

# 基于 SWAT 模型的南渡江上游流域径流对气候变化的响应

曹 灿<sup>1,2</sup>, 孙 瑞<sup>2</sup>, 吴志祥<sup>2</sup>, 李 茜<sup>1</sup>

(1.宁夏大学 地理科学与规划学院, 银川 750021; 2.中国热带农业科学院  
橡胶研究所/农业农村部儋州热带作物科学观测试验站, 海口 571101)

**摘 要:**为了评估未来气候变化对热带岛屿性森林流域径流的影响,以海南岛南渡江上游流域为例,构建本地化 SWAT 模型,基于 CMIP6 全球气候模式数据提取的气候变化信号,定量辨析了流域径流量对气候变化的响应。结果表明:(1) 南渡江上游流域年平均径流量  $16.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,旱季和雨季径流量分别占年径流量的 17%,83%;(2) 1961—2020 年南渡江上游流域年平均径流减少趋势不显著,其中旱季径流增加 4.6%,而雨季径流减少 9.9%;(3) 流域旱季径流增加量远低于雨季径流减少量致使年平均径流量减少,旱季径流增加由降水增多所致,雨季气温升高引起蒸发加剧是造成径流减少的关键;(4) 在 CMIP6 计划的 SSP119,SSP126,SSP434,SSP245,SSP460,SSP370 和 SSP585 路径下,21 世纪不同时期研究区径流变化主要受降水变化的影响,而 21 世纪后期气候变化加剧会引起研究区径流变化幅度加大。研究区径流对降水变化的敏感性高于气温,降水变化主导未来时期南渡江上游流域的径流量变化。

**关键词:**气候变化;径流模拟;SWAT 模型;南渡江流域;海南岛

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0255-10

## Responses of Streamflow to Climate Change in Upstream of Nanduijiang River Basin Based on SWAT Model

CAO Can<sup>1,2</sup>, SUN Rui<sup>2</sup>, WU Zhixiang<sup>2</sup>, LI Qian<sup>1</sup>

(1.School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2.Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Danzhou Investigation & Experiment Station of Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Haikou 571101, China)

**Abstract:** In order to assess the impact of future climate change on streamflow of tropical island forest watersheds, taking the upstream of Nanduijiang River Basin in Hainan Island as an example, based on the climate change signals extracted from the CMIP6, we established a localized SWAT model to quantitatively analyze the response of streamflow to climate change. The results were summarized as follows: (1) The average annual streamflow in the upstream of Nanduijiang River Basin was  $16.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , and the streamflow in dry and rainy season accounted for 17% and 83% of the annual streamflow, respectively. (2) The average annual streamflow in the upstream of Nanduijiang River Basin decreased slightly during 1961—2020. And the streamflow in dry season increased by 4.6%, while the streamflow in rainy season decreased by 9.9%. (3) The increase of streamflow in dry season was much lower than the decrease in rainy season, resulting in the reduced average annual streamflow. The increase of streamflow in dry season was caused by the increase of precipitation, and the intensified evaporation caused by the rising temperature in rainy season was the key factor to the decrease of streamflow. (4) The responses of streamflow to precipitation change were more sensitive than that to temperature. Under the paths of SSP119, SSP126, SSP434, SSP245, SSP460, SSP370 and SSP585 of CMIP6, the streamflow changes in different periods in the 21st century were mainly affected by precipitation changes. And the

收稿日期:2021-05-20

修回日期:2021-06-15

资助项目:海南省自然科学基金高层次人才项目(2019RC335);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-33-ZP3)

第一作者:曹灿(1995—),女,重庆合川人,硕士研究生,研究方向为气候变化的水文效应。E-mail:m13677624207@163.com

通信作者:孙瑞(1985—),女,陕西榆林人,博士,助理研究员,主要从事土地利用变化的环境效应研究。E-mail:sunrui\_85@163.com

李茜(1981—),女,陕西汉中,博士,副研究员,主要从事环境生态修复研究。E-mail:li\_q@nxu.edu.cn

enhanced climate change will increase the streamflow variation range in the late 21st century. The streamflow in the study area is more sensitive to precipitation changes than temperature, and precipitation changes will dominate the streamflow changes in the upstream of Nanduijiang River Basin in the future.

**Keywords:** climate change; streamflow simulation; SWAT model; Nanduijiang River Basin; Hainan Island

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是美国农业部(USDA)和农业研究中心(ARS)于 20 世纪 90 年代开发的用于流域管理的分布式水文模型,在世界范围内得到广泛应用<sup>[1]</sup>。SWAT 模型可以较好地模拟天然的径流过程,反映流域径流变化特征,并且发现气候变化与人类活动对径流变化影响的趋势<sup>[2]</sup>。在气候变化背景下,耦合 SWAT 模型与全球气候模式来探索未来时期的径流变化是流域水管理的重要方法。CMIP6 是 CMIP(the coupled model intercomparison program in phase)计划中的第 6 阶段,是 CMIP 计划实施以来参与试验的模式数量最多、试验设计最为完善、数据模拟量最为庞大的一次<sup>[3]</sup>。其中 SSP-RCP 为不同共享社会经济路径(shared socioeconomic pathway,SSP)与代表性的浓度排放趋势(representative concentration pathway,RCP)相结合的变化情景,得出的气候情景预测更合理、更可靠。目前基于 SWAT 模型耦合 CMIP 以往不同阶段计划下的气候模式开展了大量研究。譬如,董立俊等<sup>[4]</sup>基于 SWAT 模型与 CMIP5 气候模式耦合下的研究表明雅鲁藏布江流域未来径流呈上升趋势,且增幅随着路径的辐射强迫增加同步增大;唐雄朋等<sup>[5]</sup>发现未来雅鲁藏布江拉孜以上流域随着 CMIP5 排放情景的升高,径流较基准期也呈现出增加趋势;王迪等<sup>[6]</sup>在山美水库流域基于 SWAT 和 CMIP5 的研究表明在 2031—2090 年的蓝水资源减少,绿水资源上升。然而,耦合 SWAT 模型与 CMIP6 阶段气候模式的径流对气候变化响应的定量研究仍相对较少<sup>[7]</sup>。

岛屿作为独特的自然生态系统,是沿海地区不可或缺的重要组成部分<sup>[8]</sup>。海南岛南渡江流域内存在着地表水丰枯悬殊、水资源分布不均等问题,对流域内的社会经济发展造成严重影响<sup>[9]</sup>。目前已开展的研究主要集中在南渡江中下游地区的水文情势,以及人类活动如伐林、修建水利工程等对径流的直接影响等方面<sup>[10-13]</sup>,而对流域上游地区径流特征的研究较少。南渡江上游径流汇入的松涛水库是海南西部重要的饮用水源地、农业灌溉用水来源<sup>[14]</sup>,其流量变化趋势对海南省的社会经济发展至关重要,且鉴于上游流域分布大量天然林,受人类活动影响较小,有利于研究气候变化对森林覆盖流域地表径流状况的影响

过程。因此,本文选取海南岛南渡江上游流域为研究区,建立 SWAT 模型模拟径流,分析 SWAT 模型的适用性,基于最新的全球气候模式 CMIP6 数据提取的气候变化信号<sup>[15]</sup>,探索气候变化背景下南渡江上游流域的地表水文效应,以为流域水资源管理提供理论支持。

