

基于 HEC-HMS 模型的兰江流域径流预测

唐中楠, 杨国丽, 李军, 刘鹏霄

(河北建筑工程学院 河北省水质工程与水资源综合利用重点实验室, 河北 张家口 075000)

摘要: [目的] 分析兰江流域径流对气候变化的水文过程响应, 为区域水资源可持续发展和防洪抗旱提供科学基础。[方法] 利用 2015—2018 年日降雨径流过程和 6 场暴雨洪水过程率定并验证 HEC-HMS 水文模型在该流域的适用性; 基于 SDSM 统计降尺度模型, 对 2030—2100 年 CanESM2 模式下 RCP2.6, RCP4.5 和 RCP8.53 种情景的气候数据进行降尺度, 生成兰江流域 6 个气象站点未来日降水序列以预测未来气候变化下的径流响应。[结果] HEC-HMS 模型对场次洪水和逐日径流模拟的相关系数平均值达到 0.89, 0.77, 平均效率系数达到 0.86, 0.76; RCP2.6 情景下研究区面降水量较于基准期(2015—2018 年)减小 0.82%, 在 RCP4.5, RCP8.5 情景下分别增大 6.18%, 18.17%; RCP2.6, RCP4.5, RCP8.53 种情景下多年平均径流相较于基准期分别增幅为 17.00%, 26.22%, 41.93%。[结论] HEC-HMS 模型在兰江流域有较好的适用性; 未来兰江流域径流呈显著上升趋势, 增幅程度随辐射强迫度的增加同步增大。当辐射强迫度升高至 8.5 W/m^2 时, 流域径流量平均每 10 a 上升 $49.49 \text{ m}^3/\text{s}$ 。预计 21 世纪末多年平均径流量达到 $1101 \text{ m}^3/\text{s}$, 年径流变化起伏剧烈, 汛期径流占全年比例较高, 旱涝事件趋于频繁, 对人民福祉威胁较大。

关键词: HEC-HMS 模型; SDSM 模型; CanESM2 模式; 径流模拟; 兰江流域

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)05-0137-09

中图分类号: TV121

文献参数: 唐中楠, 杨国丽, 李军, 等. 基于 HEC-HMS 模型的兰江流域径流预测[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 137-145. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20210809.002; Tang Zhongnan, Yang Guoli, Li Jun, et al. Runoff prediction in Lanjiang River basin based on HEC-HMS model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 137-145.

Runoff Prediction in Lanjiang River Basin Based on HEC-HMS Model

Tang Zhongnan, Yang Guoli, Li Jun, Liu Pengxiao

(Hebei Key Laboratory of Water Quality Engineering and Comprehensive

Utilization of Water Resources, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

Abstract: [Objective] Runoff responses to climate changes in Lanjiang River basin were analyzed in an effort to provide a scientific basis for improving sustainable water resources, flood control, and drought resistance. [Methods] The applicability of the HEC-HMS hydrological model in this basin was determined by calibrating the processes of daily rainfall and runoff, in addition to six processes of rainstorms and floods from 2015 to 2018. Based on the statistical downscaling model (SDSM), the climate data of three climate change scenarios (RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5) under the CANESM2 model from 2030 to 2100 were downscaled for generating future daily precipitation time series at six meteorological stations in Lanjiang River basin in order to predict the runoff in response to future climate changes. [Results] The average correlation coefficients of the HEC-HMS model for floods and daily runoff simulations were 0.89 and 0.77, respectively. The average efficiency coefficients of the HEC-HMS model for floods and daily runoff simulations were 0.86 and 0.76, respectively. Precipitation in the study area under the RCP2.6 scenario decreased by 0.82% compared with the base period (2015—2018), and increased by 6.18% and 18.17% under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, respectively. Average annual runoff under the RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios increased by 17.00%, 26.22%, and 41.93%, respectively, compared with the base period. [Conclusion] The HEC-HMS model is

收稿日期: 2021-04-19

修回日期: 2021-06-07

资助项目: 河北省科技厅项目“河北建筑工程学院院士工作站建设专项”(199A4201H); 河北省教育厅青年资助项目(QN2020424); 河北省教育厅重点项目(ZD20180202)

第一作者: 唐中楠(1997—), 男(汉族), 浙江省嘉兴市人, 硕士研究生, 研究方向为水信息技术。Email: xiaoranr1@sohu.com。

通讯作者: 杨国丽(1980—), 女(汉族), 河北省张家口人, 硕士, 副教授, 主要从事水信息技术研究。Email: YGL2004@163.com。

applicable for runoff simulation in the Lanjiang River basin. In the future, runoff in the Lanjiang River basin will show a significant upward trend, and increase synchronously with the enhancement of radiation forcing. When radiative forcing increases to 8.5 W/m^2 , runoff will increase by $49.49 \text{ m}^3/\text{s}$ every 10 years, and predictably, the average annual runoff will reach $1\ 101 \text{ m}^3/\text{s}$ at the end of the 21st century. Additionally, annual runoff will fluctuate sharply, runoff in the flood season will account for a higher proportion of the year, and drought and flood events will tend to be frequent.

Keywords: HEC-HMS model; SDSM model; CanESM2; runoff simulation; Lanjiang River basin

政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第五次评估报告中指出,从 1880 年以来全球平均表面温度上升 $0.85 \text{ }^\circ\text{C}$,21 世纪初已成为有记录以来最炎热的时期^[1]。随着温室气体排放的增加,全球范围内辐射强迫度和温度持续上升,温度的上升导致更高的蒸散速率,这极大影响了区域水文过程和人文事件(即洪水和干旱)发生频率^[2],因此研究水文水资源对气候变化的响应具有重要现实意义。大气环流模式(general circulation models, GCMs)是目前广泛应用于大尺度气候研究的方法^[3]。然而 GCMs 输出受到低分辨率和缺乏区域气候数据限制,降尺度方法常用于弥补 GCMs 对区域气候预测的不足^[4]。SDSM (statistical down scaling model)统计降尺度模型耦合了天气发生器和多元线性回归,在气候变化情景研究中得到广泛应用^[5]。

