

# 气候变化对长江源区地表径流的影响

祁雪姣<sup>1</sup>, 杨颖<sup>1</sup>, 韩传楠<sup>1</sup>, 李健明<sup>1</sup>, 李佳君<sup>1</sup>, 刘增辉<sup>1</sup>, 李梦媛<sup>2</sup>, 张秀芝<sup>2</sup>,  
包文金<sup>2</sup>, 卢素锦<sup>1</sup>, 何奕<sup>1</sup>, 李悦娇<sup>1</sup>, 陈斯亮<sup>1</sup>, 曾宣涓<sup>1</sup>

(1. 青海大学生态环境工程学院, 青海 西宁 810016)

(2. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016)

**[摘要]** 研究气候变化对长江源区地表径流的影响, 为长江源区水资源开发与保护提供依据。基于 1980—2021 年地表径流数据, 运用线性回归法对地表径流年际、年内变化趋势进行分析, 运用 CMIP5 模型中的 21 种模式的模拟结果, 结合 RCP<sub>s</sub> 的三种气候情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)并耦合 SWAT 模型下, 预测未来(2022—2100 年)长江源区地表径流的变化趋势。结果表明: 1980—2021 年地表径流年际变化较大, 在 2009 年年际径流最大, 总体呈现上升趋势; 3—7 月地表径流量上升, 7—12 月径流量逐渐下降, 12—3 月径流量平稳。除 1980—1982 年、1983—1985 年降水量与径流量相关性不显著外, 其余年份均呈显著状态( $P < 0.05$ )。用建立好的 SWAT 模型在长江源区进行模拟, 率定期的决定系数为 0.81, 模拟径流量与实测径流量误差为 6.44%, 验证期的决定系数为 0.86, 误差为 4.60%, 模拟数值符合度较高, SWAT 模型在长江源区较为适用。三种气候情景下, 地表径流的年际变化较大, 总体呈现下降趋势; RCP2.6 情景下, 2048 年径流量最大; RCP4.5 情景下, 2035 年径流量最大; RCP8.5 情景下, 2036 年径流量最大。三种气候情景下, 地表径流年内变化较大, 且年内分配不均匀, 3—8 月径流量上升, 8—12 月径流量下降, 12—3 月保持平稳; RCP4.5 中径流变化最大, RCP8.5 中径流变化最小。未来气候情景下, 长江源区径流量将下降, 加强水资源保护迫在眉睫。

**[关键词]** 长江源区, 气候变化, 地表径流, CMIP5, RCP<sub>s</sub>, SWAT 模型

**[中图分类号]** P467; P333.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2022)04-0081-10

## Effect of Climate Change on Surface Runoff in the Source Area of the Yangtze River

Qi Xuejiao<sup>1</sup>, Yang Ying<sup>1</sup>, Han Chuannan<sup>1</sup>, Li Jianming<sup>1</sup>, Li Jiajun<sup>1</sup>, Liu Zenghui<sup>1</sup>, Li Mengyuan<sup>2</sup>,  
Zhang Xiuzhi<sup>2</sup>, Bao Wenjin<sup>2</sup>, Lu Sujin<sup>1</sup>, He Yi<sup>1</sup>, Li Yuejiao<sup>1</sup>, Chen Siliang<sup>1</sup>, Zeng Xuanqian<sup>1</sup>

(1. College of Ecological and Environmental Engineering, Qinghai University, Xi'ning 810016, China)

(2. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xi'ning 810016, China)

**Abstract:** The impact of climate change on surface runoff in the source area of the Yangtze River is studied to provide a basis for water resources development and protection in the source area of the Yangtze River. Based on the surface runoff data from 1980 to 2021, the linear regression method is used to analyze the inter- and intra-annual trends of surface runoff, and the simulation results of 21 models in the CMIP5 model are used to predict the future(2022–2100) trends of surface runoff in the Yangtze source area River under three climate scenarios(RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) of RCP<sub>s</sub> and coupled with the SWAT model. The results show that the interannual variation of surface runoff from 1980 to 2021 is large, and the interannual runoff is the largest in 2009, with an overall increasing trend, the surface runoff increases from March to July, decreases gradually from July to December, and is stable from December to March. The correlation between precipitation and runoff was significant( $P < 0.05$ ) in all years except for 1980–1982 and 1983–1985, correlation was not significant. The established SWAT model was used to simulate in the source area of the Yangtze River. The coefficient of determination for the rate period was 0.81, the error between the simulated runoff and the measured runoff was 6.44%, and the coefficient of determination for the verification period was 0.86 and the error was 4.60% higher, the SWAT model is more applicable in the source area of the Yangtze River. Under the three climate scenarios, the interannual variability of surface runoff is large, and the overall trend is decreasing, the maximum runoff is in 2048 under RCP2.6, 2035 under RCP4.5, and 2036

收稿日期: 2022-04-12.

基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目(31760147)、青海省科技厅项目(2021-ZJ-926).

通讯作者: 卢素锦, 教授, 研究方向: 修复生态学研究. E-mail: lusujin88@163.com

under RCP8.5. Under the three climate scenarios, surface runoff varies greatly within the year and is unevenly distributed within the year, with runoff increasing from March to August, decreasing from August to December, and remaining stable from December to March; runoff varies the most in RCP4.5 and the least in RCP8.5. Under the future climate scenario, the runoff in the source area of the Yangtze River will decrease, and it is urgent to strengthen water conservation.

