最低气温和降水的模拟性能都有一定的可取之处,但模式间仍存在较大的差异和不确定性,应用单个“最优”模式预估气候变化的偏差较大。因此,本文采用多模式集合平均(Multi-Model Ensemble, MME)提升模式输出结果的精度和可靠性,即将 CanESM5, NorESM2-MM 和 MPI-ESM1-2-HR 气候模式的模拟结果的算术平均值作为最终的输出。

3.3 SWAT 模型适用性分析

根据桃江水文站和邵阳水文站实测径流数据,设定 2008—2009 年作为 SWAT 模型的预热期,2010—2014 年为率定期,2015—2019 年为验证期。在对模型进行率定和验证前,经参数敏感性分析选取基流消退系数 ALPHA_BF、潮湿条件下的初始 SCS 径流曲线值 CN2、深蓄水层渗透系数 RCHRG_DP 等 13 个对流域水文过程影响较大的关键参数,以为实现高效的模型优化及率定提供基础支撑。

在率定期及验证期间,桃江站与邵阳站月径流模拟值与实测值的对比结果如图 3 所示。从对比结果来看,模型的模拟效果总体较好,能合理地反映出流域径流变化的季节性特征。进一步采用决定系数 R^2 、纳什效率系数 NSE 和百分比偏差(Percent Bias, PBIAS)3 个评价指标量化模型模拟效果(表 5)。两个阶段桃江站与邵阳站的 R^2 和 NSE 均在 0.85 以上,且 PBIAS 的绝对值仅在 1% 左右,说明模型模拟值与实测值具有较高的相关性 with 一致性。故本研究所构建的资水流域月尺度 SWAT 模型能比较真实地模拟流域径流过程,可用于进一步探究气候变化下径流的响应情况。

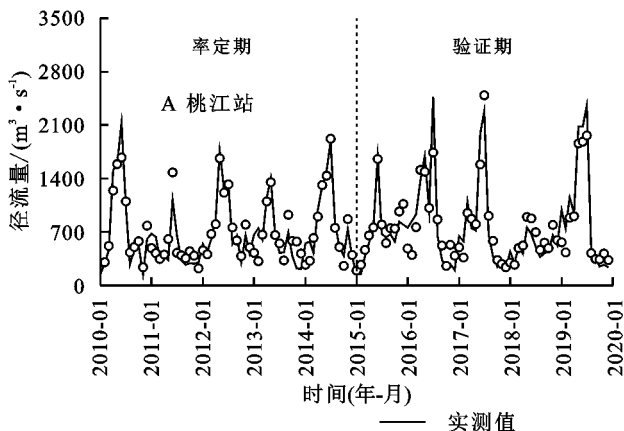


图3 率定期与验证期月径流模拟结果对比

Fig. 3 Comparison of monthly runoff simulation results between periodic and validation period

3.4 资水流域未来气候变化特征

3.4.1 时间变化特征 图 4 为不同气候情景下 2030—

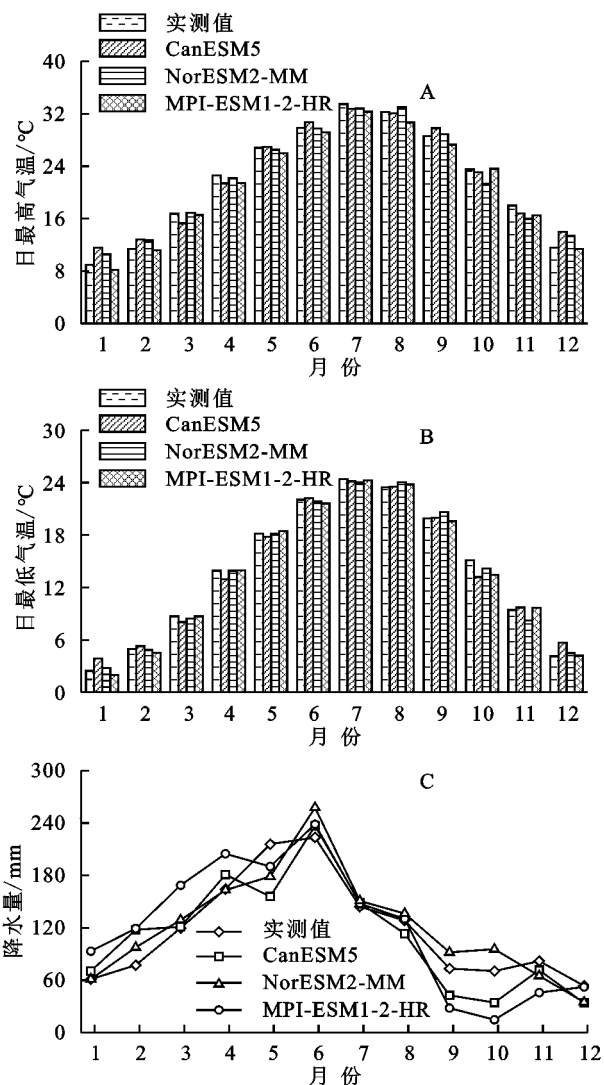
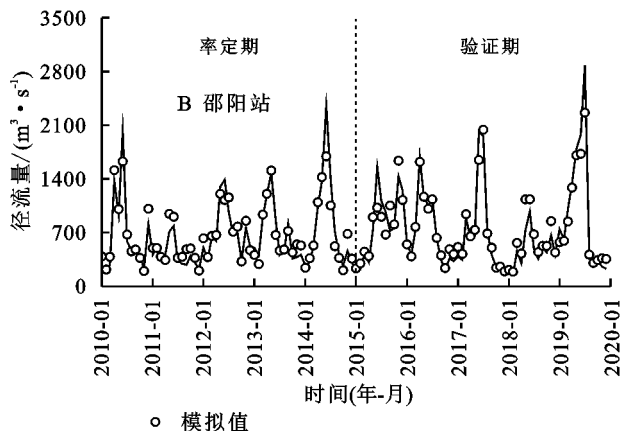