气候变化下的水文过程响应逐渐成为水文水资源研究领域的热点^[6],水文模型是模拟流域水循环过程及气候和人类活动变化对水资源响应,揭示径流变化规律的重要工具和方法^[7]。其中,与 SDSM 模型对接应用较为广泛的水文模型有 SWAT 模型^[8]、VIC 模型等^[9]。HEC-HMS(hydrologic engineering center and hydrologic modeling system)模型是由美国陆军工程师兵团研发的半分布式水文模型,因其相对简单高效的结构和明确的物理机制而被国内外学者广泛应用^[10]。Abdessamed 等^[11]利用 HEC-HMS 模型验证阿尔及利亚艾因赛夫拉市防洪混凝土墙防洪效果及其对洪峰流量的削减效果,发现市区挡土墙的存在显著减少了洪水区面积。Mahmood 等^[12]通过对该模型量化分析,发现了过去 50 a 余非洲第四大淡水湖乍得湖入库流量迅速下降,其中人类活动因素占总比例的 66%,气候因素仅为 34%。袁玉等^[13]探究了秦淮河流域洪水特征对景观格局的响应,发现景观丰富度较高的区域洪水危害性较小。田竞等^[14]基于修正 Morris 法优化了模型参数敏感性分析过程,并验证了模型在官山河流域的适用性。基于上述分析,国内外学者对 HEC-HMS 模型的研究主要集中于山洪预报预警和雨洪对下垫面变化的响应机制研究。然而,目前将 HEC-HMS 模型与 SDSM 模型耦合并应用

于未来气候变化下的径流响应的研究还较少,加深耦合模型的应用理解对未来径流变化预测有现实意义。

兰江流域受降雨和地形等因素影响,是浙江省内防洪抗汛的重点流域。历史上有记录的该流域发生的特大洪水超过 56 次。20 世纪以来受到气候变化等因素影响,洪水发展到平均每 4 a 一次,最近一次特大洪水出现在 2017 年 6 月下旬,兰溪站监测水位达到 31.86 m ^[15]。因此,本文针对兰江流域构建 HEC-HMS 模型,并将其与 SDSM 模型结合,依托 CanESM2 气候模式研究未来不同 RCPs 情景下的流域径流变化趋势,探究在全球变暖气候变化背景下径流的响应过程,以期为区域防洪工程和水资源管理提供重要参考和一定的理论支持。

1 研究区域数据与研究方法

1.1 研究区概况

兰江流域位于钱塘江上游,浙江省中西部,水文上通常将马金溪、衢江和兰江统称为兰江。流域上游起源于安徽省休宁县,干流全长约为 303 km,流域境内总面积 $1.94 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域跨越东经 $118^\circ 40' - 120^\circ 38'$,北纬 $28^\circ 60' - 29^\circ 30'$ 之间,地形以丘陵和盆地为主,整体地势呈现四周高、中间低的特点,气候属于东亚副热带季风区,年平均年降水约为 $1\ 200 \sim 1\ 700 \text{ mm}$,暴雨多集中在 4—8 月,多年平均温度约在 $17 \sim 18 \text{ }^\circ\text{C}$ 间,流域径流主要补给源是大气降水,多年平均径流量 $608 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[16]。研究区域选取兰江兰溪水文站以上流域,区域地形和雨量站点分布见图 1。

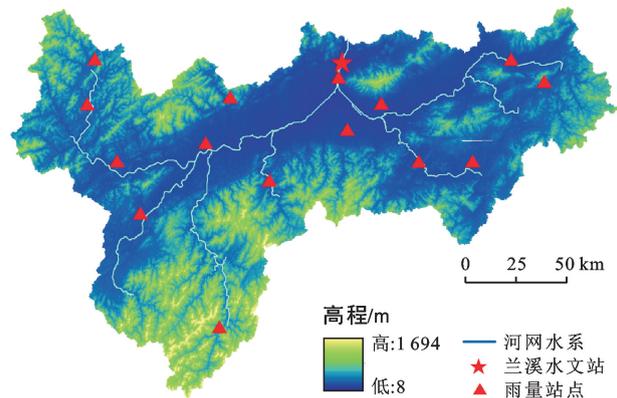
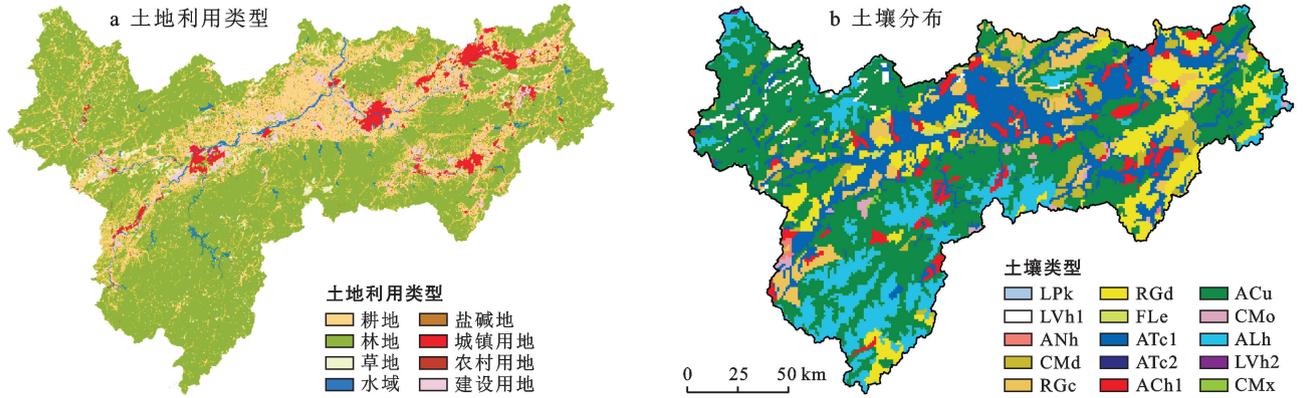


图 1 兰江流域雨量站及地形图

1.2 数据来源及处理

1.2.1 地理空间数据 地理空间数据包括流域数字高程、土地利用和土壤分布数据。数字高程数据来自于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)的 30 m 分辨率 GDEM V2 30 M 产品数据集。土地利用