## 1 研究区概况

南渡江是海南岛最大的河流,发源于海南省白沙黎族自治县南开乡南部的南峰山,干流全长 333.8 km,斜贯海南岛中北部,流域呈狭长形。南渡江水资源丰富,流域内有明显的干、湿两季,5—10 月为雨季,降雨量占全年的 85%,多暴雨,时有洪水灾害,11 月一次年 4 月为旱季,降雨量仅占全年的 15%,常发生春旱<sup>[16]</sup>。流域内多年平均降水量 1 900 mm,蒸发量 1 490 mm,降雨量自上游向下游递减,南部多于北部,巨大的蒸发量使流域内出现明显的缺水现象,近年来入海径流量也出现减少现象<sup>[17-18]</sup>。

南渡江上游流域(109°12′—109°29′E,18°58′—19°11′N)以福才水文站为流域出口(图 1)。地势呈西南高东北低,海拔高度 161~1 530 m,总面积为 507.22 km<sup>2</sup>。土地利用类型以林地为主,占流域总面积的 84.93%,橡胶林和耕地次之,分别占流域面积的 7.25%,7.22%,建筑用地与未利用地、水域面积较少,仅占流域面积 0.59%(图 2A)。土壤类型以红黏泥土为主,占流域面积 60.81%;其次为麻黄砂土、琼黄泥砂土和杂砂黄红土,分别占流域面积的 21.49%,9.55%,7.95%;紫棕泥土最少,仅占流域面积的 0.19%(图 2B)。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

所用数据包括数字高程模型(digital elevation model,DEM)、土地利用、土壤类型、气象、水文数据等。其中,DEM 通过美国空间信息情报局(National Geospatial-intelligence Agency,NGA)获取,空间分辨率为 30 m;土壤分类图通过中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)获取,空间分辨率为 1 km。基于 Landsat 多光谱影像的提取获得

2015 年海南岛土地利用信息<sup>[19]</sup>,共划分为橡胶林、林地、耕地、建筑用地与未利用土地以及水域 5 大类型。气象数据(1961—2020 年)为海口、儋州、琼中、东方和琼海气象站观测的逐日降水、最高与最低温度、平

均风速、平均相对湿度以及太阳辐射等数据,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);水文数据为福才水文站观测的日径流量数据(1961—2013 年),来源于海南省水文统计年鉴。

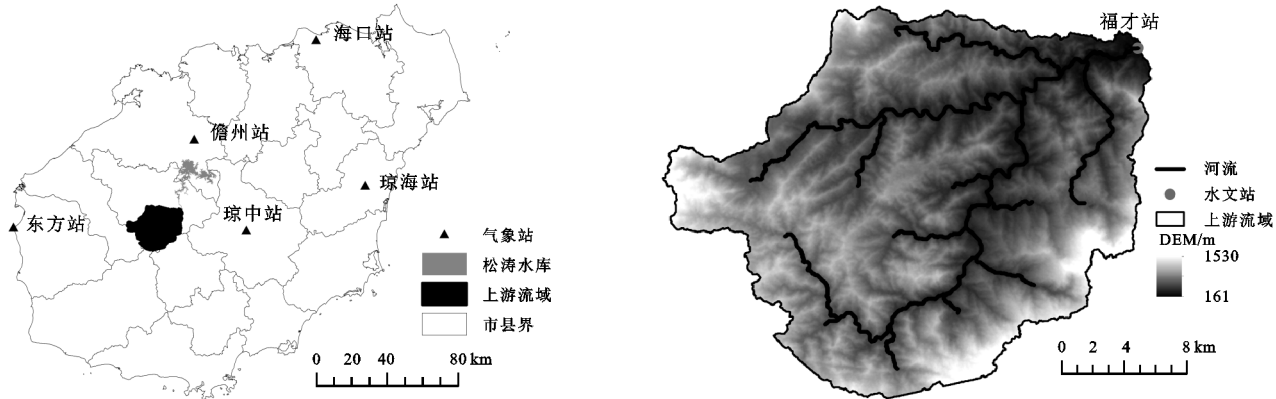


图 1 南渡江上游流域位置及水系分布

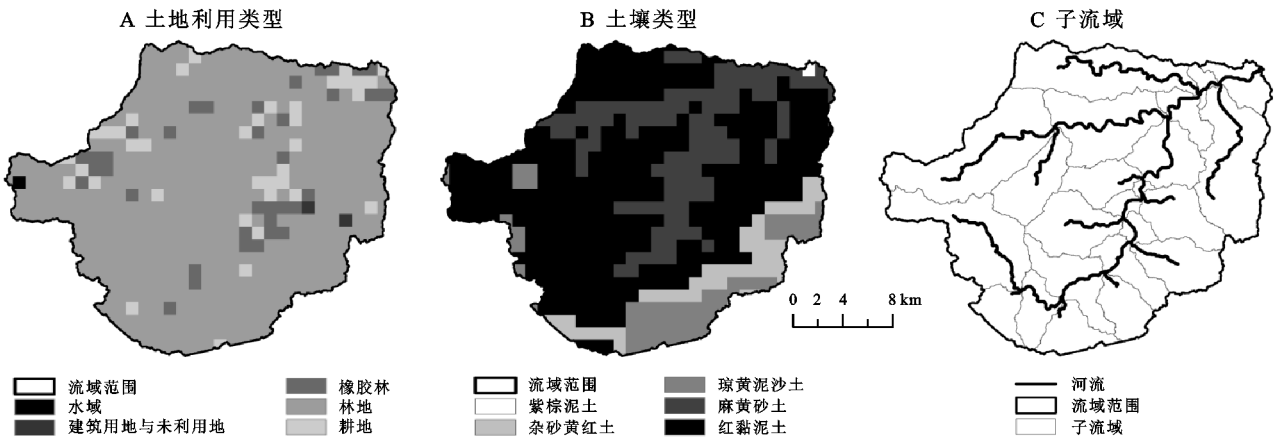


图 2 南渡江上游流域土地利用类型、土壤类型和子流域划分

另外,土壤属性参数包括土壤名称(SNAME)、分层数(NLAYERS)、土层到底部埋深(SOL\_Z)、有机碳(SOL\_CBN)、黏土(CLAY)、壤土(SILT)、砂土(SAND)、砾石含量(ROCK)、电导率(SOL\_EC)等,根据《中国土种志》查询获得;土壤湿容重(SOL\_BD)、有效持水量(SOL\_AWC)、饱和渗透系数(SOL\_K)等由美国农业部与华盛顿州立大学开发的土壤水特性软件 SPAW (Soil-plant-atmosphere-water)计算得到。

2.2 研究方法

2.2.1 SWAT 模型 SWAT 模型主要基于水量平衡方程(公式 1)来模拟径流的产流过程<sup>[20]</sup>。所涉及的水文过程包括:冠层截留、入渗、再分配、蒸散发、壤中流、地表径流、地下径流和回归流等,每个过程都有对应的参数和计算方法<sup>[21]</sup>。

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_d - Q_s - E_a - W_s - Q_w) \quad (1)$$

式中:SW<sub>t</sub> 为土壤含水量最终值;SW<sub>0</sub> 为起始土壤含水量;*i* 为时间序列;*R<sub>d</sub>* 为第 *i* 时段的降水量;*Q<sub>s</sub>* 为第

*i* 时段的地表径流量;*E<sub>a</sub>* 为第 *i* 时段的蒸散发量;*W<sub>s</sub>* 为第 *i* 时段向下渗透的地表水量;*Q<sub>w</sub>* 为第 *i* 时段的地下水回流量。以上参数的单位均为 mm。