图2 2000—2014 年实测值与各气候模式模拟的日最高气温、日最低气温、降水对比

Fig. 2 Comparison of measured values and daily maximum temperature, daily minimum temperature and precipitation simulated by GCMs from 2000 to 2014



2089 年资水流域日最高气温、日最低气温和降水的年际变化情况,不同时期的变化特征可见表 6。在气温

变化方面,未来 60 a 流域年均日最高气温和最低气温的变化规律具有一致性,都呈显著的增暖趋势。此外,气温变化值整体上高于基准期,这种升温速率和幅度随着排放情景的升高而增大。具体来说,日最高气温在 SSP1-2.6,SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 气候情景下的年代际倾向率分别为 0.07,0.36,0.74 °C/10 a,而日最低气温的年代际倾向率分别为 0.08,0.28,0.51 °C/10 a。与基准期相比,年均日最高和最低气温均呈现出远期增幅最大,中期增幅次之,近期增幅最小的特征。值得注意的是,在未来相同时期,不同气候情景下年均日最高气温的增幅均大于日最低气温。对于年降水量,在 SSP1-2.6 气候情景下其数值呈现出明显的年际振荡变化,近期、中期表现出了一定的增幅,而至远期有大幅减小之势。SSP2-4.5 情景下年降水量近期的数值要小于基准期,而后开始大于基准期且

增幅处于较高水平,整体上以 13.09 mm/10 a 的速率波动上升。相较之下,仅 SSP5-8.5 情景下的年降水量变化趋势通过了 $\alpha=0.01$ 水平的显著性检验,在未来时段其数值的增长很明显,年际倾向率为 69.79 mm/10 a,到 2070—2089 年相较于基准期的增量高达 296.82 mm,这可能会增大洪涝等极端水文事件发生的概率。

表 5 率定期与验证期 SWAT 模型精度评价
Table 5 Accuracy evaluation table of SWAT model in the periodic and validation period

水文站点	时段	R^2	NSE	PBIAS/%
桃江站	率定期	0.87	0.87	-1.1
	验证期	0.89	0.88	0.7
邵阳站	率定期	0.89	0.89	-1.1
	验证期	0.92	0.91	-0.9