数据为中国科学院资源环境科学数据中心提供的 1 km 分辨率 2018 年土地利用现状遥感监测数据,通过兰江流域矢量边界提取(见图 2a)。土壤分布数据来自世界土壤数据库 HWSD (harmonized world soil database)数据集,边界裁剪兰江流域范围见图 2b。



注:①LPk 为黑色石灰薄层土;LVh1 为简育高活性淋溶土;ACu 为腐殖质低活强酸土;ACh1 为简育低活性强酸土 1;RGe 为石灰性疏松岩性土;CMo 为铁铝性锥形土;CMx 为艳色锥形土;RgD 为不饱和疏松岩性土;ACh2 为简育低活性强酸土 2;ALh 为简育高活性强酸土;ANh 为简育火山灰土;FLe 为饱和冲积土;CMd 为不饱和锥形土;ATc1 为人为堆积土 1;ATc2 为人为堆积土 2;②ATc2 比 ATc1 在土壤含沙量、壤土含量、土壤碳酸钙降低,黏土含量上升;LVh2 比 LVh1 在土壤含沙量、壤土含量上升,黏土含量、土壤碳酸钙下降;ACh2 比 ACh1 在土壤含沙量上升,壤土含量、黏土含量和土壤碳酸钙含量均下降。

图 2 兰江流域 2018 年土地利用类型与土壤类型分布

1.2.2 水文气象数据 构建 HEC-HMS 模型的水文气象数据来自于历年中华人民共和国水文年鉴第 7 卷第 1 册,径流数据选取 2015—2018 年的兰江兰溪站逐日平均流量表和洪水水文要素摘录表,同时考虑到预测模型对下游兰江水库的安全性影响,故本着对水利工程最不利原则选取 6 场峰值流量大于 3 000 m³/s 的典型大规模洪水数据。降水量数据选取流域内 15 个雨量站点(表 1)的降水量摘录表。构建 SDSM 模型所需资料包括历史气象数据、NCEP(na-

tional centers for environment prediction)历史逐日再分析数据和 CanESM2 大气环流模式输出数据。实测历史气象资料采用流域内东阳、衢州、开化、江山、金华和武义 6 个气象站点 1975—2005 年逐日降水数据。NCEP 历史再分析数据选取 1975—2005 年日序列的 26 种大气环流因子。CanESM2 大气环流模式数据来自加拿大气候情景网,选取 BOX_043 X_43 Y 和 BOX_044 X_43 Y 网格下 RCP2.6, RCP4.5 和 RCP8.5 3 个排放情景的 2030—2100 逐日序列。

表 1 兰江流域雨量站点地理位置

雨量站名称	控制河流	东经	北纬	雨量站名称	控制河流	东经	北纬
马金	马金溪	118°20'	29°25'	东阳	东阳江	120°13'	29°18'
密赛	马金溪	118°24'	29°10'	楼店	南江	120°21'	29°11'
常山(三)	常山港	118°32'	28°54'	永康	永康江	120°10'	28°54'
江山	江山港	118°37'	28°42'	武义	武义江	119°50'	28°55'
衢州	衢江	118°52'	28°59'	金华	金华江	119°37'	29°05'
钟埂	乌溪江	118°59'	28°22'	金兰水库	白沙溪	119°28'	29°00'
铜山源水库	铜山源	118°57'	29°08'	兰溪	兰江	119°29'	29°13'
龙游溪口	灵山港	119°11'	28°51'				

1.3 研究方法

1.3.1 HEC-HMS 水文模型 HEC-HMS 模型包括流域模块、控制模块、气象模块和时间序列管理模块 4 个部分^[17],流域模块的降雨—径流计算中又分为产

流模块、汇流模块、基流模块和河道汇流模块,通过模块式操作可以采用不同的计算方案模拟流域内的水文过程。

本研究通过 HEC-GeoHMS 10.2 对流域 DEM

数据进行处理,提取流域水系特征和地形参数并将流域划分为 18 个子流域,利用泰森多边形法计算每个子流域的雨量站权重,在此基础上生成 HEC-HMS 工程文件(图 3)。产流模块采用 SCS-CN 径流曲线数法,率定参数包括降雨初损、CN 值和不透水性;汇流模块采用 Snyder 单位线法,参数包括流域滞时和峰值系数;基流模块采用消退基流法,参数有初始基流、衰减常数和衰减阈值;河道汇流模块采用马斯京跟法,参数包括蓄量常数 K ,流量比重 X 和河段数。考虑到初始参数值输入模型的模拟较差,故参数率定过程中采用手动试错法结合模型内置的 Nelder-Mead 法及峰值加权均方根目标函数确定最优参数^[18]。验证模型选用洪峰流量相对误差(RE_Q),洪量相对误差(RE_W),峰现时差(ΔT),Nash 效率系数(N_{SE})和相关性系数(R^2)5 个指标评价模型模拟结果,洪峰流量相对误差 RE_Q 和洪量相对误差 RE_W 误差范围应在 20% 以内,峰现时差 ΔT 误差范围应在 3 h 以内,Nash 效率系数(N_{SE})应在 0.6 以上。 RE_Q , RE_W 和 ΔT 绝对值越低, N_{SE} 和 R^2 越接近 1 代表模拟效果越好^[19]。

根据上述方法构建兰江流域 HEC-HMS 模型,洪水场次模拟选取 4 场暴雨洪水对模型参数进行率定,2 场暴雨洪水对模型模拟效果进行验证;逐日降雨径流选取 2015—2016 年日径流数据对模型参数进行率定,2017—2018 年日径流数据对模型模拟效果验证。