**Key words:** the source area of the Yangtze River, climate change, surface runoff, CMIP5, RCP<sub>s</sub>, SWAT model

气候变化引起了全球关注,成为了全球研究的核心问题<sup>[1-2]</sup>,气候变化对生态系统的影响成为了气候变化领域中最重要内容之一<sup>[3]</sup>. 气候变化直接影响水资源的变化,水资源会在空间上重新分配以及在各地容量上发生变化,进而引起生态环境的各种变化<sup>[4-7]</sup>. 气候的变暖对我国的水资源产生了很大的影响,主要表现在北方径流量减少,南方径流量增加,各流域的年平均蒸发量的增加等,导致干旱、洪涝等灾害频发<sup>[7-8]</sup>,使得水循环发生变化,水资源供需矛盾进一步加剧<sup>[9-10]</sup>.

气候模式和水文模型是现今国内外用于研究变化环境下水文水资源响应的主要手段<sup>[11]</sup>. 在 IPCC 第五次评估报告(AR5)<sup>[12]</sup>中,采用耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)的气候模式和新的排放情景(典型浓度路径 RCP, RCP 包括 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三种排放情景)<sup>[13]</sup>来预估未来气候系统的变化,取得了较好效果. SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是一个长时间尺度的分布式水文模型<sup>[14]</sup>,目前已得到广泛应用<sup>[15]</sup>. 国外应用 SWAT 模型进行径流模拟、分布式水文-土壤-植被模型(DHSVM)开发等方面的研究<sup>[16-20]</sup>; SWAT 模型在中国的应用与研究从 2000 年左右开始,先后开展了环北地区、锡林河、长江上游流域等的模拟研究,并在后续的研究中对 SWAT 模型的应用进行了不断的改进<sup>[21-24]</sup>. 相关研究显示, SWAT 水文模型在河流流量、水文过程、水文响应、水质预测等方面应用中都取得了较好的效果<sup>[20-22]</sup>.

长江源区地处青藏高原,是三江源国家公园的重要组成部分,是我国生态环境安全以及经济可持续发展的重要生态屏障<sup>[25]</sup>,长江源区的生态环境质量好坏和供水能力大小,对长江流域将产生重大的影响. 由于气候变暖,长江源区近些年较大的蒸发量,造成径流量减少<sup>[26]</sup>. 目前长江源区对地表径流的研究主要集中在冰川融水、冻土以及径流演变规律等方面<sup>[27]</sup>,而有关 CMIP5 气候模型三种气候情景下对地表径流的影响研究未见报道. 研究气候变化对长江源区地表径流的影响,对提升长江源区水源涵养功能,对长江源区水资源开发与保护、生态环境保护与恢复具有重要意义.

本文通过分析长江源区 1980—2021 年地表径流的演变规律,运用 CMIP5 模型中的 21 种模式的模拟结果,结合 RCP<sub>s</sub> 的三种气候情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)并耦合 SWAT 模型,预测未来地表径流变化的演变趋势,为长江源区水资源保护和利用提供理论依据,为长江源区科学应对气候变化提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

长江源区在青海省南部,地处青藏高原腹地,地理位置约为 90°30′~97°10′E, 32°30′~35°50′N, 占我国三江源地区总面积的 43.6%<sup>[28]</sup>. 长江源区平均海拔高于 4 000 m<sup>[29]</sup>,具有冬季长、夏季短的特点,年平均气温为-5.3℃~3.3℃<sup>[30]</sup>. 长江源区是由扇状水系所组成的,水系发达,河网密布,高原湖泊众多<sup>[31]</sup>. 源区内植被类型主要由草甸、草原等组成<sup>[32]</sup>.

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 数据收集与测定

整理长江源区 1980—2021 的气象监测数据,数据类型主要为年平均降水量、年平均气温以及年地表径流平均变化量,数据来源于中国气象数据网(<https://lishi.tianqi.com>)和青海省气候中心;1980—2021 年地表径流量数据来自青海省水利厅.

#### 1.2.2 SWAT 模型的原理及构建方法

SWAT 模型可以将流域划分为不同的子流域,并进行多种不同的水循环物理过程. 本研究运用了 SWAT 模型中气候和水文 2 个组件<sup>[33]</sup>.

##### (1) 气候组件

水量平衡由流域气候控制. SWAT 模型需要输入的气候因素实测数据包括降雨量、相对湿度、气温、风

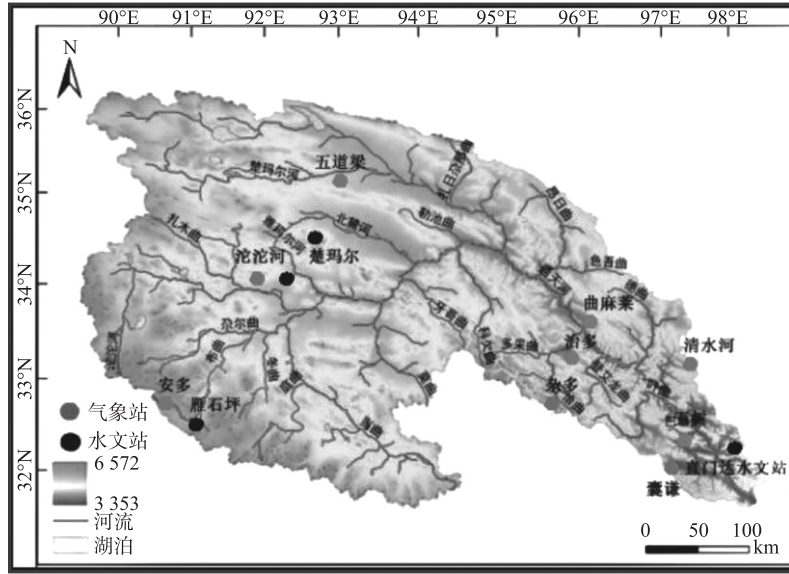


图1 长江源区地理位置图

Fig. 1 Geographical map of the source area of the Yangtze River

速和太阳辐射等<sup>[34]</sup>.