在构建南渡江上游流域 SWAT 模型过程中,定义水文响应单元(hydrological response unit,HRU)时,分别设置土地利用类型、土壤分类、坡度分级占子流域面积的 5%,5%,10%,共将研究区划分为 23 个子流域和 93 个水文响应单元(图 2C)。在此基础上输入气象数据,创建模型数据库。

2.2.2 参数敏感性分析 使用 SWAT-CUP(Calibration and Uncertainty Programs)软件内置的 SUFI-2 算法进行参数敏感性分析,可以用于模型多站点月尺度的校准和验证。SUFI-2 算法包含的全局敏感性分析(Global sensitivity)可以一起对许多不同的参数进行操作,每一个参数的显著性都利用 T 检验法来评价<sup>[22]</sup>。T 检验法中有 t-state 和 p-state 两个评价指标,其中 p-state 的取值范围为 0~1。t-state 的大小反映了不同参数在本次模拟中的敏感性程度的高低,t-state



的绝对值越大,代表该参数越敏感;p-state 反映了每个敏感性参数的显著程度,p-state 越小越显著。筛选影响径流的敏感性参数,在 SWAT-CUP 中进行多次迭代,根据每个参数的 t-state 值与 p-state 值,最终确定研究区径流的参数敏感性排序。依据迭代精度验证结果,选择决定系数  $R^2$ ,纳什系数 NSE 和百分比偏差 PBIAS 作为评价模拟结果的指标<sup>[23]</sup>,评价等级分为不满意、满意、好和非常好。

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_{\text{avg}}^{\text{obs}})(Q_i^{\text{sim}} - Q_{\text{avg}}^{\text{sim}})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_{\text{avg}}^{\text{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{sim}} - Q_{\text{avg}}^{\text{sim}})^2} \quad (2)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_{\text{avg}}^{\text{obs}})^2} \quad (3)$$

$$\text{PBIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_i^{\text{sim}})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{\text{obs}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $R^2$ 为决定系数;NSE 为纳什系数;PBIAS 为百分比偏差; $n$  为时间序列长度; $Q_i^{\text{obs}}$  和  $Q_i^{\text{sim}}$  分别为时间步长  $i$  的径流实测值和模拟值; $Q_{\text{avg}}^{\text{obs}}$ 、 $Q_{\text{avg}}^{\text{sim}}$  分别为模拟期内实测和模拟的平均径流量。

**2.2.3 未来气候变化情景** 本文选择 CMIP6 计划中 CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MRI-ESM2-0 和 CNRM-ESM2-1 共 5 种全球气候模型的 7 类最新气候变化场景资料<sup>[24]</sup>,其中 SSP119,SSP126,SSP434,SSP245,SSP460,SSP370 和 SSP585 分别表示在可持续发展路径 SSP1 上对 RCP1.9,RCP2.6 情景的升级,在中度发展路径 SSP2 上对 RCP4.5 情景的升级,在局部发展路径 SSP3 上对 RCP7.0 情景的升级,在不均衡发展路径 SSP4 上对 RCP3.4,RCP6.0 情景的升级,以及在常规发展路径 SSP5 上对 RCP8.5 情景的升级。基于 CMIP6 气候模式 7 种路径下 21 种热带地区的降水+气温组合变化(基准期为 1995—2014 年),提取 21 世纪近期(2021—2040 年)、中期(2041—2060 年)和远期(2081—2100 年)的气候变化信号,用以模拟未来不同时期气候变化情景下南渡江上游流域的径流响应。

同时,根据常见梯度将温度变化分别设置为增加  $-4^{\circ}\text{C}$ , $-3^{\circ}\text{C}$ , $-2^{\circ}\text{C}$ , $-1^{\circ}\text{C}$ , $1^{\circ}\text{C}$ , $2^{\circ}\text{C}$ , $3^{\circ}\text{C}$ , $4^{\circ}\text{C}$ ,降水变化设置为增加  $-10\%$ , $-5\%$ , $5\%$ , $10\%$ ,共获得 44 种气候变化情景。随后基于 SWAT 模型进行不同气候变化情景下的南渡江上游流域的径流模拟。

**2.2.4 统计分析方法** 采用距平值表示径流实测数

值偏离平均值的大小,以距平百分率作为径流丰枯等级的划分依据;运用累积距平曲线诊断气候和水文要素的突变点<sup>[25]</sup>。Mann-Kendall 突变检验法不仅可以衡量气候和水文数据序列的变化趋势,还可以确定突变的时间<sup>[26]</sup>。相关性分析用于不同气候和水文要素间的相关性密切程度的检验<sup>[27]</sup>。多元线性回归模型可以实现径流归因<sup>[28]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 SWAT 模型校准与验证

根据福才水文站径流实测数据,选择 1961—1976 年作为 SWAT 模型径流模拟的预热期,1977—1987 年和 2006—2013 年分别为率定期和验证期。使用 SWAT-CUP 软件中 SUFI-2 算法的自动校准方法对与径流模拟密切相关的 16 个参数进行率定和验证,得到参数的最优值及参数敏感性排序(表 1),将参数率定值代入 SWAT 模型得到径流模拟最优结果。

研究区径流模拟结果的  $R^2$ ,PBIAS 和 NSE 在率定期分别为 0.74, $-22.06\%$ 和 0.57,在验证期分别为 0.87, $-24.33\%$ 和 0.74(表 2),表明率定期和验证期研究流域月尺度径流模拟值与实测值之间有较好的一致性。由图 3 可知,率定期和验证期径流的模拟值与实测值均拟合较好,且径流量变化与降水量趋势一致,模拟值能较好地反映实际径流。综上,SWAT 模型在南渡江上游流域具有良好的适应性,表明 SWAT 模型可用于该流域的径流过程模拟及其对气候变化的响应研究。

### 3.2 南渡江上游流域径流变化及其气候驱动

**3.2.1 径流变化特征** 南渡江上游流域在 1961—2020 年的年平均径流量为  $16.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 。其中,旱季和雨季径流量分别占年径流量的  $17\%$ , $83\%$ 。年平均径流量最低值( $3.73 \text{ m}^3/\text{s}$ )出现在 1969 年、1987 年和 2015 年平均径流量亦较低,均为  $6.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ;最高值( $34.38 \text{ m}^3/\text{s}$ )在 1964 年、1973 年和 1978 年亦较高,分别为  $31.9$ , $29.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据距平百分率统计结果(图 4)可知,过去 60 a 南渡江上游流域径流丰水、偏丰、平水、偏枯、枯水的年份分别有 19,6,9,12,14 个。其中,年平均径流量高于平均值的年份有 31 a,低于平均值的有 29 a。总的来说,1961—2020 年南渡江上游流域年平均径流量波动性较大,整体呈微弱下降趋势,10 a 变化率为  $-0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ 。采用 M-K 突变检验和累积距平法对观测数据进行突变检验,发现 60 a 间年平均径流无明显突变。