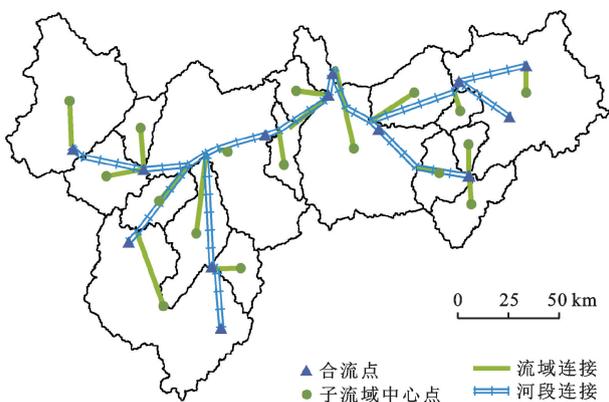


图 3 兰江流域划分及模型结构

1.3.2 SDSM 统计降尺度模型 SDSM 模型是耦合多元线性回归分析和随机天气发生器的统计降尺度模型,能够将低分辨率的 GCM 大气环流模式输出数据转换为站点或小尺度气候要素的日序列,其核心为通过多元回归分析方法建立预报因子与预报量之间的统计关系^[20]。模型主要使用步骤包括:筛选预报因子、数据转化及质量控制、率定验证模型、天气发生

器和情景发生器,其中预报因子的选择依据为预报因子与预报量间有强相关性和明确的物理过程、所选因子能够被 GCM 准确模拟^[21]。根据建立的统计关系率定及验证模型后即可凭借于 GCM 输出数据模拟预测未来日序列的气象要素变化过程,其基本原理^[22]如下所示:

$$\omega_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j P_{ij}, R_i^{0.25} = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j P_{ij} + e_i \quad (1)$$

$$T_i = \gamma_0 + \sum_{j=1}^n \gamma_j P_{ij} + e_i \quad (2)$$

式中: ω_i 为第 i 天降水概率; P_{ij} 为第 i 天第 j 个预报因子; α, β 和 γ 为模型参数; R_i 为降水量; T_i 为温度变量; e_i 为误差。

本研究采用加拿大气候中心研发的 CanESM2 模式的未来输出降水数据进行研究。林朝晖等^[23]对 17 个 GCMs 模式在中国东部历史降水模拟能力进行了分析,发现只有 4 种 GCMs 模式能够同时还原小雨至暴雨雨量的年代增加,CanESM2 模式是其中之一。Xuan 等^[24]分析了 18 个 GCMs 模式在浙江省区域气候变化模拟能力,发现 CanESM2 模式是温度模拟、降水模拟和风速模拟的最佳模式之一,温度模拟绝对偏差小于 1°C ,降水偏差小于 5%。因此,CanESM2 气候模式可以认为适用于浙江区域。

2 结果与分析

2.1 HEC-HMS 模型结果

2.1.1 洪水模拟结果 洪水模拟结果见表 2。由表 2 可以看出 6 场洪水的洪峰相对误差和洪量相对误差均小于 20%,其中洪峰流量相对误差绝对值均值为 6.82%,洪量相对误差绝对值均值为 7.55%;峰现时差除 20170411 号洪水外均小于 2 h;Nash 效率系数为 0.78~0.92,相关性系数均高于 0.8。

从模拟与实测流量对比结果(图 4)中看出,模型模拟洪水过程与实测过程趋势基本一致。率定期 20170614,20170625,20180305 这 3 场洪水 Nash 效率均接近于 0.9,洪量误差均接近或小于 5%,峰现表现趋于雨停峰现,模拟效果较好。洪号 20180430,20170411 洪水洪量相对误差稍大,具体表现为局部模拟过程和实测洪水过程有所差距,其原因可能为实测流量数据为摘录洪水数据线性插值处理后的结果,坦化后实际流量过程线导致局部模拟过程误差增大;同时通过泰森多边形法计算流域面降水量不能全部还原降水的空间和时间过程,从而进一步增大洪水过程线和峰现时间误差。总体上看,率定期和验证期共 6 场洪水的相对误差、效率系数等大体符合要求,表明 HEC-HMS 模型可以用于兰江流域洪水模拟。

表 2 HEC-HMS 模型洪水模拟结果

时期	洪号	降雨量/ mm	洪峰流量 相对误差/%	洪量 相对误差/%	峰现时差/ h	相关系数	效率系数
率定期	20170614	180	-5.06	5.34	0	0.93	0.92
率定期	20170625	326	-0.94	2.68	0	0.85	0.89
率定期	20180305	58	-7.49	6.02	-1	0.91	0.90
率定期	20180430	66	5.79	-10.34	-1	0.89	0.82
验证期	20170411	107	-11.59	-13.43	-4	0.95	0.85
验证期	20180414	87	-10.06	7.53	0	0.82	0.78