## (2) 水文组件

SWAT 模型的水量平衡模块可以模拟气候以及土壤对径流量的影响,计算公式为<sup>[35]</sup>:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t R_{day} - Q_{surf} - E - W_{seep} - Q_{gw}. \quad (1)$$

式中,  $SW_t$  表示土壤含水最终值 (mm),  $SW_0$  表示土壤含水初始值 (mm),  $t$  表示时间,  $R_{day}$ 、 $Q_{surf}$ 、 $E$ 、 $W_{seep}$  和  $Q_{gw}$  表示第  $i$  天的降水量 (mm)、径流量 (mm)、蒸散发量 (mm)、土壤剖面底层的渗漏量和旁侧流量 (mm)、地下水回归量 (mm).

SWAT 模型可以模拟每个 HRU 的径流量,通常使用 SCS 曲线数法计算. 本方法引入了曲线系数,其值与土壤湿度、土地利用有关,代表该日径流曲线值.

SCS 计算公式为<sup>[35]</sup>:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{R_{day} - I_a + S}. \quad (2)$$

式中,  $Q_{surf}$  表示河流径流量 (mm),  $R_{day}$  表示日降水量 (mm),  $I_a$  表示初始损耗 (mmQ),  $S$  表示流域瞬时积水量 (mm).

SWAT 模型的构建过程为通过高程数据进行分带设置并分析水文数据,生成河网图,划分出子流域后进行相关参数的计算. 在子流域的基础上生成多个水文响应单元,根据生成的各项数据计算出流域总径流量.

### 1.2.3 SWAT 模型验证和率定方法

选取 SWAT 模型的敏感性参数,并利用参数验证 SWAT 模型,检验模型是否能反映本研究区域的情况.

在本研究中,选取相对误差  $R_e$  以及拟合度  $R^2$  对模型进行评估. 若  $R_e$  越接近 0,模型模拟结果与实测值相差越小.  $R^2$  为模拟值与实测值的拟合度,数值越接近 1,则模拟值与实测值越接近<sup>[34]</sup>.

$$R_e = \frac{Q_s - Q_m}{Q_s} \times 100\%, \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)(Q_{si} - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2 + \sum_{i=1}^n (Q_{si} - \bar{Q}_s)^2}}. \quad (4)$$

式中,  $R_e$  是相对误差值,  $Q_s$  是实测值,  $Q_m$  是模拟值,  $Q_{oi}$  代表实际测量值,  $\bar{Q}_{oi}$  代表平均的实际测量值,  $Q_{si}$  代表模拟值,  $\bar{Q}_{si}$  代表平均的模拟值.

SWAT 模型使用 LH-OAT 分析方法进行参数敏感分析和自动参数率定, 该方法结合了拉丁方(LH)抽样法与单因子(OAT)敏感度分析, 同时具备 LH 抽样的健壮性和 OAT 算法的准确性<sup>[36]</sup>.

SWAT-CUP 是 Abbaspour 等开发的一款程序, 该程序可以对 SWAT 模型进行参数敏感性分析及率定<sup>[37]</sup>. 作为参数选取的最有效方法, SUFI2 不仅对模型结构、数据输入和参数不确定性进行了考虑, 还将参数率定范围以模拟值与实测值的形式反映出来. SUFI2 以  $t$ -Stat 和  $P$ -Value 表示参数的敏感性.  $t$ -Stat 为参数的敏感性,  $P$ -Value 为敏感性的显著性<sup>[38]</sup>.

1.2.4 三种气候情景下地表径流预测方法

将 CMIP5 全球气候模型与 SWAT 水文模型耦合. 采用 IPCC 发布的 3 种 RCPs (RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5) 温室气体排放情景, 并结合 IPCC 数据中心发布的 CMIP5 全球气候模型 2022—2100 年的统计降尺度气候资料, 用获得的未来气象数据驱动已率定和验证好的长江源区 SWAT 水文模型, 模拟地表径流在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情境下对 CMIP5 全球气候变化的响应, 得到未来不同气候情境下长江源区地表径流变化数据.

1.3 分析方法

本研究采用线性回归法<sup>[39]</sup>对径流量的年际、年内变化进行分析. 公式为:

$$y = ax + b. \tag{5}$$

式中,  $a$  代表回归系数,  $b$  代表常数,  $R^2$  代表相关系数, 可说明  $y$  与  $x$  的相关性显著程度. 本研究取显著性水平  $\alpha = 0.05$ ,  $n = 80$ , 查得  $r = 0.2732$ ,  $r^2 = 0.0746$ .  $R^2 > r^2$  时说明变化趋势显著.

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行气温和降水对地表径流量影响的显著性分析; 采用 prism9 对年际、年内地表径流做出径流变化趋势图, 并分析其变化.

2 结果与分析

2.1 长江源区 1980—2021 年地表径流变化分析

2.1.1 1980—2021 年地表径流年际变化分析

1980—2021 年长江源区地表径流年际变化如图 2 所示.