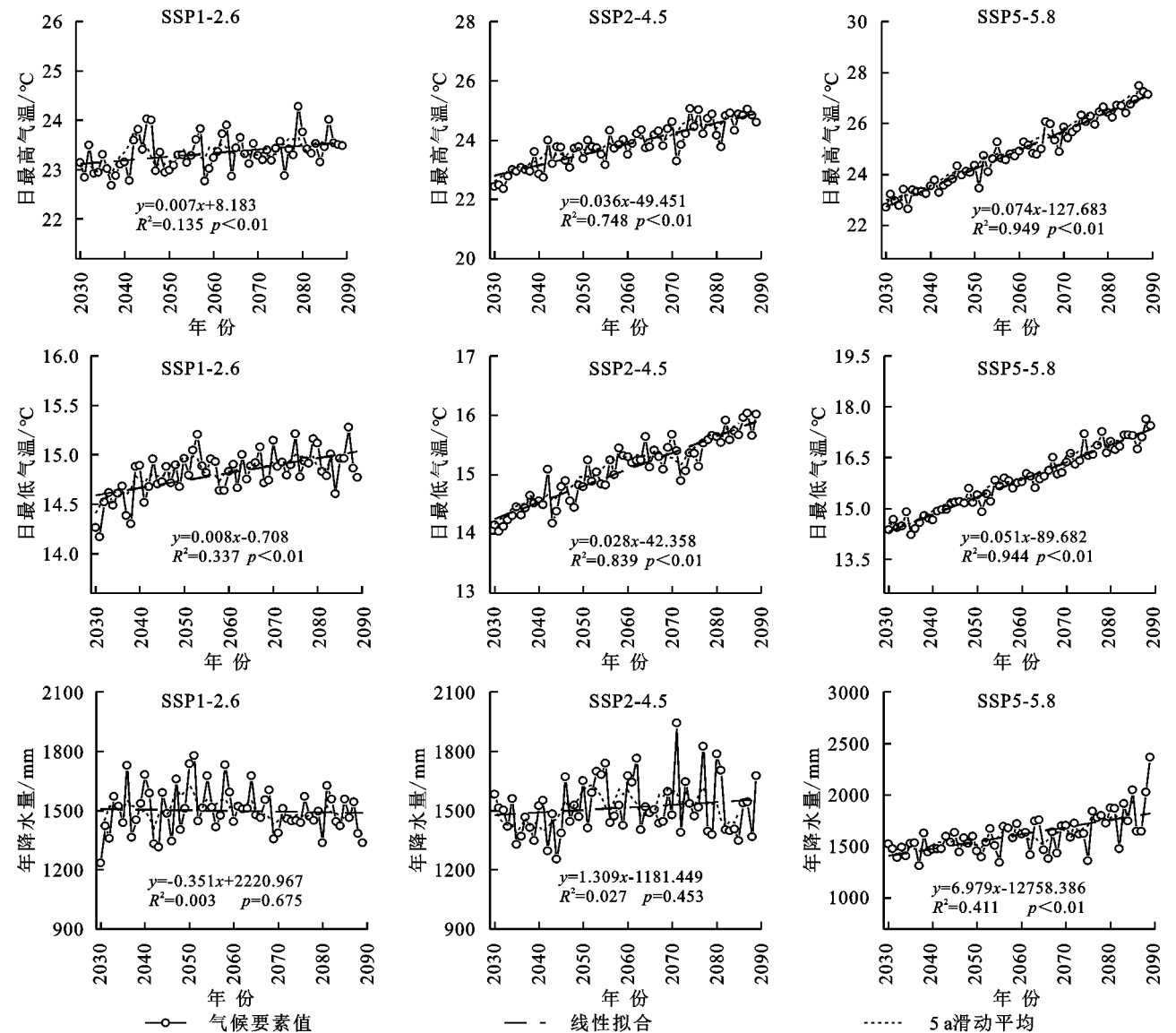


图 4 未来不同气候情景下各气候要素的年际变化趋势
Fig. 4 Interannual trends of climate elements under different climate scenarios in the future

表 6 未来不同时期不同气候情景下资水流域气候变化特征

Table 6 Climate change characteristics of Zishui Basin under different climate scenarios in different periods in the future

气象要素	基准期观测值	气候情景	气候变化值			
			2030—2049 年	2050—2069 年	2070—2089 年	平均
年均日最高气温/℃	22.08	SSP1-2.6	1.14	1.25	1.38	1.25
		SSP2-4.5	1.06	1.80	2.45	1.77
		SSP5-8.5	1.38	2.80	4.34	2.84
年均日最低气温/℃	14.13	SSP1-2.6	0.50	0.74	0.81	0.68
		SSP2-4.5	0.34	1.05	1.44	0.95
		SSP5-8.5	0.70	1.64	2.76	1.70
年降水量/mm	1472.54	SSP1-2.6	3.23	76.65	-5.75	24.71
		SSP2-4.5	-18.25	82.13	63.81	42.56
		SSP5-8.5	32.64	97.60	296.82	142.35

综合未来气温、降水相较于基准期变化的特征,能够发现气候变化对气温和降水的影响显著,且不同时段的影响情况有所不同。总的来说,未来资水流域呈现出暖湿化趋势,其日最高气温、日最低气温和年降水量总体表现出上升趋势,年际倾向率和较基准期的增幅随排放情景的升高而增大。此外,气温较降水的变化趋势更显著,日最高气温较最低气温的增暖速率及增温幅度更大。

3.4.2 空间变化特征 图 5 展示了不同气候情景下,资水流域 2030—2089 年日最高气温、日最低气温和降水在年尺度上较基准期变化的空间分布总体情况。各气候要素的变化量在不同气候情景下的分布格局是一致的,同一区域其数值上随着排放情景的上升呈增加之势。

就气温变化而言,未来资水流域表现出全面升温的趋势,日最高气温的变化值在空间上呈现出中间高两头低的分布特征,其中中部区域的东、西两侧增幅最为明显。整个流域的高值中心主要位于邵阳和新宁站附近,尤其是在 SSP5-5.8 气候情景下,邵阳站日最高气温的增幅接近 3.62℃。全流域范围内日最低气温增值的变幅在 1℃左右,其以隆回、邵阳县和新宁站一带为增加的高值区向西北、西南方向递减,并在武冈站附近达到最低。而降水在空间上呈现与气温不同的变化特征,各气候情景下流域大部分区域表现为正增长,这些区域主要集中在以冷水江站为中心的中下游地区。相较于其他两种气候情景,SSP5-8.5 情景下的降水增长率明显提升,冷水江站附近区域的变化率达 36.81%。此外,降水量减少最显著区域主要分布在流域的东、西两侧,减少率在 10%左右。

3.5 径流对气候变化的响应特征

3.5.1 年际变化特征 2030—2089 年,不同气候情景下桃江站与邵阳站年均径流的年际变化趋势及各

时期较基准期的变化情况分别见图 6 和表 7。根据模拟预估结果,未来 60 a 桃江站与邵阳站年均径流与流域预估降水的变化趋势基本一致,且两个站点在年际变化特征方面具有较高的统一性,其数值总体随着排放情景的上升而增大。在 SSP1-2.6 气候情景下,桃江站和邵阳站呈现出明显的年际振荡特征,其中桃江站呈微弱的减少趋势。对比各时段的变化率可以发现,近、远期两个水文站点的年均径流较基准期均有所减少,且以邵阳站的降幅更大,而在中期则以增长为主。对于另外两种情景,桃江站和邵阳站的年均径流量呈现出上升趋势,其中 SSP5-8.5 情景下的变化趋势通过了 $\alpha=0.01$ 水平的显著性检验,两个站点的年代际倾向率分别为 51.34, 12.39 $\text{m}^3/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 。在 SSP5-8.5 情景下,桃江站在中远期的年均径流量高于基准期且增幅处于较高水平,整个预估期(2030—2089 年)的平均增长率达 9.79%。相比之下,邵阳站远期时段的年均径流量较基准期增长明显,但整体水平仍略低于基准期 1.49%。