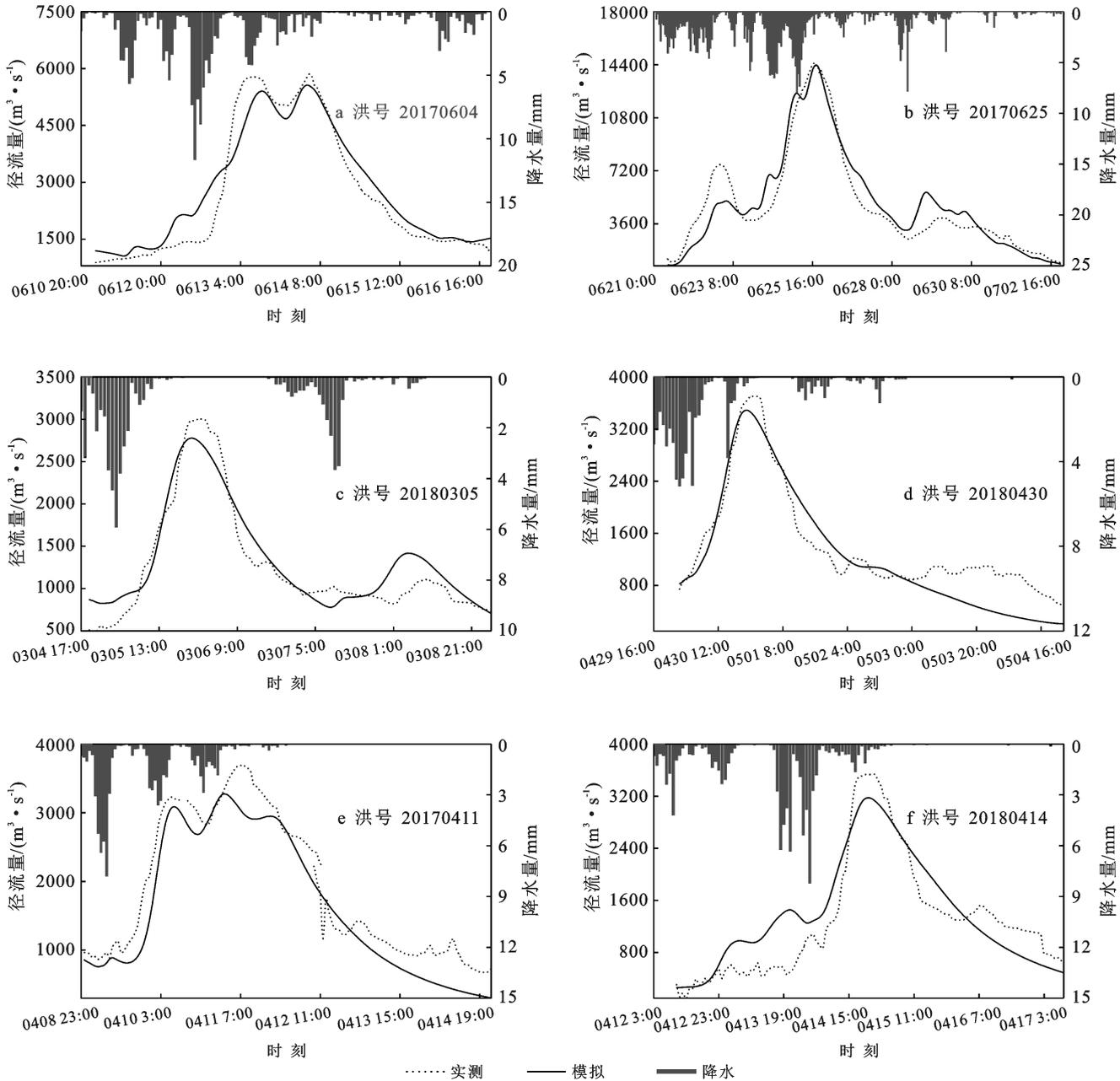


图 4 兰江流域率定期(a-d)与验证期(e-f)洪水过程模拟结果

2.1.2 日径流模拟结果 表 3 为 HEC-HMS 模型日径流模拟结果评价,率定期逐日径流相关系数和效率系数均为 0.79,相对误差为 6.11%;验证期相关系数为

0.74,效率系数为 0.73,相对误差 R_e 为 14.02%,总体上率定期模拟效果优于验证期,模拟值稍大于实测值。图 5 为率定期和验证期模拟逐日径流和实测径流过程

对比,可以看出过程线拟合效果较好。模型对于极端径流模拟值偏小,实测最高流量日为 2017 年 6 月 25 日,日平均径流量达到 $12\ 900\ \text{m}^3/\text{s}$,模型模拟结果仅为 $6\ 653.50\ \text{m}^3/\text{s}$;2015 年 6 月 19 日,实测日平均径流量达到 $8\ 570\ \text{m}^3/\text{s}$,模拟结果为 $4\ 907.50\ \text{m}^3/\text{s}$;2015 年 6 月 30 日,实测日平均径流量达到 $6\ 290\ \text{m}^3/\text{s}$,模拟结果为 $4\ 829.30\ \text{m}^3/\text{s}$ 。综合效率系数、相关系数

和相对误差来看,HEC-HMS 模型在兰江流域有较好的适用性,可以用于该地区的径流模拟。

表 3 模型模拟结果评价

时段	R^2	N_{SE}	$R_e/\%$
率定期	0.79	0.79	6.11
验证期	0.74	0.73	14.02

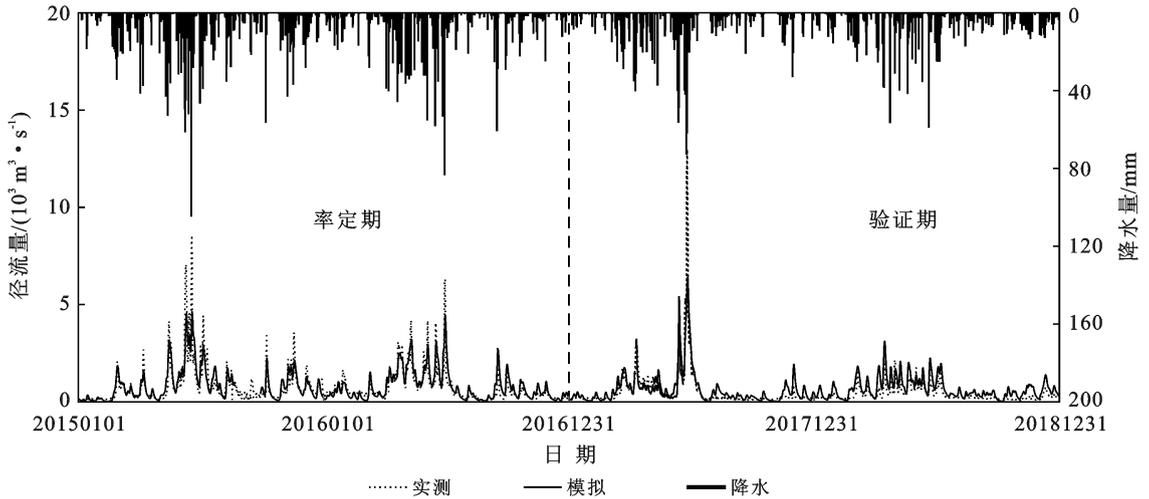


图 5 兰江流域验证期和实测期径流模拟过程

2.2 SDSM 模型结果

2.2.1 SDSM 模型率定与验证 选取 1975—1995 年为 SDSM 模型率定期,1996—2005 年为模型验证期。采用平均解释方差(E)、标准误差(SE)和相对误差评价模拟结果。考虑到 HEC-HMS 模型仅需输入降水序列,故本研究中仅对 6 个气象站点的日降水量进行模拟验证,结果见表 4。各站点标准误差为 $0.35\sim 0.40\ \text{mm}$,解释方差为 $0.34\%\sim 0.47\%$,说明所选的预报因子能够解释降水量超过 $34\%\sim 47\%$ 的误差。本研究中对降水量的模拟结果与郝丽娜等^[25]对河西走廊降水模拟的解释方差 $0.09\%\sim 0.64\%$,初祁等^[26]对太湖流域降水模拟的解释方差 $0.11\%\sim 0.26\%$ 和娄伟等^[27]对泾河流域降水模拟中解释方差为 $0.35\%\sim 0.45\%$ 等结果相似,同时年降水量统计结果表明模拟与实测值基本相近,因此认为构建的 SDSM 模型可适用于兰江流域未来径流模拟。