表 1 参数敏感性排序

排序	参数名称	物理意义	最佳值	下限	上限
1	V_ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	0.949	0.942	1.038
2	R_CN2.mgt	SCS 径流曲线系数	0.038	-0.055	0.065
3	R_CANMX.hru	最大冠层截留量	18.045	5.750	20.653
4	V_ALPHA_BF.gw	基流消退系数	-0.289	-0.349	-0.005
5	R_SOL_AWC.sol	土壤有效水含量	-0.120	-0.145	0.055
6	V_GWQMN.gw	浅层地下水径流系数	1.008	0.889	1.568
7	R_SOL_Z.sol	土壤表层到底层的深度	1.458	0.921	1.614
8	V_CH_K2.rte	主河道水力传导度	-0.010	-54.926	16.927
9	R_SLSUBBSN.hru	子流域平均坡长	0.079	0.063	0.106
10	R_EPCO.hru	植被蒸发补偿系数	1.569	1.152	2.133
11	R_SOL_K.sol	土壤饱和和水力传导度	0.502	0.277	0.669
12	R_SOL_BD.sol	土壤湿容重	-0.736	-0.809	-0.229
13	V_GW_DELAY.gw	地下水滞后系数	448.636	363.263	489.742
14	V_REVAPMN.gw	潜水极限蒸发深度	5.571	2.624	5.992
15	V_GW_REVAP.gw	地下水再蒸发系数	0.234	0.139	0.237
16	V_CH_N2.rte	河道曼宁系数	0.056	0.009	0.154

表 2 SWAT 模型在南渡江流域上游地区的模拟评价结果

指数指标	1977—1987 年 (校准期)	2006—2013 年 (验证期)	性能评价
$R^2$	0.74	0.87	好/非常好
NSE	0.57	0.74	满意/好
PBIAS/%	-22.06	-24.33	满意/满意

3.2.2 径流变化的气候驱动 1961—2020 年,研究区年平均气温在 22~25℃ 区间波动上升,升温率为 0.23℃/10 a,无明显突变;年降水变化率为 32.03

mm/10 a,年降水高于平均值的有 34 a,低于平均值的有 26 a,亦无明显突变(图 5—7)。相关性分析表明,研究区年平均径流量与年降水量在  $p<0.01$  的水平下呈显著正相关( $R^2=0.820^{**}$ ),与年平均气温相关性不显著。说明降水是南渡江上游流域径流变化的关键气候驱动因子。多元线性回归模型表明(表 3),降水变化的影响远高于气温升高对径流变化的影响。

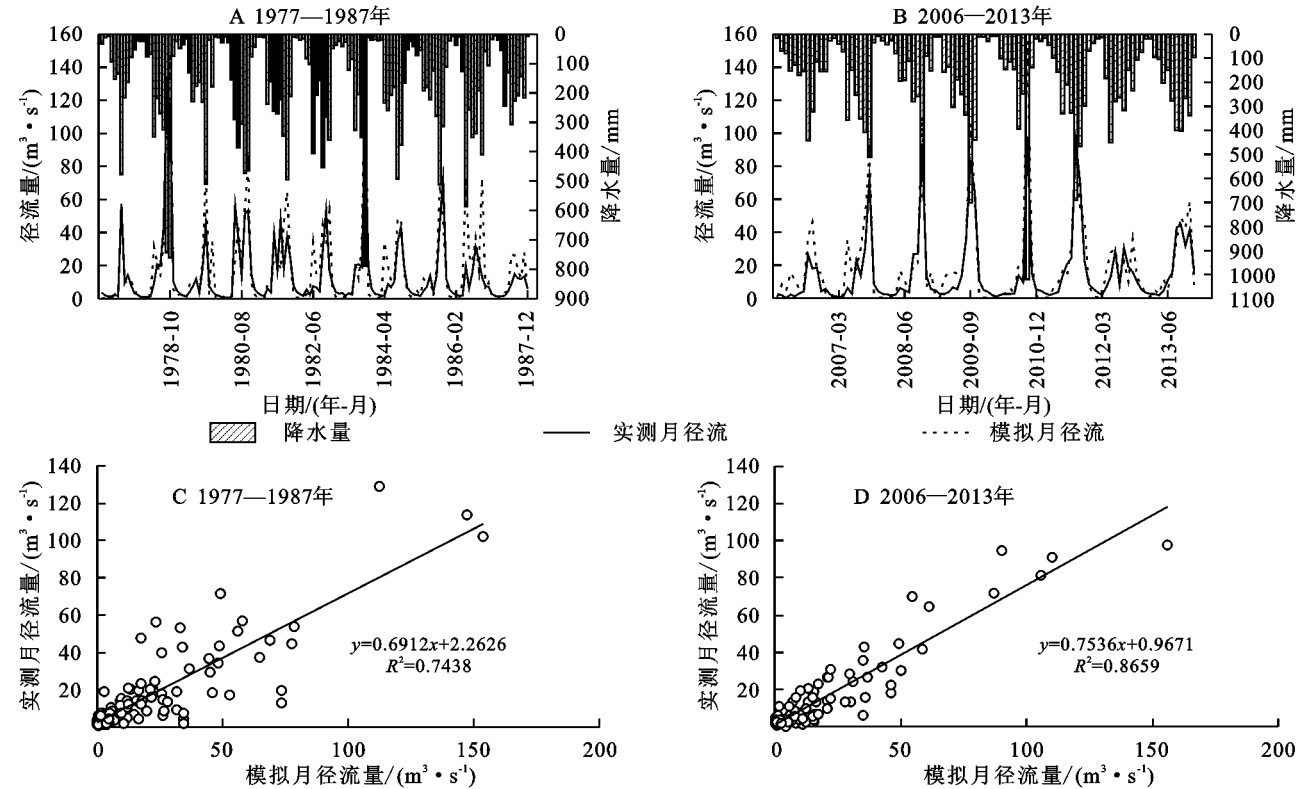


图 3 南渡江上游流域率定期与验证期月径流模拟值与实测值对比

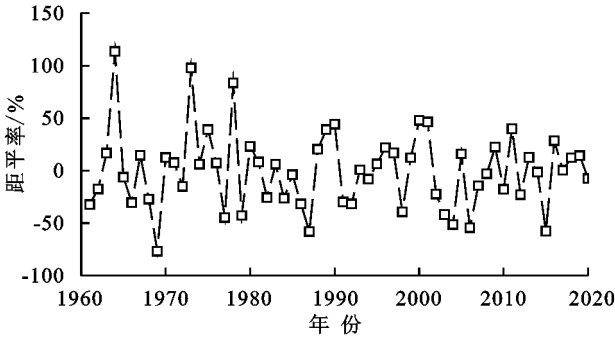


图 4 南渡江上游流域年平均径流距平百分率

就季节特征看(图 8—9),60 a 间研究区雨季的年平均径流、年降水和年平均气温明显高于旱季。其

中,雨季表现为平均气温升高 5.64%,降水增加 4.60%,但平均径流量下降 9.94%;旱季表现为平均气温升高 10.04%,降水增加 12.90%,平均径流量亦增加 4.60%。旱季降水增加趋势低于雨季,但雨季在高温基础上的升温会加快径流的蒸发,虽然雨季降水有所增加但气温升高引起的蒸发加剧造成雨季径流减少<sup>[29-30]</sup>;而且雨季径流减少量远高于旱季径流的增加量,导致年平均径流减少 7.88%,暗示雨季径流减少是造成年径流减少的主要原因。综上所述,径流变化的气候驱动因子主要是降水,其次是气温。