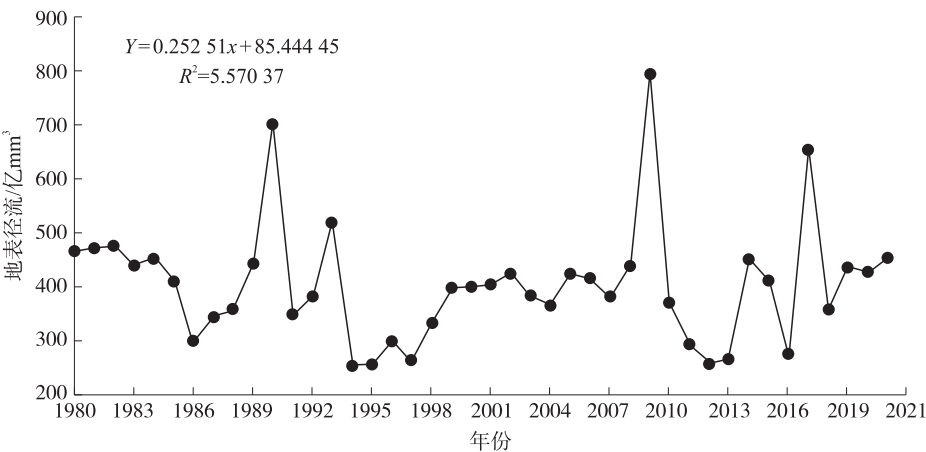


图 2 长江源区 1980—2021 年年际地表径流

Fig. 2 Interannual surface runoff from 1980 to 2021 in the source area of the Yangtze River

图 2 显示, 1980—2021 年间长江源区径流波动较大, 年际间径流增加或者减少的幅度较大, 径流分布不均匀. 2009 年地表径流量达到最大, 1994 年地表径流量达到最小, 径流总体上呈缓慢上升的趋势, 上升趋势不显著 ( $P < 0.05$ ).

2.1.2 1980—2021 年地表径流年内变化分析

1980—2021 年长江源区地表径流年内变化曲线如图 3 所示。

图 3 显示,地表径流 1—7 月份地表径流量逐渐上升,7—12 月份逐渐下降,1980—2021 年内地表径流量的大小不均匀,由图中趋势线得出,1980—2021 年内径流呈现逐渐上升趋势,上升趋势显著( $P<0.05$ )。

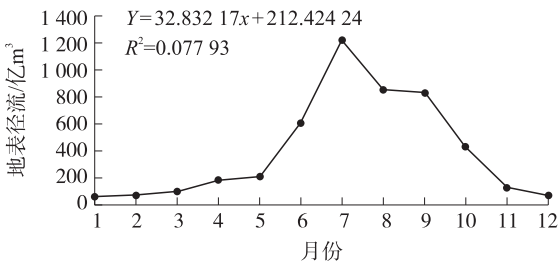


图 3 长江源区 1980—2021 年年内地表径流  
Fig. 3 Annual surface runoff in the source area of the Yangtze River from 1980 to 2021

2.1.3 气候变化对 1980—2021 年地表径流的影响

长江源区 1980—2021 年地表径流与年平均气温变化趋势显著性分析结果见表 1。

表 1 长江源区地表径流与年平均气温变化趋势显著性分析(1980—2021 年)  
Table 1 Significance analysis of surface runoff and annual mean temperature trends in the source area of the Yangtze River(1980—2021)

年份	地表径流量/亿 m <sup>3</sup>	年平均气温/℃	P 值	P<0.05	显著性
1980—1982	513.05	-1.311 3	0.031	是	显著
1983—1985	413.33	-1.752 2			
1986—1988	356.67	-1.345 2			
1989—1991	480.23	-1.126 8	0.042	是	显著
1992—1994	353.33	-1.195 8			
1995—1997	263.34	-1.264 5			
1998—2000	405.52	-0.688 4	0.008	是	显著
2001—2003	406.67	-0.437 4			
2004—2006	461.67	0.031 5			
2007—2009	553.51	0.053 3	0.050	是	显著
2010—2012	341.67	0.917 2			
2013—2015	390.41	0.024 2			
2016—2018	450.21	1.009 0	0.042	是	显著
2019—2020	455.34	1.021 3			
1980—2020	428.05	-0.433 2			

注:P<0.05 表示存在显著关系。

表 1 显示,长江源区的地表径流量与年平均气温间的变化趋势具有显著性差异( $P<0.05$ ),其中 1989—1994 年、1995—2000 年和 2013—2018 年径流与气温间是极显著的( $P<0.01$ )。

长江源区 1980—2021 年地表径流与年平均降水量变化趋势显著性分析结果见表 2。

表 2 长江源区地表径流与年平均降水量变化趋势显著性分析(1980—2021 年)  
Table 2 Analysis of the significance of change trends in surface runoff and annual average precipitation in the source area of the Yangtze River(1980—2021)

年份	地表径流量/亿 m <sup>3</sup>	年平均降水量/mm	P 值	P<0.05	显著性
1980—1982	513.05	461.45	0.082	否	不显著
1983—1985	413.33	433.27			
1986—1988	356.67	424.21			
1989—1991	480.23	451.55	0.043	是	显著
1992—1994	353.33	401.74			
1995—1997	263.34	418.28			
1998—2000	405.52	448.98	0.040	是	显著
2001—2003	406.67	464.48			
2004—2006	461.67	449.02			
2007—2009	553.51	495.01	0.036	是	显著
2010—2012	341.67	471.78			
2013—2015	390.41	429.81			
2016—2018	450.21	402.73	0.035	是	显著
2019—2021	455.34	451.53			
1980—2021	428.05	448.64			

注:P<0.05 表示存在显著关系。



表 2 显示,长江源区的地表径流量与年平均降水量间的变化趋势具有差异性显著 ( $P<0.05$ ), 其中 1981—1985 年降水量不具有显著性 ( $P>0.05$ ).

2.2 SWAT 模型的验证和率定

在经过处理的长江源区 DEM 图中提取河网图,选取直门达水文站作为长江源区的流域总出口,在模型中输入直门达水文站的经纬度坐标,然后划分出长江源区子流域. 计算出流域的总体参数,通过土地利用/土壤类型划分 HRU 图. 本研究将长江源区划分为 31 个子流域,202 个 HUR.