从平均变化率可以看出,桃江站的年均径流在 SSP1-2.6 气候情景下相对基准期有所减小,在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下有所增长,邵阳站各气候情景下的年均径流较基准期减少明显。可能的原因是邵阳站以上的上游区域较流域中下游地区具有更高的气温升幅,其流域蒸发量更大,且降水变化率总体处于较低水平甚至部分区域出现了负增长,同时这也意味着未来流域上游地区可利用水资源量减小的可能性较大。

3.5.2 年内变化特征 气候变化导致资水流域年均径流变化的同时,相应径流量在年内的时间分布也发生了改变。为进一步分析径流的年内分配情况,从季尺度、月尺度对比桃江站和邵阳站的基准期实测径流与未来模拟径流,结果如图 7 所示。

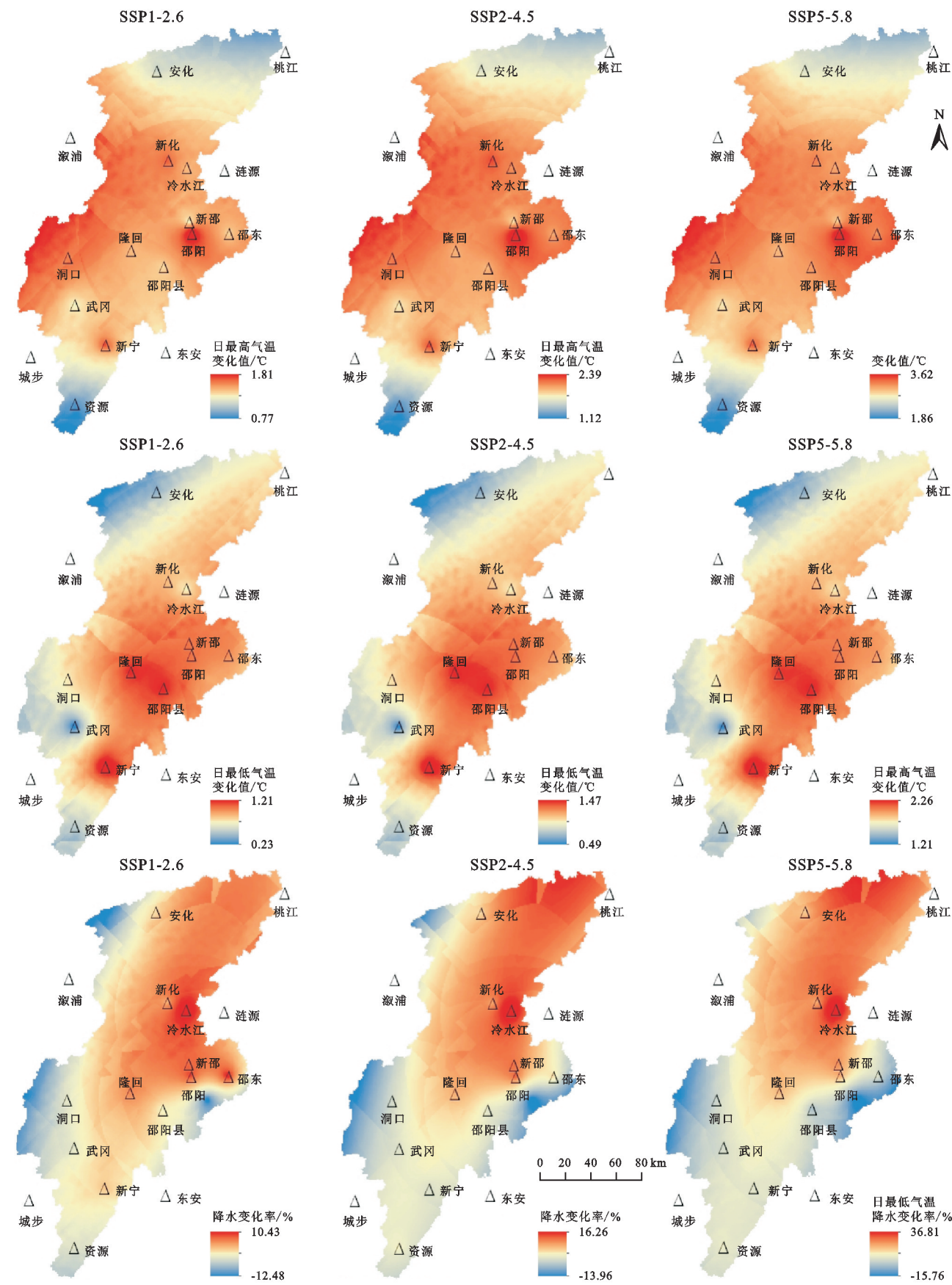


图 5 未来不同气候情景下各气候要素较基准期变化的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution map of changes of climate elements in different climate scenarios compared with the base period in the future