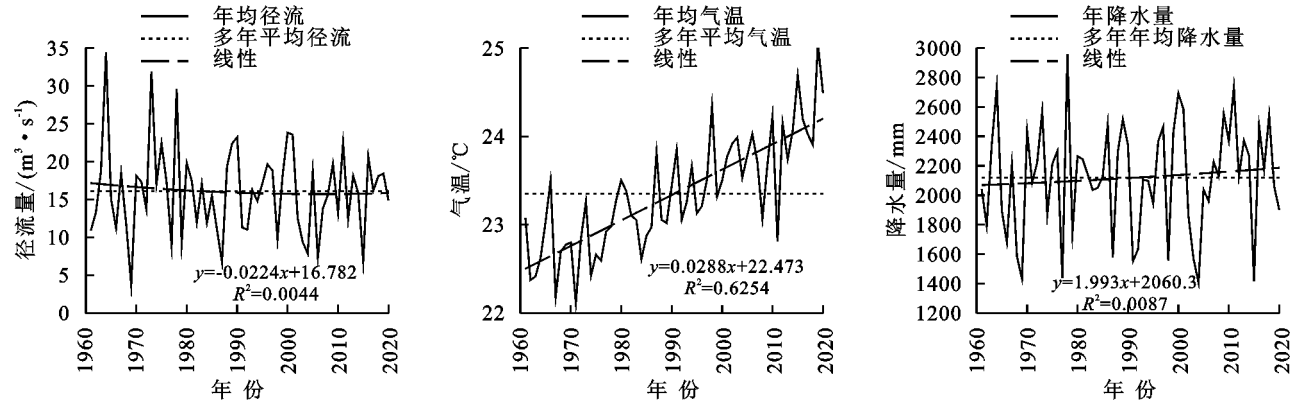


图 5 南渡江上游流域年平均径流、气温和年降水变化趋势

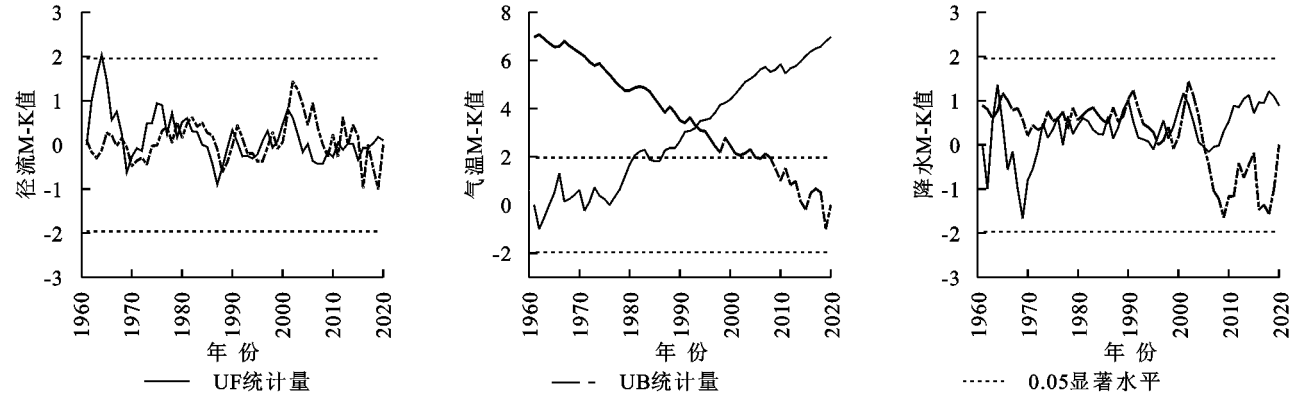


图 6 南渡江上游流域年平均径流、气温和年降水的 Mann-Kendall 突变检验

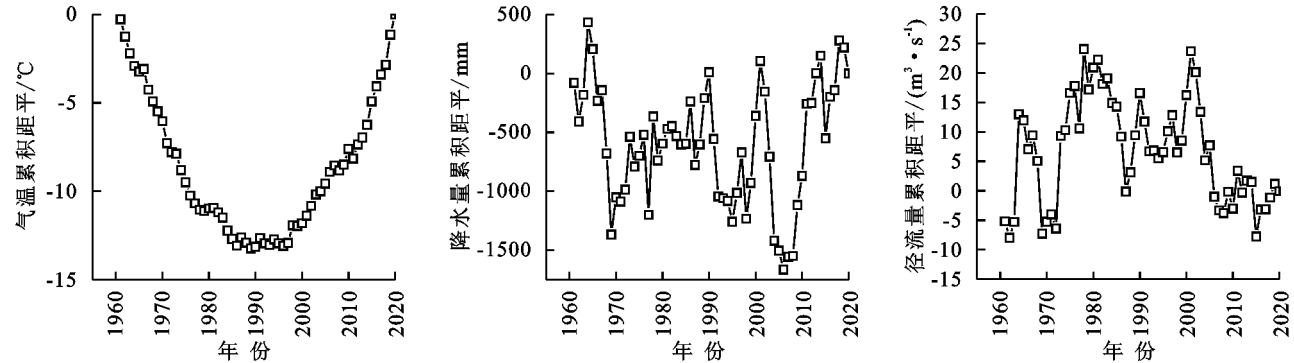


图 7 南渡江上游流域年平均径流、气温和年降水的累积距平值

表 3 南渡江上游流域径流与降水和气温的多元线性回归方程

因变量(y)	常量	年降水( $x_1$ )	年平均气温( $x_2$ )	多元线性回归方程	$R^2$
年平均径流量	0.138	0.649	-0.081	$y=0.138+0.649x_1-0.081x_2$	0.68