采用的 LH-OAT 法(拉丁超立方方法)进行参数敏感性分析<sup>[40-41]</sup>. 在 SWAT 模型中输入选择出 8 个敏感性高的参数( ALPHA-BF(基流衰减系数)、GWQMN(浅层含水层蓄水量阈值)、ESCO(土壤蒸发补偿因子)、SOL-K(土层饱和水传导度)、REVAPMN(浅层地下水再蒸发系数)、CH-K<sub>2</sub>(主河道河床有效水力传导度)、SOL-AWC(土壤层有效水容量)、CN<sub>2</sub>(SCS 径流曲线数)),将模拟值与实测值进行对比. 然后将选出的参数用 SWAT 模型进行率定,首先将参数输入模型,确定率定值范围,并不断缩小范围直到确定最终值,最终率定值在率定范围内,证明参数在该模型中适用.

本模型中,1980—2016 年为率定期,2017—2021 年为验证期. 通过模型模拟所得数据与实际测量数据之间存在一定的偏差. 在春汛期,即每年 3—5 月中,气温上升导致冰川融雪,使径流量骤增;在夏季,即每年 6—9 月中,长江源区降水量增加,模型模拟所得数据和实际径流量值接近,但也存在短期内降雨量过大导致洪水,导致模拟所得数值比实测数据偏低;在冬季,即每年 10 月至次年 2 月径流量伴随着气温的降低而逐渐减小,模拟所得数据接近实测数据.

如表 3 所示,率定期相对误差为 6.44%,决定系数为 0.81,表明在率定期内的实测值与模拟值拟合较好,SWAT 模型对长江源区径流量的模拟符合实际;验证期相对误差为 4.60%,决定系数为 0.86,表明 SWAT 模型适用于长江源区.

表 3 长江源区模拟评价结果

Table 3 Simulation and evaluation results of the Yangtze River source region

	径流量平均值		Re	R2
	实测值	模拟值		
率定期	458.3	428.8	6.44	0.81
验证期	439.8	419.6	4.60	0.86

2.3 未来气候情景下长江源区地表径流的变化分析

2.3.1 未来气候情景下地表径流的年际变化分析

三种气候情景下,长江源区地表径流年际变化的模拟结果,见图 4. 由图 4 可知,三种气候情景下径流的变化均为下降趋势,下降幅度最大的是 RCP8.5,最小的是 RCP2.6. 在 RCP2.6 情景下,地表径流在 2048

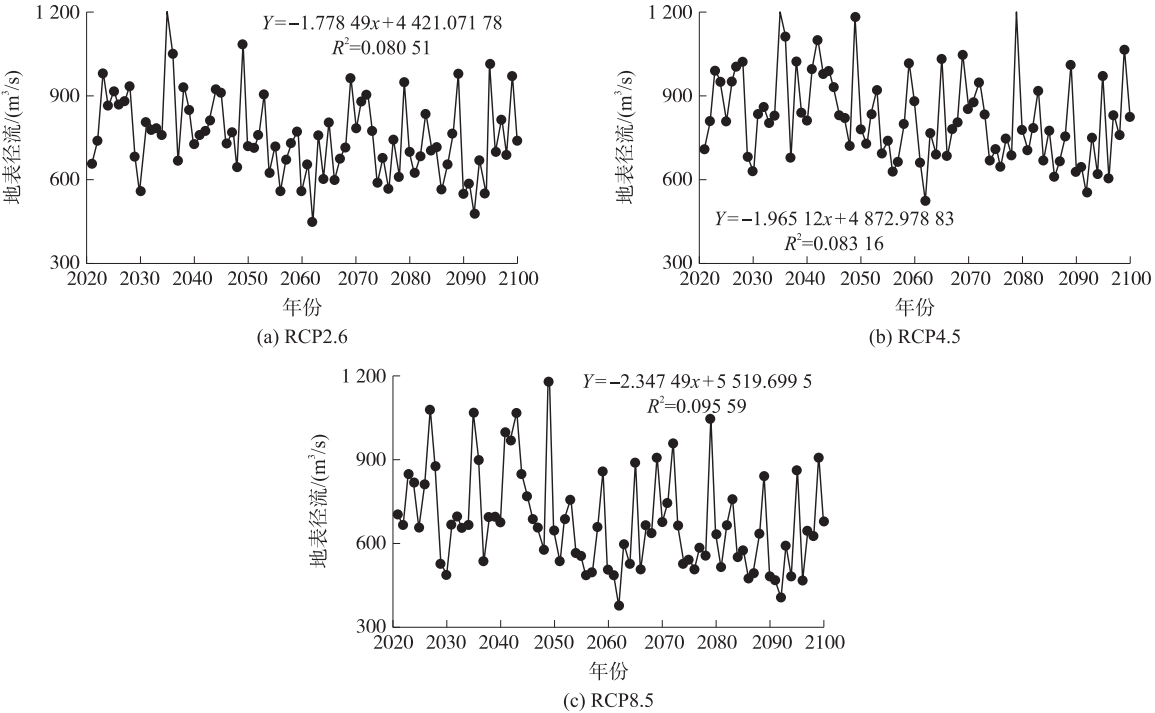


图 4 三种气候情景下长江源区地表径流年际变化

Fig. 4 Interannual variability of surface runoff in the source area of the Yangtze River under three climate scenarios

年达到最大;RCP4.5 情景下,地表径流在 2035 年达到最大;RCP8.5 情景下,地表径流在 2036 年最大. 三种气候情景下,地表径流年际间变化较大,总体呈缓慢下降趋势.

### 2.3.2 未来气候情景下地表径流的年内变化分析

三种气候情景下,长江源区地表径流的年内变化情况如图 5-7 所示.