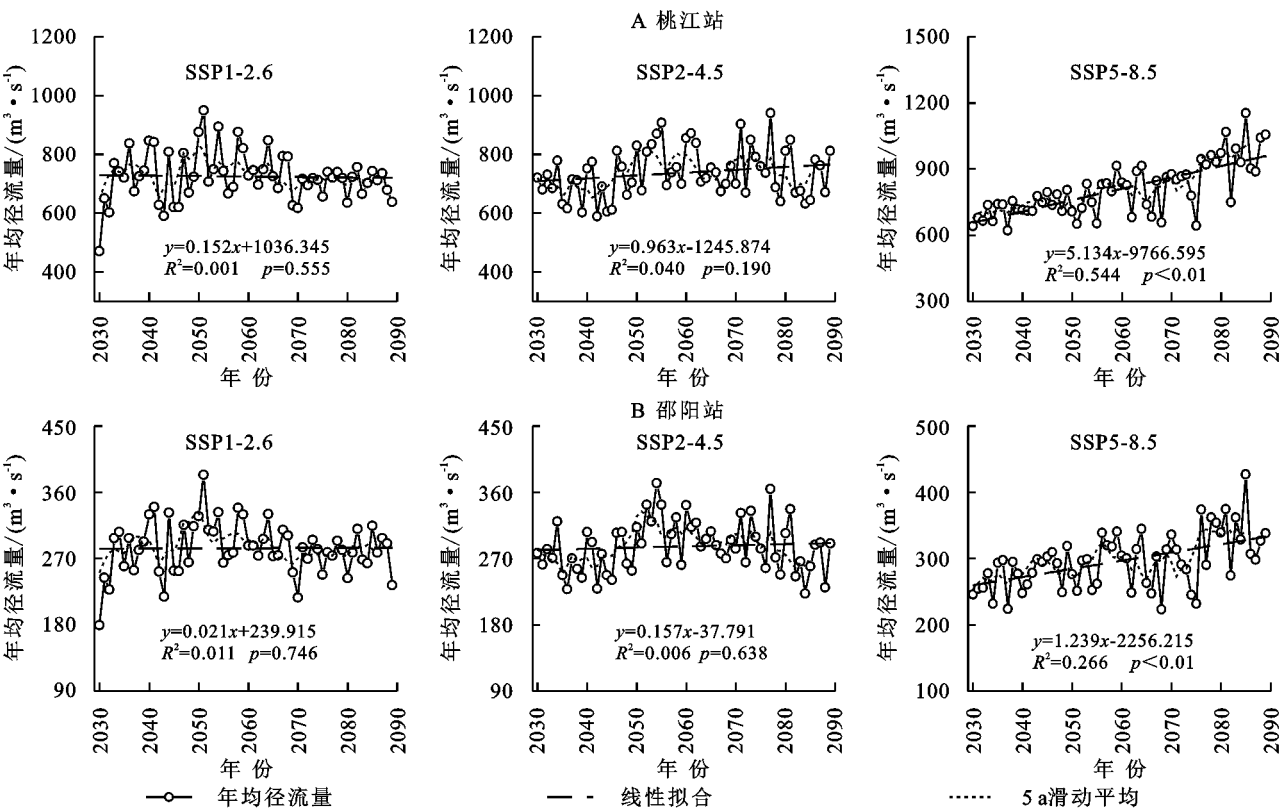


图 6 未来不同气候情景下桃江站和邵阳站年均径流的年际变化趋势

Fig. 6 Interannual trend of annual runoff at Taojiang and Shaoyang stations under different climate scenarios in the future

表 7 未来不同时期不同气候情景下桃江站和邵阳站年均径流的变化特征

Table 7 Variation characteristics of annual runoff at Taojiang and Shaoyang stations under different climatic scenarios in different periods in the future

水文站	基准期观测值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	气候情景	年均径流变化率/%			
			2030—2049	2050—2069	2070—2089	平均
桃江站	735.64	SSP1-2.6	−4.31	4.34	−4.73	−1.57
		SSP2-4.5	−6.07	4.86	1.80	0.19
		SSP5-8.5	−1.88	6.22	25.05	9.79
邵阳站	300.57	SSP1-2.6	−8.36	0.25	−8.47	−5.53
		SSP2-4.5	−10.60	1.93	−5.65	−4.78
		SSP5-8.5	−8.49	−3.33	7.35	−1.49

桃江站径流在未来不同时期不同气候情景下表现出较为复杂的季节变化。在春季,桃江站径流呈现出较基准期全面增加的变化特点,但增幅整体处于较低水平。从排放路径来看,桃江站在春季的径流量增幅排序为 $\text{SSP1-2.6} > \text{SSP2-4.5} > \text{SSP5-8.5}$ 。相反,夏季径流随着排放情景的上升而增大。与基准期相比,SSP1-2.6 情景下近期和远期的夏季径流表现出一定程度的减少,而另两种情景下整个预估期则以增长为主,尤以 SSP5-8.5 情景下的增幅为最大。与之类似的,秋季径流在 SSP1-2.6 情景下表现出一定的波动变化且整体以偏少为主,SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下径流变化率由近期的负值持续上升,并在远期分别达到峰值 9.83%,64.36%。对于冬季径