2.2.2 未来情景预测 将 2030—2100 年分为 3 个时段,即 2030s(2030—2049 年),2050s(2050—2079 年)和 2080s(2080—2100 年),以 1975—2005 年作为基准期对比。应用已构建的 SDSM 模型输入 CanESM2 模拟下 RCP2.6,RCP4.5 和 RCP8.5 种排放情景数据得到 6 个气象站点未来降水逐日序列,并根据泰森多边形法计算流域面降水量,结果见表 5。

表 4 SDSM 模型降水模拟结果统计值

站名	时期	年实测均值/mm	年模拟均值/mm	解释方差/%	标准误差/mm
东阳	率定期	1 445	1 401	0.42	0.36
	验证期	1 358	1 364	0.47	0.36
金华	率定期	1 544	1 420	0.40	0.35
	验证期	1 408	1 578	0.29	0.39
江山	率定期	1 687	1 802	0.36	0.40
	验证期	1 806	1 946	0.38	0.37
开化	率定期	1 726	1 801	0.40	0.36
	验证期	1 733	1 827	0.45	0.35
衢州	率定期	1 491	1 328	0.34	0.37
	验证期	1 600	1 588	0.41	0.36
武义	率定期	1 519	1 485	0.39	0.35
	验证期	1 408	1 451	0.42	0.37

RCP2.6,RCP4.5 和 RCP8.5 浓度路径下流域降雨量较于基准期分别增幅 -0.82% , 6.18% 和 18.17% 。RCP2.6 情景下未来降水量呈现轻微下降趋势,平均减幅为 $1.97\ \text{mm}/10\ \text{a}$,21 世纪末期较于基准期下降 1.41% ;RCP4.5 情景下降水量增长至顶峰后减少,增幅为 $14.84\ \text{mm}/10\ \text{a}$,2050s 时期平均多年降水量达到最高值 $1\ 860.75\ \text{mm}$,较于基准期增幅 10.76% ,21 世纪末期回落至 $1\ 767.36\ \text{mm}$,较于基准期增幅

5.20%;RCP8.5 情景降水量持续快速增长,增幅为 43.60 mm/10 a,21 世纪中前期已明显高于基准期,21 世纪末期平均多年降水量达到 2 338.70 mm,较于

基准期上升 39.21 %,相比于其他情景变化更为剧烈。总体上看,兰江流域未来降水量呈上升趋势,降水量增幅程度随着辐射强迫度的上升而增大。

表 5 兰江流域各情景下未来降水预测

排放情景	基准期/ mm	降水变化值/ (mm/10 a)	多年降水量均值/mm			降水变化率/%		
			2030s	2050s	2080s	2030s	2050s	2080s
RCP2.6	1 680.03	-1.97	1 677.87	1 664.42	1 656.38	-0.13	-0.93	-1.41
RCP4.5	1 680.03	14.84	1 723.58	1 860.75	1 767.36	2.59	10.76	5.20
RCP8.5	1 680.03	43.60	1 674.11	1 942.88	2 338.70	-0.35	15.65	39.21

2.3 未来径流模拟

将 SDSM 模型降尺度生成的未来较好序列输入到已校准的 HEC-HMS 模型中,得到未来 RCPs 3 种排放情景下的流域径流变化过程(图 6)。结合表 6 可知未来不同排放情景各时段下平均多年径流量,对比基准期(2015—2018 年)未来径流量均成上升趋势,RCP2.6,RCP4.5 和 RCP8.5 3 种情景下多年平均径流相较于基准期分别增幅为 17%,26.22% 和 41.93%。

本一致,RCP2.6 情景下径流量基本趋于稳定,较于基准期增长幅度 15%~20%,预测期内平均每 10 a 减少 1.6 m³/s;RCP4.5 情景下径流量增长至峰值后缓慢下降,较于基准期增幅 20%~32%,预测期内平均每 10 a 上升 4.65 m³/s;RCP8.5 情景下径流量持续上升,从 2030s 时段较于基准期增幅 17%持续上升至 2080s 时段增幅 71%,预测其内平均每 10 a 上升 49.49 m³/s,同时 RCP8.5 情景下各年份径流量起伏较大,变化过于剧烈的径流过程代表旱涝事件频率和强度将明显提升。

未来各时段径流量变化规律与降水变化过程基

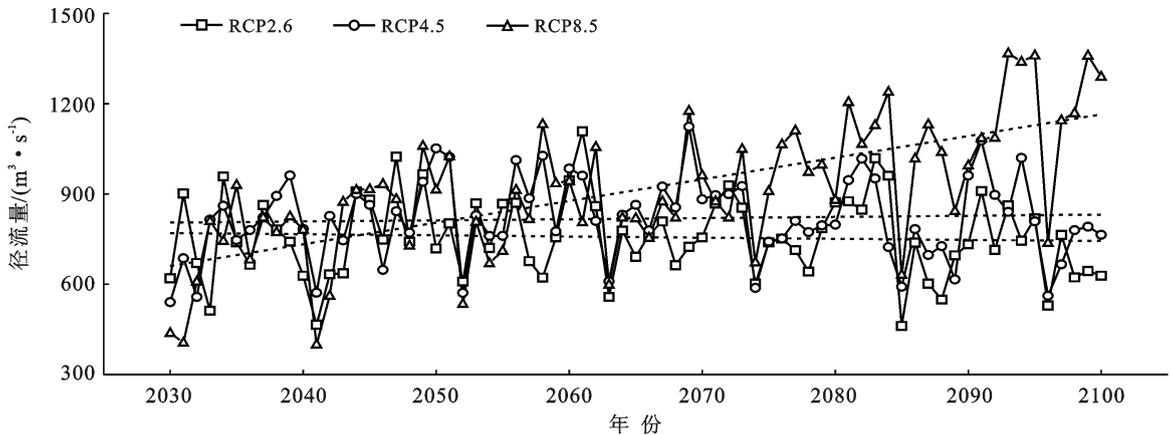


图 6 兰江流域 3 种排放情景下未来径流变化

表 6 兰江流域未来情景下流域年平均流量

基准期流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	情景	多年平均流量/(m ³ ·s ⁻¹)		
		2030s	2050s	2080s
644	RCP2.6	754.19	768.44	742.48
	RCP4.5	777.95	850.15	810.51
	RCP8.5	754.77	886.04	1 101.17