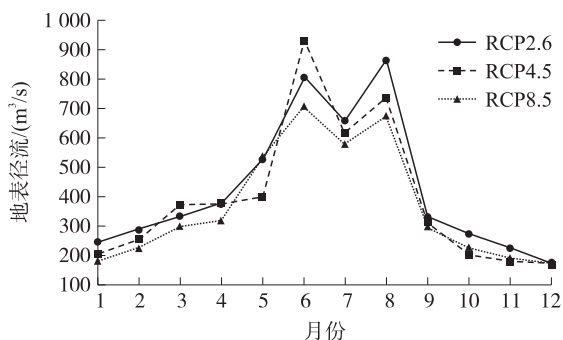


图 5 三种气候情景下长江源区地表径流年内变化

Fig. 5 Intra-annual variation of surface runoff in the source area of the Yangtze River under three climate scenarios

由图 5、图 6、图 7 可知,三种模式下地表径流的年内分配存在一定的波动性. 不同模式下每月的地表径流量存在一定差别,RCP4.5 模式下各月地表径流量增减幅度最大,RCP8.5 模式下各月地表径流量增减幅度最小. 三种模式的地表径流年内分配都不均匀,1—3 月径流量逐渐增大,呈积累状态,最大地表径流量出现在 6 月和 8 月,9—12 月地表径流量减少,最小地表径流量出现在 1 月、2 月、11 月和 12 月,总体上地表径流为下降趋势. 21 世纪末期与 21 世纪中期相比减少幅度变大,21 世纪中期 6—12 月份地表径流约占全年径流量 65%,而 21 世纪末期 6—12 月地表径流量占全年地表径流量的比例降低到 60%.

三种气候情景下,年内地表径流变化较大. RCP4.5 中径流变化幅度最大,RCP8.5 中径流变化幅度最小. 2040s 下,年内地表径流变化较大,不稳定因素较多. 1—6 月径流逐渐上升,在 6 月地表径流量最大,7 月下降,8—9 月逐渐上升,之后逐渐下降,在 12 月下降至最小. 2080s 下,1—7 月径流逐渐上升,8 月地表径流量达到最大,之后逐渐下降,至 12 月下降至最小.

## 3 讨论

本研究中,1980—2021 年地表径流年际主要受气温和降水量变化,变化差异显著,年际间不稳定,在 7 月达到最大值,在 1、2 和 12 月达到最小值,与孙永寿、罗玉、朱延龙、王菊英等人的研究结果一致<sup>[42-45]</sup>. 长江源区年际径流增加,主要是受到降水、气温、冰川融水、西太平洋副热带高压以及水面的蒸发量等作用造成<sup>[43]</sup>,源区径流主要是以降水量与融雪为主,地表径流量受到气温与降水量影响较大<sup>[44]</sup>.

本研究利用 1961 年以来的数据建立了长江源区 SWAT 数据模型,率定期的决定系数为 0.81,模拟地表径流量与实测地表径流量误差为 6.44%,验证期的决定系数为 0.86,误差为 4.60%,得到的模拟结果与实际测量结果误差较低,相对更为精准,也说明使用长时间尺度范围的数据可以提高模型的精确度. 在率定期和验证期内,模拟数值符合度较高,该模型在长江源区较为适用. 气候模型与 SWAT 水文模型的耦合研究还有待于进一步深入.

本研究中,未来三种气候情景下,地表径流年际变化呈下降趋势,径流变化随气温和降水量变化而变化,且在 2034 年和 2048 年达到最大值,不确定性较大,与程志刚等<sup>[46]</sup>的研究结果一致,但与俞烜研究结

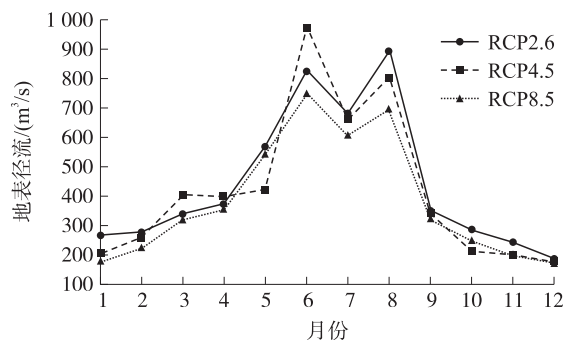


图 6 三种气候情景下长江源区 2040s 地表径流年内变化

Fig. 6 Intra-annual variation of surface runoff in the source area of the Yangtze River for 2040s under three climate scenarios

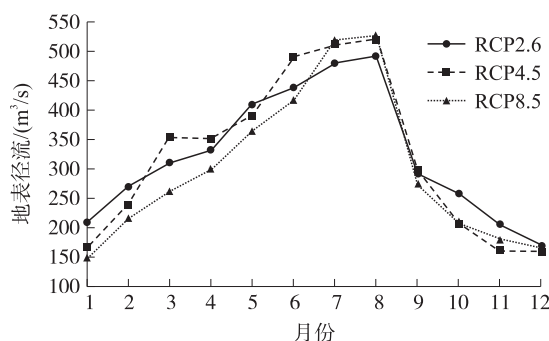


图 7 三种气候情景下长江源区 2080s 地表径流年内变化

Fig. 7 Intra-annual variation of surface runoff in the source area of the Yangtze River in the 2080s under three climate scenarios

果不同,俞烜等<sup>[47]</sup>分析长江源区2030—2060年未来地表径流量变化趋势时显示,2031—2060年,源区径流出现增加趋势.分析俞烜得出的2031—2060年长江源区径流出现增加的原因,主要是因为作者预测在2031—2060年源区降雨量将会增加,气温也会升高,导致冰川融水对地表径流的补给,从而导致地表径流量增加.目前的相关研究,均采用多模式集合对长江地区未来气温或降水模拟评估,但模式集合普遍为4~14个,且均在单个或两个未来排放情景下进行分析比较<sup>[48-49]</sup>.