流,其呈现出较基准期明显减小的变化特点,尤其是 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下其平均降幅分别高达 16.10%,18.93%。

在月尺度上,1 月、5 月及 12 月所有气候情景和未来时段的径流量均小于基准期,其中 1 月的降幅普遍在 30% 以上。此外,11 月的径流量在 SSP1-2.6 和 SSP2-4.5 情景下也表现出显著的减少。还可以发现,8 月径流较基准期的增幅整体处于较高水平,3 种气候情景下变化率的平均值分别为 38.52%,44.45%,82.58%,3 月、4 月次之。以上分析表明桃江站枯水期水资源将面临更加紧缺的风险,汛期(4—10 月)有提前的趋势,且主汛期(6—9 月)水资源配置的均匀程度将上升。

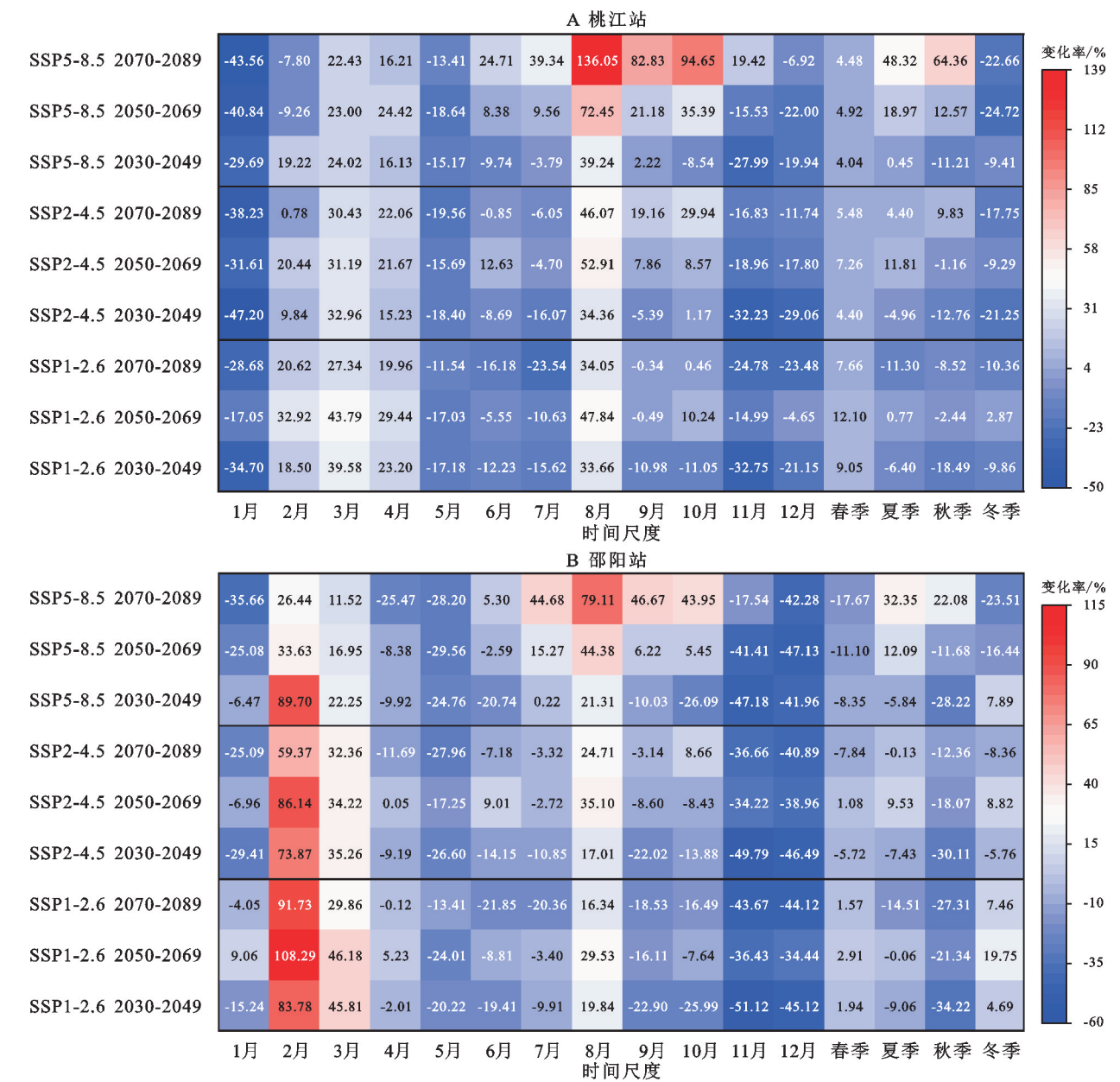


图 7 不同气候情景下未来各个时期不同时间尺度桃江站与邵阳站径流量较基准期变化率的颜色图

Fig. 7 Colorimetric graph of variation rate of runoff at Taojiang and Shaoyang stations compared with the base period at different time scales under different climate scenarios in the future