图 7 所示为各时段平均月径流模拟结果。RCP8.5 情景下各时段径流除 6,10,11 月外均出现不同程度的增幅,其中丰水期(4—7 月)涨幅显著高于枯水期(9—12 月),且随着时间的推移,丰水期和枯水期的径流差也不断扩大,至 21 世纪末期,丰水期已

占全年径流 71.93%。

RCP4.5 情景和 RCP2.6 情景下径流年内分配均趋于稳定,相较于基准期 1—5 月径流出现明显上升,7—9 月和 12 月径流出现了小幅上升,而 6,10,11 月径流则出现了不同程度的下降,至 21 世纪末期 2 种情景汛期径流占比分别达到 60.06% 和 61.63%,枯水期径流量则有减小的态势。总体来看预测结果表明 10 月和 11 月以外的月份平均径流均呈明显增加趋势,其中 2—5 月平均径流量增幅明显,丰水期径流增幅程度均大于枯水期,表明未来流域径流年内分配可能趋于参差,需要更加注意丰水期防洪水利工程。

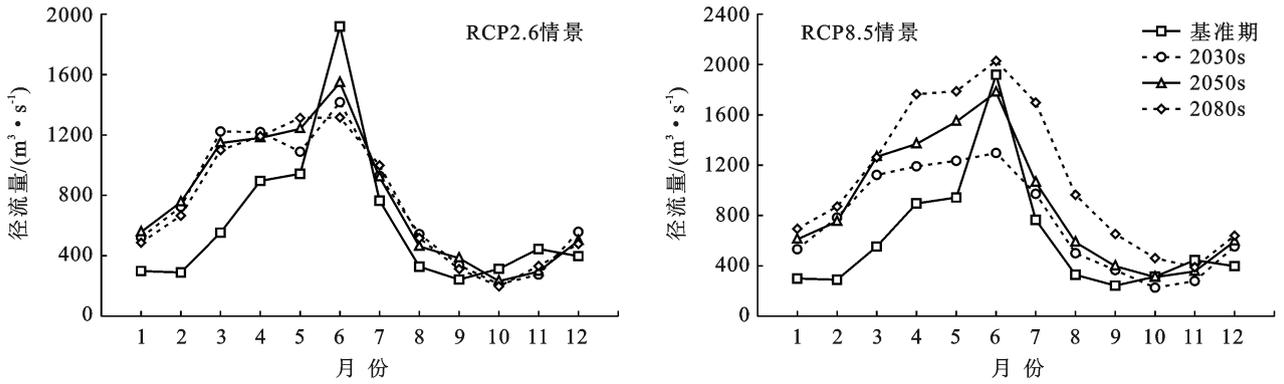


图 7 兰江流域多年月平均径流基准期与实测期比较

3 讨论与结论

3.1 结论

(1) HEC-HMS 模型在兰江流域有较好的适用性。通过构建适用于兰江流域的 HEC-HMS 模型并率定校准模型,场次洪水模拟平均效率系数 0.86,平均相关系数 0.89,平均洪峰相对误差 6.82%,平均洪量相对误差 7.56%;日径流量模拟平均效率系数 0.76,平均相关系数 0.77,模型可以较为准确地还原研究区水文过程。

(2) 未来兰江流域径流量呈上升趋势,增幅程度随辐射强迫度同步增大。RCP2.6 情景下径流趋于稳定,流域径流量每 10 a 减少 $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$;RCP4.5 情景下径流量增加至峰值后减少,每 10 a 上升 $4.65 \text{ m}^3/\text{s}$;RCP8.5 情景下径流量持续攀升,每 10 a 径流量上升 $49.49 \text{ m}^3/\text{s}$ 。RCP8.5 情景下年径流量变化剧烈,旱涝事件发生概率和强度均有所增加。

(3) 未来径流量年内分配将更趋于极端,汛期径流量占全年比例将有所上升。RCP2.6, RCP4.5 和 RCP8.5 3 种情景下丰水期径流量上升幅度均明显高于枯水期,增幅程度与辐射强迫度增大趋势一致。预测期汛期径流占比总体高于基准期,至 21 世纪末期 RCP2.6, RCP4.5 和 RCP8.5 3 种浓度路径下分别由基准期的 46.59% 上升到 60.06%, 61.63% 和 71.93%。

3.2 讨论

本研究所用的 CanESM2 模式是国际耦合模式比较计划第 5 阶段 CMIP5 发布的气候模式之一,CMIP5 与第 3 阶段 CMIP3 相比在气候模拟能力上已有显著提高^[28],但是 GCMs 模式仍然不能完全模拟大气要素之间的互相作用,在未来气候变化的预测中有极大的不确定性,尤其是影响因素较多且过程复杂的降水事件^[29],不同气候模式由于机制原理、物理气候结构、模式分辨率和辐射强迫度情景设计的较大差异,对未来气候的模拟能力也不尽相同,通过比较

多个 GCMs 模式能够尽量减少不确定性。Zhang 等^[30]通过 HadCM3, ECHAM5 和 CCSM3 这 3 个模式研究发现钱塘江流域未来降水量极有可能呈现上升趋势, Xia 等^[31]通过 GFDL 等 3 个 GCMs 模式预测钱塘江流域丰水期降水量上升而枯水期下降,以上多种气候模式研究和本研究一致发现钱塘江流域和其上游兰江流域的降水量在未来有上升趋势,因此本研究基于 SDSM 模型分析兰江流域未来降水量将有所上升的结论具有可信度。