2019年推出的CMIP6主要用于历史试验的评估,能够模拟出极端降水的时空变化特征<sup>[50]</sup>.CMIP6能较好地重现出极端降水在不同区域的显著性差异<sup>[51]</sup>,CMIP6的多模式集合相较于CMIP5的多模式集合对气候和年际变率等方面的模拟能力都有了较大的改进<sup>[52]</sup>.王予等<sup>[53]</sup>分别用CMIP6和CMIP5对极端降水的模拟能力进行比较发现,CMIP6能够明显反映出空间分布中的湿润、半湿润区,但是对于旱、半干旱区改进不明显,因此其相关模式的物理过程、动力学框架等还需进一步深入研究.本研究的区域为长江源区,长江源区具有海拔高、寒冷、干旱等特点,且CMIP5在中国应用成熟,所以本文选用了CMIP5.本研究运用CMIP5模型中21种模式的模拟结果,结合RCP<sub>s</sub>的三种气候情景并耦合SWAT模型,预测未来长江源区地表径流的变化,取得了较好效果.CMIP5模型中的21种模式,是将21个CMIP5全球气候模式的模拟结果,经过插值计算将其统一降尺度到同一分辨率下,利用简单平均方法进行多模式集合,制作成一套包括1901—2005年Historical和2006—2100年RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5排放情景下的月平均资料供使用,相比CMIP5中其他模式,这21个模式数据资料更完整,克服了单一模式和模式较少的缺陷,预测的结果更加准确可靠,为气候变化下长江源区地表径流的保护提供了科学依据.

## 4 结论

本文基于1980—2021年降水量、平均气温、径流量等内容,运用CMIP5模型中21种模式的模拟结果,并耦合SWAT模型,对1980—2021年长江源区地表径流进行验证和率定,并预测2022—2100年长江源区地表径流变化趋势,得出了以下结论:(1)1980—2021年地表径流年际变化较大,总体呈上升趋势,但上升幅度不大;(2)1980—2021年间,气温与地表径流变化趋势呈显著相关( $P<0.01$ );降水量与地表径流变化趋势呈显著相关( $P<0.05$ );(3)用建立的SWAT模型在长江源区进行模拟,率定期的决定系数为0.81,验证期的决定系数为0.86,模拟数值符合度较高,SWAT模型在长江源区较为适用;(4)未来气候情景下,2022—2100年地表径流量年际间变化较大,年际地表径流量均为下降的趋势,下降幅度最大的是RCP8.5,最小的是RCP2.6;(5)未来情景下,2022—2100年地表径流年内变化不均匀;(6)未来情景下,2022—2100年地表径流呈缓慢下降趋势,加强水资源管理与保护迫在眉睫.

## [参考文献]

- [1] 张建云,王国庆,刘九夫,等.国内外关于气候变化对水的影响的研究进展[J].人民长江,2009,40(8):39-41.
- [2] 魏瑞江,王鑫.气候适宜度国内外研究进展及展望[J].地球科学进展,2019,34(6):584-595.
- [3] 鄢继尧,赵媛.近三十年我国生态脆弱区研究热点与展望[J].南京师大学报(自然科学版),2020,43(4):74-85.
- [4] ZHANG Y, XU X, LIAO Z, et al. Response of surface runoff to land use and land cover change and its impact on Daihai Lake shrinkage in Inner Mongolia, China[J]. Theoretical and applied climatology, 2021, 144(8):1-15.
- [5] 简季,潘佩芬,胡运海.国内外气候变化对水文影响的研究进展[C]//第二届“测绘科学前沿技术论坛”论文精选.长春,吉林:测绘出版社,2010.
- [6] NIGEL W. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios[J]. Global environmental change, 2004, 14(1):31-52.
- [7] 张强,张存杰,白虎志,等.西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响——总体暖干化,局部出现暖湿迹象[J].干旱气象,2010,28(1):1-7.
- [8] QIN Y H, SUN X, LI B F, et al. A nonlinear hybrid model to assess the impacts of climate variability and human activities on runoff at different time scales[J]. Stochastic environmental research and risk assessment, 2021, 35(9):1917-1929.
- [9] 陈桂亚,DEREK C.气候变化对嘉陵江流域水资源量的影响分析[J].水资源研究,2006,27(1):25-30.
- [10] 范广洲,吕世华,程国栋.气候变化对滦河流域水资源影响的水文模式模拟(II)模拟结果分析[J].高原气象,2001,