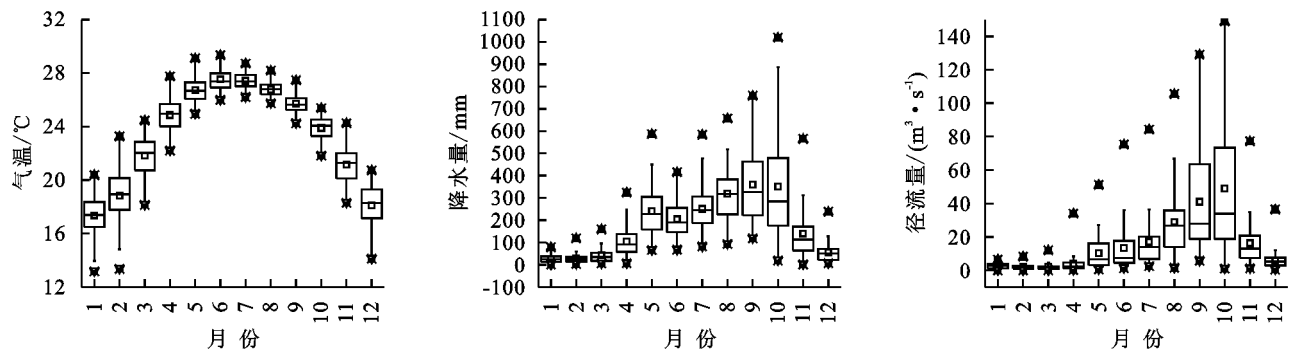


图8 南渡江上游流域径流、降水和气温年内分布

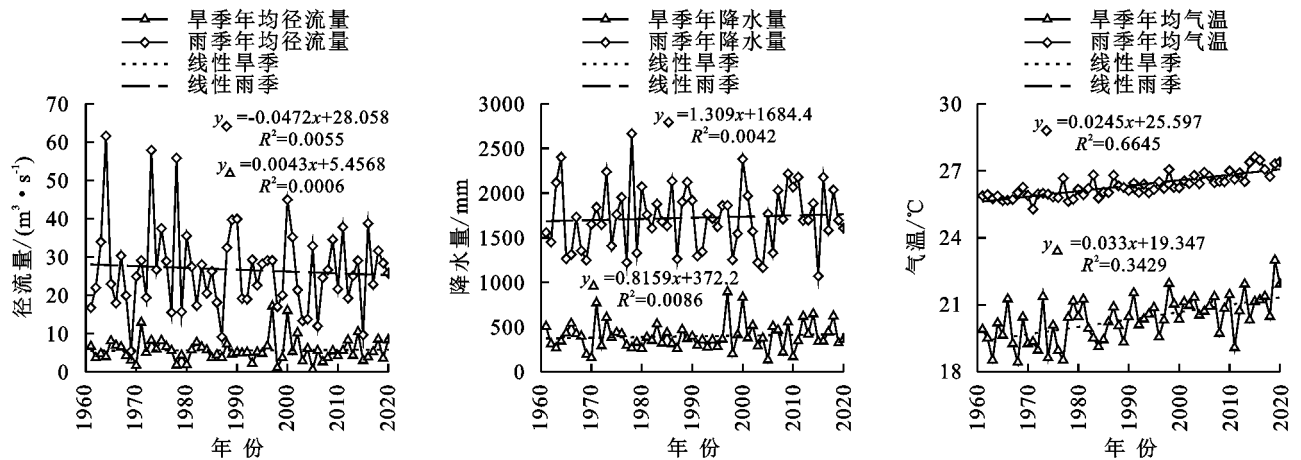


图9 南渡江上游流域雨季和旱季径流、降水与气温年际变化趋势

### 3.3 南渡江上游流域径流对未来气候变化情景的响应

3.3.1 CMIP6 气候模式下的径流模拟 根据2021—2100年的未来气候情景,获得21世纪近期、中期和远期等时期的南渡江上游流域径流响应结果(图10)。在降水和气温的综合影响下,7种路径下21世纪近期和中期年平均径流变化值范围分别为 $-0.97 \sim 0.86$ ,  $-1.37 \sim 0.97 \text{ m}^3/\text{s}$ ;远期年平均径流变化值在SSP119, SSP460, SSP370路径下小于近期,而在其他路径下因降水变化加剧,年平均径流量出现明显变化幅度。其中,SSP585, SSP434路径下21世纪远期年平均径流量分别增加 $2.65, 1.95 \text{ m}^3/\text{s}$ , SSP245, SSP126路径下年平均径流分别减少 $2.99, 2.86 \text{ m}^3/\text{s}$ 。未来21种气候情景中,最高、最低年平均径流变化幅度均出现在远期(2081—2100年),分别是在SSP585路径下径流增加 $14.71\%$ 和在SSP245路径下径流减少 $16.65\%$ 。综上,降水因子主导了南渡江上游流域未来时期的径流量变化,到21世纪后期气候变化幅度明显会导致径流变化幅度加大。

3.3.2 单一气候因子的径流模拟 如图11所示,保持降水不变,气温呈梯度变化,径流量变化值范围为 $-0.03 \sim 0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ ,年平均径流模拟值较基准期的变化率为 $-0.19\% \sim 1.01\%$ ;气温变化越大,径流量变化幅度亦愈大。保持气温不变,随着降水梯度从低

到高增加,径流量随之增加,变化值范围为 $-2.71 \sim 2.77 \text{ m}^3/\text{s}$ ,年平均径流模拟值相较于基准期变化 $-16.25\% \sim 16.66\%$ ,反映出径流量主要随降水量的增加而增加,径流变化对降水远比对气温敏感。

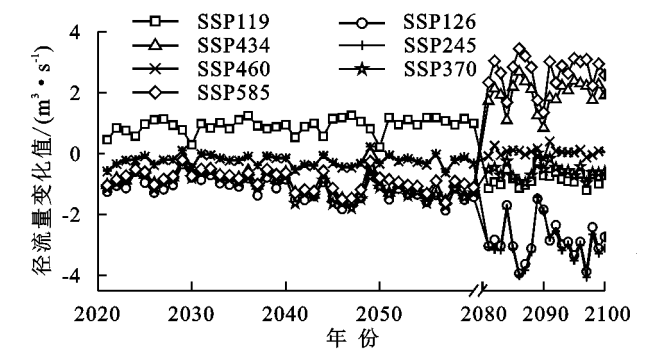


图10 耦合CMIP6气候模式多种路径下21世纪南渡江上游流域年平均径流变化

3.3.3 不同气候组合情景下的径流模拟 从32种不同梯度气温和降水变化组合情景下的径流响应来看(图12),最低气温与最高降水组合( $\Delta T = -4^\circ\text{C}$ ,  $\Delta p = +10\%$ )情景下的年平均径流量增加最多达 $2.96 \text{ m}^3/\text{s}$ ,较基准期增加 $17.79\%$ ;当气温和降水变化情景为 $\Delta T = +1^\circ\text{C}$ ,  $\Delta p = -10\%$ 的组合情景下年平均径流量减少最多达 $-2.73 \text{ m}^3/\text{s}$ ,较基准期减少 $16.38\%$ 。这反映出降水变化是研究流域径流变化的主要控制因子,且降水量与径流量变化显著正相关。