降尺度方法也是区域尺度的未来气候变化研究中的不确定性因素之一。SDSM 统计降尺度方法虽然可以减少空间分辨率尺度上带来的误差,但其预测因子的选择存在主观性,模型情景生成与基线一致这一结构导致模拟结果年际降水量变化较大^[32]。

本研究通过分析未来降水变化并结合水文模型研究了兰江流域径流的变化趋势,但仅通过单出口观测流量进行模型的率定与验证难以说明流域整体的径流变化得到了准确的还原,进一步分析不同区域的径流量演变趋势将是未来研究的重点。同时,土地利用类型的改变会对流域径流产生重大影响^[33],充分考虑流域未来土地利用、土壤分布和高程的改变对径流的影响是值得进一步研究的科学问题。

【 参 考 文 献 】

- [1] 董思言, 高学杰. 长期气候变化. IPCC 第五次评估报告解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 56-59.
- [2] Zhang Yuqing, You Qinglong, Chen Changchun, et al. Impacts of climate change on streamflows under RCP scenarios: A case study in Xin River basin, China [J]. Atmospheric Research, 2016, 178/179: 521-534.
- [3] Wang Jucui, Huo Aidi, Zhang Xuezheng, et al. Prediction of the response of groundwater recharge to climate changes in Heihe River basin, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 79(1): 1-16.
- [4] 冯禹, 崔宁博, 龚道枝, 等. 用统计降尺度模型预测川中丘

- 陵区参考作物蒸散量[J].农业工程学报,2016,32(S1):71-79.
- [5] 刘永和,郭维栋,冯锦明,等.气象资料的统计降尺度方法综述[J].地球科学进展,2011,26(8):837-847.
- [6] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.
- [7] 高玉芳,陈耀登,蒋义芳,等. DEM 数据源及分辨率对 HEC-HMS 水文模拟的影响[J].水科学进展,2015,26(5):624-630.
- [8] 郭静,王宁,粟晓玲.气候变化下石羊河流域上游产流区的径流响应研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(12):211-218.
- [9] 刘梅,吕军.我国东部河流水文水质对气候变化响应的研究[J].环境科学学报,2015,35(1):108-117.
- [10] 张静,杨明祥,雷晓辉,等.基于 HEC-HMS 的青狮潭水库入库洪水预报研究[J].水土保持通报,2017,37(4):225-229,235.
- [11] Abdessamed D, Abderrazak B. Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in rainfall-runoff modeling and evaluating floodplain inundation maps in arid environments: Case study of Ain Sefra city, Ksour Mountain, SW of Algeria [J]. Environmental Earth Sciences, 2019,78(19):586-603.
- [12] Mahmood R, Jia Shaofeng. Assessment of hydro-climatic trends and causes of dramatically declining stream flow to Lake Chad, Africa, using a hydrological approach [J]. Science of the Total Environment, 2019, 675:122-140.
- [13] 袁玉,方国华,陆承璇,等.基于景观生态学的城市化背景下洪灾风险评估[J].地理学报,2020,75(9):1921-1933.
- [14] 田竞,夏军,张艳军,等. HEC-HMS 模型在官山河流域的应用研究[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(1):8-14.
- [15] 夏芳.钱塘江流域气候变化及其对水文径流的影响[D].浙江 杭州:浙江大学,2016.
- [16] 刘莉, Krewinkel B C, Booi M J, 等.兰江流域降雨量与气候指数的相关性研究[J].浙江大学学报(工学版),2018,52(12):2332-2341.
- [17] 郑鹏,林韵,潘文斌,等.基于 HEC-HMS 模型的八一水库流域洪水重现期研究[J].生态学报,2013,33(4):1268-1275.
- [18] 邹杨,胡国华,于泽兴,等. HEC-HMS 模型在武水流域山洪预报中的应用[J].中国水土保持科学,2018,16(2):95-102.
- [19] 桂哈亮,张春萍,武治国,等. HSPF 在热带沿海流域水文模拟中的应用[J].水土保持通报,2020,40(6):115-120,129.
- [20] 董立俊,董晓华,曾强,等.气候变化条件下雅砻江流域未来径流变化趋势研究[J].气候变化研究进展,2019,15(6):596-606.
- [21] 刘昌明,刘文彬,傅国斌,等.气候影响评价中统计降尺度若干问题的探讨[J].水科学进展,2012,23(3):427-437.
- [22] 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.
- [23] 林朝晖,杨笑宇,吴成来,等. CMIP5 模式对中国东部夏季不同强度降水气候态和年代际变化的模拟能力评估[J].气候与环境研究,2018,23(1):1-25.
- [24] Xuan Weidong, Ma Chong, Kang Lili, et al. Evaluating historical simulations of CMIP5 GCMs for key climatic variables in Zhejiang Province, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 128(1/2):207-222.
- [25] 郝丽娜,粟晓玲,王宁.基于统计降尺度模型的河西走廊未来气温和降水的时空变化[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(10):219-228.
- [26] 初祁,徐宗学,蒋昕昊.两种统计降尺度模型在太湖流域的应用对比[J].资源科学,2012,34(12):2323-2336.
- [27] 娄伟,李致家,刘玉环.多模式下泾河上游流域未来降水变化预估[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):1-16.
- [28] 任婧宇,赵俊侠,马红斌,等.2015—2100 年黄土高原四季气候变化的时空分布趋势预测[J].水土保持通报,2019,39(5):262-271.
- [29] 方思达,刘敏,任永建.南水北调中线工程水源区和受水区旱涝特征及风险预估[J].水土保持通报,2018,38(6):263-267,276.
- [30] Zhang Xujie, Xu Yueping, Fu Guangtao. Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change [J]. Journal of Hydrology, 2014,515:205-222.
- [31] Xia Fang, Liu Xingmei, Xu Jianming, et al. Trends in the daily and extreme temperatures in the Qiantang River basin, China [J]. International Journal of Climatology, 2015,35(1):57-68.
- [32] 赵焱,李志,刘文兆. GCM 降尺度预测泾河流域未来降水变化[J].水土保持研究,2014,21(1):23-28.
- [33] 郝振纯,苏振宽.土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响[J].水科学进展,2015,26(4):491-499.