- 20(3):302-310.
- [11] 秦大河. 中国气候与环境演变[J]. 文明,2005(12):10-11.
- [12] 周莉,兰明才. 21 世纪前期长江中下游极端降水预估及不确定性分析[J]. 气象学报,2018,76(1):47-61.
- [13] 韩乐琼,韩哲,李双林. 不同代表性浓度路径(RCPs)下 21 世纪长江中下游强降水预估[J]. 大气科学学报,2014,37(5):529-540.
- [14] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望[J]. 地理科学进展,2002(2):111-120.
- [15] 王英斌. 全球湿地消失速度加剧[J]. 世界文化,2019(2):61.
- [16] MENZEL L,BÜRGER G. Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment(Southern Elbe,Germany)[J]. Elsevier B.V.,2002,267(1):53-64.
- [17] CAMERA C,BRUGGEMAN A,ZITTIS G,et al. Simulation of extreme rainfall and streamflow events in small Mediterranean watersheds with a one-way-coupled atmospheric-hydrologic modelling system[J]. Natural hazards and earth system sciences, 2020,20(10):2791-2810.
- [18] KIBII J K,KIPKORIR E C,KOSGEI J R. Application of Soil and Water Assessment Tool(SWAT)to evaluate the impact of land use and climate variability on the Kaptagat Catchment River discharge[J]. Sustainability,2021,13(4):1802-1802.
- [19] PANDEY V P,BHAUBANJAR S,BHARATI,et al. Hydrological response of Chamelia watershed in Mahakali Basin to climate change[J]. Science of the total environment,2018,650(1):365-383.
- [20] 谭丽丽,黄峰,乔学瑾,等. TRMM 在海河流域南系的降水估算精度评价及其对 SWAT 模型的适用性[J]. 农业工程学报,2020,36(6):11.
- [21] 王国庆,金君良,鲍振鑫,等. 气候变化对华北粮食主产区水资源的影响及适应对策[J]. 中国生态农业学报,2014,22(8):898-903.
- [22] 占车生,宁理科,邹靖,等. 陆面水文—气候耦合模拟研究进展[J]. 地理学报,2018,73(5):893-905.
- [23] 宋小园. 气候变化和人类活动影响下锡林河流域水文过程响应研究[D]. 内蒙古:内蒙古农业大学,2016.
- [24] 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.
- [25] 朱海涛. 长江源区长序列径流变化规律及其与气象要素的关系分析[J]. 中国农学通报,2019,35(22):123-129.
- [26] 孙永寿,段水强. 近年来青海三江源区河川径流变化特征及趋势分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):52-57.
- [27] 李林,戴升,申红艳,等. 长江源区地表水资源对气候变化的响应及趋势预测[J]. 地理学报,2012,67(7):941-950.
- [28] 陈进. 长江源区水循环机理探讨[J]. 长江科学院院报,2013,30(4):1-5.
- [29] 陈进,黄薇. 水资源与长江的生态环境[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [30] 梁川,侯小波,潘妮. 长江源高寒区域降水和径流时空变化规律分析[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(1):53-59.
- [31] 范晓梅. 长江源区植被覆盖变化对高寒草甸蒸散的影响及作物系数的确定[D]. 兰州:兰州大学,2011.
- [32] 刘光生. 长江源多年冻土区沼泽及高寒草甸水热过程及其对气候变化的响应[D]. 兰州:兰州大学,2009.
- [33] 李峰,胡铁松,黄华金. SWAT 模型的原理、结构及其应用研究[J]. 中国农村水利水电,2008(3):24-28.
- [34] 刘梅. 我国东部地区气候变化模拟预测与典型流域水文水质响应研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [35] 何旭强. 基于 SWAT 模型的黑河上游径流量模拟及其对气候变化的影响[D]. 兰州:西北师范大学,2013.
- [36] 李慧,靳晟,雷晓云,等. SWAT 模型参数敏感性分析与自动率定的重要性研究—以玛纳斯河径流模拟为例[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(1):79-82.
- [37] ABBASPOUR K C,VEJDANI M,HAGHIGHAT S. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT[J]. Modsi international congress on modelling & simulation land water&environmental management integrated system for sustainability, 2007,364(3):1603-1609.
- [38] 万浩,董晓华,彭涛,等. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的黄柏河东支流域径流模拟研究[J]. 中国农村水利水电,2018(12):94-100.
- [39] 任泉,蔡新婷,马文惠. 新疆达坂城地区 52a 来气温和降水变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(10):116-121.
- [40] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 水文模型参数敏感性分析方法评述[J]. 水利水电科技进展,2015,35(6):105-112.
- [41] 徐会军,陈洋波,李昼阳,等. 基于 LH-OAT 分布式水文模型参数敏感性分析[J]. 人民长江,2012,43(7):19-23.
- [42] 孙永寿,段水强,李燕,等. 近年来青海三江源区河川径流变化特征及趋势分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):52-57.
- [43] 罗玉,秦宁生,周斌,等. 1961—2016 年长江源区径流量变化规律[J]. 水土保持研究,2019,26(5):123-128.

- [44] 朱延龙,陈进,陈广才. 长江源区近 32 年径流变化及影响因素分析[J]. 长江科学院院报,2011,28(6):1-4.
- [45] 王菊英,丘玉俐. 长江源年径流量变化趋势分析[J]. 水利水电快报,2008,29(S1):62-64.
- [46] 程志刚,刘晓东,范广洲,等. 21 世纪长江黄河源区径流量变化情势分析[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(11):1333-1339.
- [47] 俞烜,申宿慧,杨舒媛,等. 长江源区径流演变特征及其预测[J]. 水电能源科学,2008(3):14-16.
- [48] 李硕. GIS 和遥感辅助下流域模拟的空间离散化与参数化研究与应用[D]. 南京:南京师范大学,2002.
- [49] 张永勇,张士锋,翟晓燕,等. 三江源区径流演变及其对气候变化的响应[J]. 地理学报,2012,67(1):71-82.
- [50] VERONIKA E,SANDRINE B,MEEHL G A,et al. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6(CMIP6) experimental design and organization[J]. Geoscientific model development,2016,9(5):1937-1958.
- [51] 陈活泼,孙建奇,林文青,等. CMIP6 和 CMIP5 模式对极端气候的模拟比较[J]. Science bulletin,2020,(17):1415-1418.
- [52] ZHU H H,JIANG Z H,LI J,et al. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China? [J]. Advances in atmospheric sciences,2020,37(10):1119-1132.
- [53] 王予,李惠心,王会军,等. CMIP6 全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与 CMIP5 的比较[J]. 气象学报,2021,79(3):369-386.

[ 责任编辑:黄 敏 ]