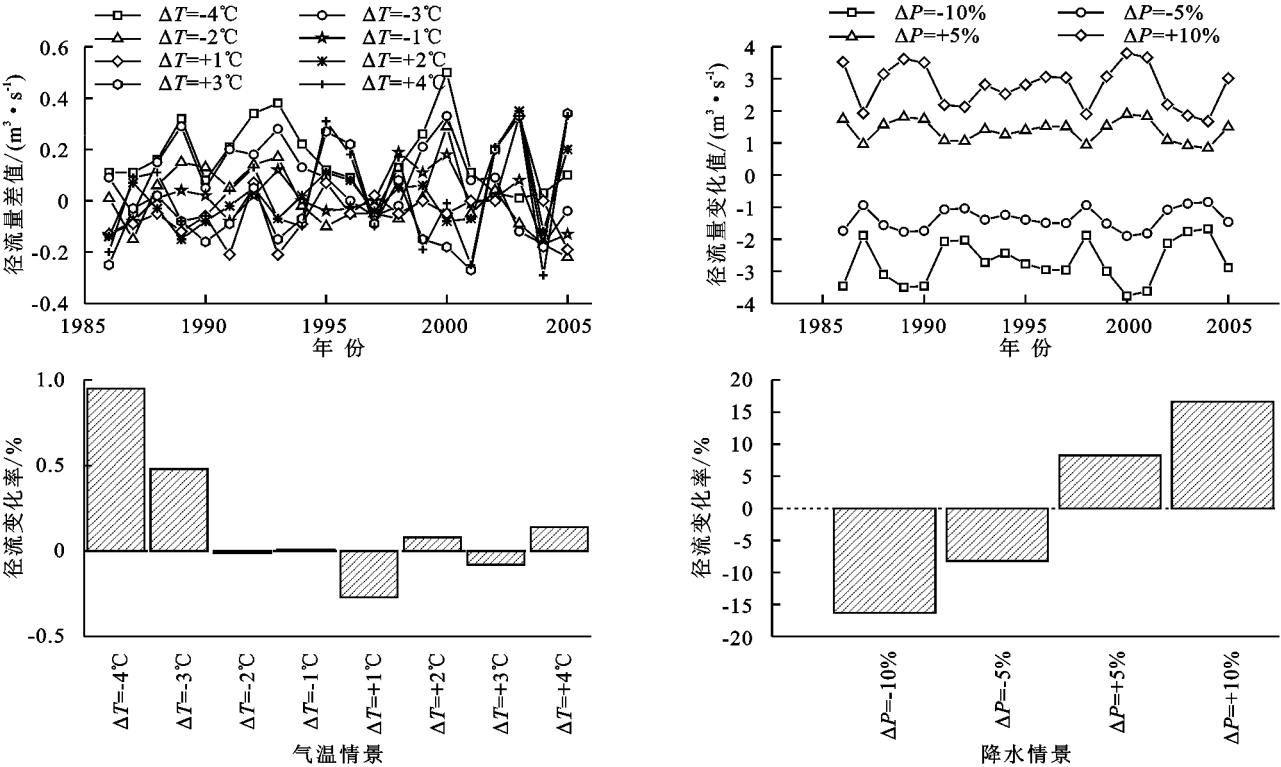


图 11 气温或降水单一因子影响下的年平均径流模拟变化值及变化率

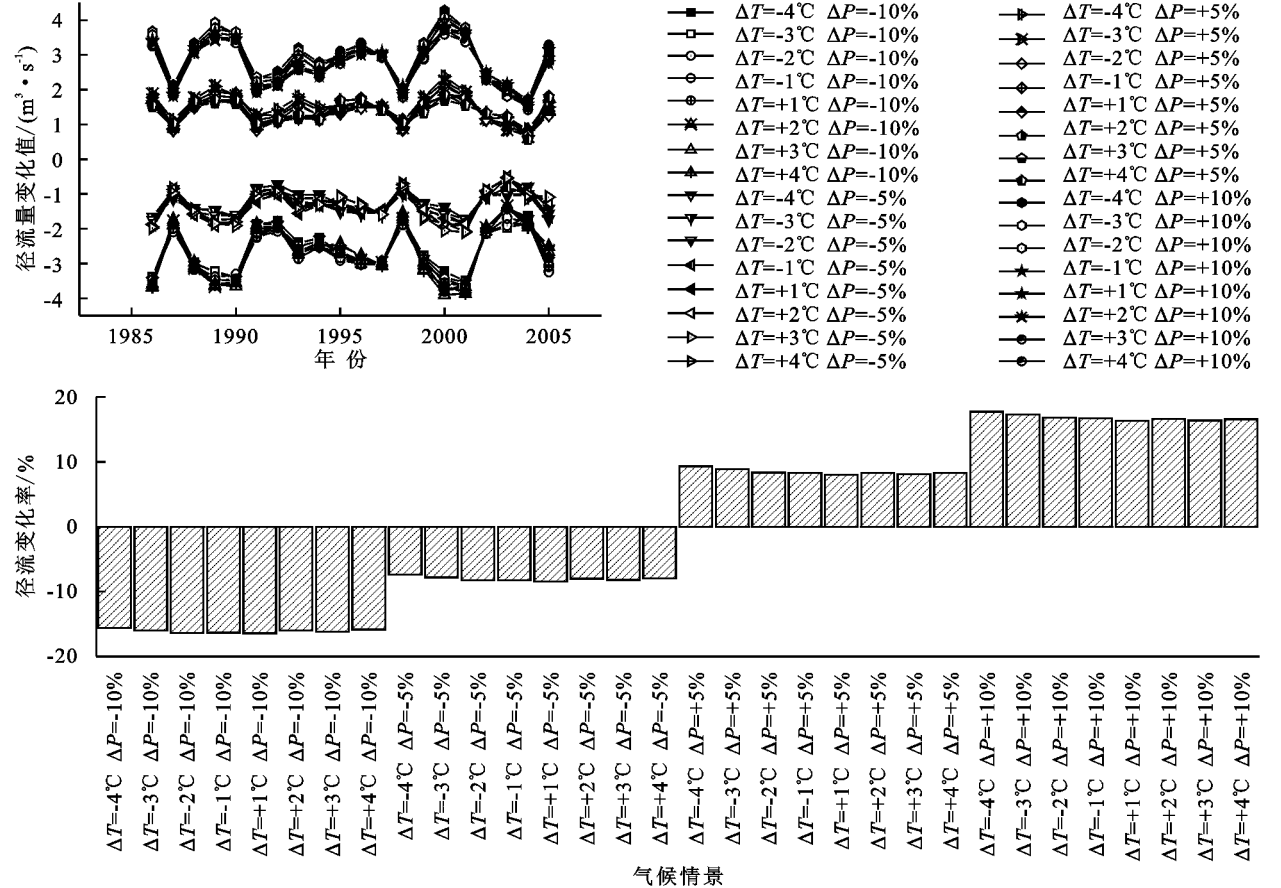


图 12 32 个气候变化情景下的年平均径流模拟变化值与变化率

4 讨论

气候变化是影响流域水文水资源的主要因素之

一,特别是降水和气温的水热组合变化对径流的影响深远<sup>[31]</sup>。通过设置不同气温和降水组合情景,定量评估气候变化对未来径流的影响,发现研究区气温与



径流量负相关,与降水显著正相关,且径流对降水变化的敏感性远高于气温变化,这与前人研究结果一致<sup>[32-34]</sup>。气温是通过影响蒸散发间接使径流量发生改变,研究区雨季径流因降水微弱增加、气温明显升高而出现减少现象,这证实了径流与气温的负相关关系;但降水则会直接影响径流量变化,因此年尺度上降水是气候变化中改变径流的最主要驱动因子。气候变化对径流的影响呈现出干湿季的差异,并且流域尺度大小、不同时期基础环境的改变会使得相同的气候变化情景获得不同的水文响应结果。气温与降水变化下的径流响应并非相似情景的简单叠加,而是一个复杂的水文过程与响应机制,同时还会受到其他因素如土地利用变化的综合作用<sup>[35]</sup>。土地利用变化是仅次于气候变化影响流域径流的重要因素,不同土地利用类型对产流的调节作用是未来的重点研究。本研究结果可为未来气候变化下森林流域的水资源管理和环境保护提供理论依据,但是径流对未来气候变化的响应因流域位置及环境因子差异会有不同表现,仍需进一步分析与探讨。

## 5 结论

(1) SWAT 模型在海南岛南渡江上游流域的径流模拟适应性良好。率定期的  $R^2$ , PBIAS 和 NSE 分别为 0.74, -22.06% 和 0.57, 验证期  $R^2$ , PBIAS 和 NSE 分别为 0.87, -24.33% 和 0.74。

(2) 1961—2020 年,南渡江上游流域多年平均径流量为  $16.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , 10 a 变化率为  $-0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ 。旱季和雨季径流量分别占年径流量的 17%, 83%。雨季的径流、降水和气温明显高于旱季。径流在雨季的减少高于旱季的增加,暗示雨季径流减少造成了年径流的减少。

(3) 降水是南渡江上游流域径流变化的关键气候驱动因子,降水变化主导未来时期研究区的径流量变化。耦合 SWAT 模型和 CMIP6 气候模式,发现 21 世纪后期因气候变化加强会导致径流变化幅度加大。

(4) 单一气候因子模拟中,气温变化越大,径流量变化值越大;径流量主要随降水量的增加而增加,径流对降水远远比气温敏感。不同气候情景下,年平均径流在  $\Delta T = -4^\circ\text{C}$ ,  $\Delta p = +10\%$  组合下较基准期增加最多达 17.79%;在  $\Delta T = +1^\circ\text{C}$ ,  $\Delta p = -10\%$  组合下较基准期减少最多达 16.38%。降水变化是径流变化的主要控制因子,且降水变化与径流变化显著正相关。