与桃江站不同,邵阳站径流显著减少的季节为秋季,SSP1-2.6,SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 气候情景下的平均变化幅度均处于较高水平,分别为 -30.96% 、 -20.18% 、 -5.94% 。在春和冬季节,SSP1-2.6 情景下的径流较基准期均表现出一定的增长,且秋季的增幅更大,另两种情景下其变化则整体以减少为主,尤以 SSP5-8.5 情景下的降幅为最大。此外,夏季径流在 SSP1-2.6 情景下较基准期明显减少,其降幅仅次于秋季,另两种情景下的径流以正向变化为主,其中 SSP1-2.6 情景下远期时段的增幅为 32.35% 。与季节径流变化率相吻合,邵阳站大部分月份表现出显著的减少特征,如 1 月、4—6 月和 11—12 月,径流较基准期明显增长出

现在 2—3 月及 8 月,其中 2 月经流的增幅均处于极高水平。综合来看,邵阳站同样存在汛期提前的趋势,且表现出枯水期更枯、汛期更均匀的分布特征。

4 结论

- (1) 当前气候下,SDSM 模型能够准确地模拟资水流域气温的季节变化,对降水的模拟结果相对稍差,总体在资水流域具备较好的适用性与较高的参考价值。
- (2) SWAT 模型能够较真实地模拟资水流域月径流过程,其模拟结果与实测值的相关性与一致性较高,在资水流域具有较好的适用性。
- (3) 未来资水流域呈较显著暖湿化趋势,这种趋

势随排放情景的升高而增大。与基准期相比,流域全范围升温且以新宁、邵阳站附近增幅最大,降水增加区域集中在以冷水江为中心的中下游地区,减少区域位于洞口站以西区域。

(4) 未来桃江站与邵阳站年均径流与流域降水的变化趋势基本一致。与基准期相比,桃江站年均径流在 SSP1-2.6 气候情景下减少了 1.57%,在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下分别增长 0.19%,9.79%,而邵阳站各情景下的年均径流较基准期减少明显,流域上游地区可利用水资源量减小的可能性较大。从径流年内变化来看,枯水期流域水资源将面临更加紧缺的风险,且汛期有提前的趋势,主汛期水资源分配的均匀程度将上升。

资水流域气温全面升高将使极端高温事件发生概率明显增加,且理论上每升温 1℃,大气持水能力增加 7%,极端强降水事件随之增多^[30]。在此背景下,流域未来洪涝、干旱等极端水文事件风险进一步加剧。因此,在本文研究的基础上,后续可聚焦于资水流域未来极端气候事件预估及极端径流对其响应研究,同时考虑土地利用变化进一步对径流变化进行归因分析,深入探析未来气温、降水、土地利用变化等对流域径流的影响,以期对资水流域实现流域综合治理、制定防洪抗旱决策提供科学参考。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] 商放泽,王可昉,黄跃飞,等.基于 Budyko 假设的三江源径流变化特性及量化分离[J].同济大学学报:自然科学版,2020,48(2):305-316.
Shang F Z, Wang K Y, Huang Y F, et al. Variation characteristics of runoff and the quantitative separation based on Budyko hypothesis in the Three-River Headwaters region[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2020,48(2):305-316.
- [3] Zhao Q D, Ding Y J, Wang J, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow [J]. Journal of Hydrology, 2019,573:60-81.
- [4] 王慧,肖登攀,赵彦茜,等.基于 CMIP6 气候模式的华北平原极端气温指数评估和预测[J].地理与地理信息科学,2021,37(5):86-94,142.
Wang H, Xiao D P, Zhao Y X, et al. Evaluation and projection of extreme temperature indices in the North China Plain based on CMIP6 models[J]. Geography and Geo-Information Science, 2021,37(5):86-94,142.
- [5] 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. Projections of runoff and hydrological drought in the Jinsha River Basin based on CMIP6[J]. Water Resources Protection, 2023,39(6):53-62.
- [6] 姜彤,吕嫣冉,黄金龙,等.CMIP6 模式新情景(SSP-RCP)概述及其在淮河流域的应用[J].气象科技进展,2020,10(5):102-109.
Jiang T, Lü Y R, Huang J L, et al. New scenarios of CMIP6 model (SSP-RCP) and its application in the Huaihe River Basin [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020,10(5):102-109.
- [7] 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.
Zhou T J, Zou L W, Chen X L. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6(CMIP6) [J]. Climate Change Research, 2019,15(5):445-456.
- [8] Adachi S A, Tomita H. Methodology of the constraint condition in dynamical downscaling for regional climate evaluation: A review[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020,125(11):e2019JD032166.
- [9] 徐宗学,姜瑶.变化环境下的径流演变与影响研究:回顾与展望[J].水利水运工程学报,2022(1):9-18.
Xu Z X, Jiang Y. Studies on runoff evolution mechanism under changing environment: A state-of-the-art review[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(1):9-18.
- [10] 董立俊.雅砻江流域径流对未来气候变化的时空响应研究[D].湖北宜昌:三峡大学,2020.
Dong L J. Spatiotemporal Response of Runoff to Climate Change in Yalongjiang River Basin [D]. Yichang, Hubei: China Three Gorges University, 2020.
- [11] 李彤,胡国华,顾庆福,等.近 55 年来降水及人类活动对资水流域径流的影响[J].水文,2018,38(6):54-58,88.
Li T, Hu G H, Gu Q F, et al. Impact of precipitation and human activities on runoff in Zishui River in recent 55 years [J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38 (6):54-58,88.
- [12] 李兵,文强,章新平,等.湖南省资水流域汛期暴雨气候特征分析[J].灌溉排水学报,2020,39(12):136-144.
Li B, Wen Q, Zhang X P, et al. Characteristic analysis of the heavy rains during monsoon season in Zishui Basin of Hunan Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020,39(12):136-144.
- [13] 虞美秀,刘小龙,邱巍,等.资水流域短期/长期综合干旱指数的构建与应用[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):65-71.
Yu M X, Liu X L, Qiu W, et al. Development and application of composited drought index in short and long term at Zishui River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015,26(3):65-71.
- [14] 张爱玲,王韶伟,汪萍,等.基于 SWAT 模型的资水流域

- 径流模拟[J].水文,2017,37(5):38-42,26.
- Zhang A L, Wang S W, Wang P, et al. Runoff simulation of Zishui Basin based on SWAT model[J]. Journal of China Hydrology, 2017,37(5):38-42,26.
- [15] 李兵,章新平,杨令,等.湖南省资水流域极端降水量时空变异特征及重现期极端降水量的推算[J].灌溉排水学报,2019,38(11):117-128.
- Li B, Zhang X P, Yang L, et al. Spatial and temporal evolutionary characteristics of extreme precipitation and it's estimation for certain return period in Hunan Zishui River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019,38(11):117-128.
- [16] 侯婷娟,高耶.湖南资水水沙变化特征及成因分析[J].水利水电快报,2018,39(12):11-13,48.
- Hou T J, Gao Y. Analysis of the characteristics and causes of water and sand changes in Hunan Zishui River Basin[J]. Express Water Resources & Hydro-power Information, 2018,39(12):11-13,48.
- [17] 何朝飞,骆成彦,陈伏龙,等.基于CMIP6多模式的和田河流域未来气候变化预估[J].地学前缘,2023,30(3):515-528.
- He C F, Luo C Y, Chen F L, et al. CMIP6 multi-model prediction of future climate change in the Hotan River Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023,30(3):515-528.
- [18] 邓鹏,徐进超,王欢.基于CMIP6的气候变化对鄱阳湖流域径流影响研究[J].水利水运工程学报,2023(4):71-80.
- Deng P, Xu J C, Wang H. Study on the impact of climate change by CMIP6 on the rainfall-runoff process of Poyang Lake Basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(4):71-80.
- [19] 周芷菱,张利平,王惠筠,等.基于CMIP6的莱茵河流域极端水文事件变化特征研究[J].武汉大学学报:工学版,2022,55(4):328-338.
- Zhou Z L, Zhang L P, Wang H Y, et al. Change characteristics of extreme hydrological events in the Rhine River Basin based on CMIP6[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022,55(4):328-338.
- [20] Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M. SDSM: A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts[J]. Environmental Modelling & Software, 2002,17(2):145-157.
- [21] 陈威霖,江志红,黄强.基于统计降尺度模型的江淮流域极端气候的模拟与预估[J].大气科学学报,2012,35(5):578-590.
- Chen W L, Jiang Z H, Huang Q. Projection and simulation of climate extremes over the Yangtze and Huaihe River Basins based on a Statistical Downscaling Model[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2012,35(5):578-590.
- [22] 叶加俊.汉江上游流域径流模拟及未来气候变化响应[D].武汉:华中科技大学,2018.
- Ye J J. Runoff Simulation of the Upper Reaches of the Hanjiang River and Future Climate Change Response[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [23] 侯保俭.长江上游流域统计降尺度方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- Hou B J. Statistical Downscaling Methods in Upper Reaches of Yangtze River Basin of China[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [24] Arnold J G, Muttiah R S, Srinivasan R, et al. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2000,227(1/4):21-40.
- [25] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245.
- [26] 马小芳,林爱文,方建.1960—2012年长江中下游极端降水与极端径流时空演变研究[J].测绘与空间地理信息,2018,41(2):157-160,163.
- Ma X F, Lin A W, Fang J. Research on spatio-temporal variation of extreme precipitation and extreme runoff in the middle and lower reaches of Yangtze River from 1960—2010[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018,41(2):157-160,163.
- [27] 代慧慧,杨汉波,胡庆芳.基于SDSM的疏勒河流域气候变化统计降尺度研究[J].水利水运工程学报,2015(5):46-53.
- Dai H H, Yang H B, Hu Q F. Prediction of climate change over Shule River Basin based on a statistical downscaling method[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(5):46-53.
- [28] 刘卫林,熊翰林,刘丽娜,等.基于CMIP5模式和SDSM的赣江流域未来气候变化情景预估[J].水土保持研究,2019,26(2):145-152.
- Liu W L, Xiong H L, Liu L N, et al. Estimate of the climate change in Ganjiang River Basin using SDSM method and CMIP5[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(2):145-152.
- [29] Huang J, Zhang J C, Zhang Z X, et al. Simulation of extreme precipitation indices in the Yangtze River Basin by using statistical downscaling method (SDSM)[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012,108(3):325-343.
- [30] 中国气象局气候变化中心.中国气候变化蓝皮书2021[M].北京:科学出版社,2021.
- Climate Change Center of the China Meteorological Administration. Blue Book on Climate Change in China 2021[M]. Beijing: Science Press, 2021.