### 参考文献:

- [1] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [2] 刘酌希, 陈鑫, 管晓祥, 等. 变化环境下洮河流域径流变化归因[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 87-92.
- [3] Tian J, Zhang Z, Ahmed Z, et al. Projections of precipitation over China based on CMIP6 models[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35(4): 1-18.
- [4] 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.
- [5] 唐雄朋, 刘艳丽, 张建云, 等. 气候变化下雅鲁藏布江拉孜以上流域径流过程模拟与预测[J]. 水文, 2018, 38(6): 24-30.
- [6] 王迪, 刘梅冰, 陈兴伟, 等. 基于 CMIP5 和 SWAT 的山美水库流域未来蓝绿水时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(3): 446-458.
- [7] 刘启宁, 辛卓航, 韩建旭, 等. 变化环境下东北半干旱地区径流演变规律分析: 以洮儿河流域为例[J]. 水力发电学报, 2020, 39(5): 51-63.
- [8] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 等. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4760-4773.
- [9] 李龙兵. 海南岛水资源可利用量估算[J]. 水利信息化, 2019(6): 38-44.
- [10] 李瑞娴, 李龙兵, 李海朋, 等. 南渡江入海径流量变化及其影响因素[J]. 水力发电, 2015, 41(8): 13-16.
- [11] 吴际伟, 纪义彤, 朱丽蓉, 等. 南渡江龙塘站水位流量关系变化及成因分析[J]. 人民珠江, 2018, 39(7): 37-42.
- [12] 陈斌, 高飞, 印萍, 等. 南渡江河口洪、枯季节水文泥沙变化特征及台风“海鸥”对入海水沙的影响[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(6): 1279-1291.
- [13] 杨志宏, 贾建军, 王欣凯, 等. 近 50 年海南三大河入海水沙通量特征及变化[J]. 海洋通报, 2013, 32(1): 92-99.
- [14] 邢李桃. 重要水源地松涛水库流域管理问题的探讨[J]. 水文, 2009, 29(S1): 22-23.
- [15] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519-525.
- [16] 陈晓璐, 林建海. 变化环境下南渡江干流径流特征分析及变化趋势研究[J]. 人民珠江, 2019, 40(10): 14-20.
- [17] 李丽, 冉中阳, 徐文, 等. 南渡江河湖水系连通系统仿真与定量评价研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(10): 44-50.
- [18] 薛鑫, 王瑞峰, 叶长青. 南渡江流域枯水流量概率特征及成因与影响研究[J]. 水力发电, 2020, 46(5): 16-21.
- [19] Sun R, Wu Z X, Chen B Q, et al. Effects of land-use change on eco-environmental quality in Hainan Island, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 109. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105777.
- [20] 李立. 渭河流域咸阳: 西安段非点源污染模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [21] 奚建梅. 基于 SWAT 模型的黄河源区河流泥沙变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2020.
- [22] Teshager A D, Gassman P W, Secchi S, et al. Modeling agricultural watersheds with the soil and water assessment tool (SWAT): Calibration and validation

- with a novel procedure for spatially explicit HRUs[J]. *Environ Manage.* 2016, 57(4):894-911.
- [23] 王赛男. 基于 SWAT 模型的气候变化与土地利用/覆被变化对岩溶断陷盆地水资源量的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [24] Lü Y R, Jiang T, Wang Y J, et al. Simulation and projection of climate change using CMIP6 Multi-models in the Belt and Road Region[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2020, 12(6):389-403.
- [25] 梁淑琪, 王文圣, 黄伟军. 1937—2018 年岷江上游径流演变特征分析[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2020, 50(5):761-770.
- [26] 于海超, 张杨, 马金珠, 等. 1969—2018 年黄河实测径流与天然径流的变化[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(5):7-13.
- [27] 商滢, 江竹. 黄河源区降水径流变化特征及响应分析[J]. *中国农村水利水电*, 2021(2):106-112.
- [28] 万育生, 王栋, 黄朝君. 丹江口水库来水情势分析与径流预测[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2021, 19(3):417-426.
- [29] 尚华明, 范煜婷, 张瑞波, 等. 帕米尔高原东部径流量变化及其对气候变化的响应[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(3):352-360.
- [30] 赵美亮, 曹广超, 曹生奎, 等. 1956—2016 年大通河温度和降水及其与径流变化的关系[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3):111-117, 125.
- [31] Yachongtuo B, 梁婕, 曾光明, 等. 基于 SWAT 模型的浏阳河流域径流对土地利用和气候变化的协同响应[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(2):88-94.
- [32] 刘卫林, 黄一鹏, 万一帆, 等. 盱江流域径流模拟及其对气候变化的响应[J]. *水电能源科学*, 2020, 3(8):18-21.
- [33] 姜华超, 刘瑞芬. 东洋河流域土地利用及气候变化对径流的影响[J]. *人民长江*, 2020, 51(7):82-88.
- [34] 王胜, 许红梅, 刘绿柳, 等. 全球增温 1.5℃ 和 2.0℃ 对淮河中上游径流影响预估[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(11):1966-1978.
- [35] Zhang H, Wang B, Liu L D, et al. Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585:124822. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.124822.

(上接第 248 页)

- [18] 王丽霞, 余东洋, 刘招, 等. 渭河流域 NDVI 与气候因子时空变化及相关性研究[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2):249-254.
- [19] 刘少华, 严登华, 史晓亮, 等. 中国植被 NDVI 与气候因子的年际变化及相关性研究[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(3):480-489.
- [20] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012, 67(9):1255-1268.
- [21] 韩雅, 朱文博, 李双成. 基于 GWR 模型的中国 NDVI 与气候因子的相关分析[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(6):1125-1133.

(上接第 254 页)

- [7] 刘丹, 巩前文, 杨文杰. 改革开放 40 年来中国耕地保护政策演变及优化路径[J]. *中国农村经济*, 2018(12):37-51.
- [8] 牛海鹏, 张安录. 耕地保护的外部性及其测算: 以河南省焦作市为例[J]. *资源科学*, 2009, 31(8):1400-1408.
- [9] 冉清红, 岳云华, 杨玲, 等. 西部农户耕地保护生态外部性价值分析与启示[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(2):348-352.
- [10] 王坤鹏, 牛海鹏. 基于 CVM 不同支付方式的耕地保护外部性测度及其差异性分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(5):128-136.
- [11] 吴璟, 咎梦莹, 王征兵. 感知价值对农户参与耕地质量保护意愿的影响: 以陕西省为例[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(6):66-74.
- [12] 臧俊梅, 郑捷航, 农股璇, 等. 耕地保护及其必要性: 不同兼业程度农户的认知与意愿: 基于珠三角的调查与实证[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(2):82-90.
- [13] 宋敏, 金贵. 规划管制背景下差别化耕地保护生态补偿研究: 回顾与展望[J]. *农业经济问题*, 2019(12):77-85.
- [14] 龙远, 李萍, 唐月亮, 等. 耕地保护情景下长浏平丘陵区土地利用变化模拟: FLUS 模型的应用[J]. *江西农业学报*, 2020, 32(5):126-134.
- [15] 罗双晓, 何政伟, 高笋, 等. 基于 CA\_Markov 模型的天府新区土地时空变化预测[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(3):157-163.
- [16] 王旭, 马博文, 李丹, 等. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1):230-242.
- [17] 陈兵飞, 廖铁军, 张莉坤. 生态红线约束下万州区土地利用情景模拟及生态价值评估[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5):349-357, 364.
- [18] 张明阳, 罗为检, 刘会玉, 等. 基于林业清查资料的桂西北植被碳空间分布及其变化特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(16):5067-5077.
- [19] 聂鑫, 章文波, 薛丽霞. 广西速生桉种植的空间分布及生态特征[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(2):215-221.