

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.035.

汪飞, 洪林, 马田遥, 等. 基于 SWAT 模型的气候变化条件下诺敏河流域径流变化研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 67-77.

Wang Fei, Hong Lin, Ma Tianyao, et al. Study on Runoff Change of Nuomin River Basin Under Climate Change Conditions Based on SWAT Model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 67-77.

## 基于 SWAT 模型的气候变化条件下 诺敏河流域径流变化研究

汪飞<sup>1,2</sup>, 洪林<sup>1</sup>, 马田遥<sup>3</sup>, 吐尼亚孜<sup>1</sup>, 熊继东<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072; 2. 余姚市水利局,  
浙江 宁波 315400; 3. 宁波兴晟新能源科技有限公司, 浙江 宁波 315400)

**摘要:** [目的] 了解气候变化条件下诺敏河流域径流变化特征, 为诺敏河流域水文水资源综合规划提供科学支撑。[方法] 通过 SDSM 统计降尺度模型和大气环流模式, 生成未来不同情景模式下的气温和降水数据, 运用 SWAT 模型模拟计算得到了不同气候情景模式下的径流数据。[结果] 从趋势上看: 3 种情景模式下径流都保持增长趋势, RCP2.6 模式下增幅最少, RCP4.5 模式其次, RCP8.5 模式下径流量增幅最大。从突变上看: RCP2.6 模式下, 径流在未来依旧不会存在突变点; RCP4.5 模式下, 径流在未来存在很大可能形成突变; 而在 RCP8.5 模式下, 年径流将在 2067 年附近发生突变, 突变后的径流量表现为显著的增长。从周期上看: RCP2.6 模式下, 径流变化周期主要由 56 a 的主周期控制; RCP4.5 模式下, 年径流变化周期主要由 56 a 和 44 a 的控制; RCP8.5 模式下周期特征和 RCP4.5 模式相似, 相比之下, 56 a 时间尺度下能量密度更为密集, 该周期的控制效果得到进一步增强。[结论] 不同气候情景模式下诺敏河流域径流差异较大, 未来制定水文水资源综合规划应考虑不同气候条件的影响。

**关键词:** 气候变化; SWAT 模型; 径流特征; 诺敏河流域

中图分类号: P333; P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0067-11

## Study on Runoff Change of Nuomin River Basin Under Climate Change Conditions Based on SWAT Model

Wang Fei<sup>1,2</sup>, Hong Lin<sup>1</sup>, Ma Tianyao<sup>3</sup>, Tuniyazi<sup>1</sup>, Xiong Jidong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan  
University, Wuhan 430072, China; 2. Water Conservancy Bureau of Yuyao, Ningbo, Zhejiang 315400;  
China. 3. Ningbo Xingsheng New Energy Technology Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315400, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of the study is to understand the runoff variation pattern of Nuomin River Basin under climate change and provide scientific support for the comprehensive planning of hydrology and water resources in Nuomin River Basin. [Methods] The temperature and precipitation data were generated under different scenario modes in the future through statistical downscaling model, and SWAT model was applied to simulate the corresponding runoff data under different climate scenario modes. [Results] From the perspective of trend, the runoff maintains an increasing trend, with a relatively small increase under RCP2.6 mode, followed by RCP4.5 mode, and the largest increase under RCP8.5 mode. From the perspective of mutation, there will still be no mutation point in runoff under RCP2.6 mode, and there will be a great possibility of sudden change in runoff under RCP4.5 mode, while under RCP8.5 mode, the annual runoff will suddenly change around 2067. From the perspective of cycle, under RCP2.6 mode, the runoff change cycle is

收稿日期: 2022-10-08

修回日期: 2022-11-01

资助项目: 水利部公益性行业科研专项经费“松花江流域粮食生态安全水供求若干关键技术”(201501013)

第一作者: 汪飞(1995—), 男, 江苏宜兴人, 硕士, 研究方向为气候变化对水文水资源的影响。E-mail: 1239042167@qq.com

通信作者: 洪林(1963—), 女, 安徽庐江县人, 教授, 研究方向为农田水利水环境。E-mail: lhong@whu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

mainly controlled by the main cycle of 56 years. Under RCP4.5 mode, the annual runoff change cycle is mainly controlled by 56 years and 44 years. The cycle characteristics of RCP8.5 mode are similar to those of RCP4.5 mode, but in contrast, the energy density is more intensive under the 56-year scale, and the control effect of this cycle is further enhanced. [Conclusion] There are significant differences in runoff in Nuomin River Basin under different climate scenario modes, and future comprehensive planning of hydrological and water resources should consider the impact of different climate conditions.

**Keywords:** climate change; SWAT model; runoff characteristics; Nuomin River Basin

近年来,气候变化及其影响引起了越来越多国内外专家学者的关注和研究<sup>[1-2]</sup>。IPCC第五次研究报告指出<sup>[3]</sup>,地表温度因受温室气体浓度增加而持续升高,降水量、降水强度和降水时空分布也将发生改变,从而导致水资源分布及循环发生相应变化。气候变化提升了极端水文事件的发生概率<sup>[4]</sup>,也会对区域径流的时空特性产生不同效应<sup>[5]</sup>。诺敏河流域位于我国东北部地区,近年来在以气候变化为主的环境变化因素影响下,流域内水资源趋向不足,水土资源的不协调也逐渐突出。因此,研究气候变化对诺敏河流域径流的影响,不仅能深入了解气候变化条件下径流的演变规律,也可作为流域水资源的管理提供参考依据。

耦合全球气候模式与水文模型是研究气候变化对径流影响的主要方法之一<sup>[6-7]</sup>。刘春蓁等<sup>[8]</sup>采用4种GCM情景模式研究了我国7大流域径流和蒸发的变化可能性,并得出4种模式下松花江流域径流趋于增加;郭生练等<sup>[9]</sup>选用BCC-CSM1-1气候模式及RCP4.5排放情景,预测了长江流域气温、降水以及径流的变化情况;江介伦等<sup>[10]</sup>结合GWLF水文模型分析了5种大气环流模式下未来气候对径流的影响,发现丰水期水量上升而枯水期水量减小。以上研究虽然对径流受气候变化的影响进行了一些探究,着重得到未来气候变化条件下径流量的变化范围,但并未探究径流的突变、周期等特征。本文选取诺敏河流域作为研究对象,采用SDSM统计降尺度方法,借助大气环流模式预测流域未来的气候变化,并通过分布式水文模型SWAT模型模拟在未来气候情景下径流的相应特征。

## 1 研究区概况

诺敏河流域位于大兴安岭东南山麓,在121°45′—124°35′E, 48°00′—50°30′N范围内,流域面积25 098 km<sup>2</sup>。流域平均海拔1 102 m,最高处可达1 300 m,河口高程最低约为170 m。流域春季干旱多风,夏季热而湿,秋季较短,冬季寒冷漫长,历年最高气温曾高达40.1℃,最低气温达到-35.4℃。诺敏河流域降水年内分配不

均,雨量多集中在7—8月。流域总出口水文测站为小二沟站,控制面积占流域总面积的95%以上。

## 2 研究方法

### 2.1 趋势分析

趋势特征通常使用线性回归、斯皮尔曼分析法<sup>[11]</sup>、M-K检验法等<sup>[12]</sup>。本文以线性回归为主要的研究方式,并将突变分析时使用的M-K法作为补充。

该方法主要反映自变量和因变量的线性相关关系,公式如下:

$$Y = a + bX \quad (1)$$

式中: $X$ 为自变量,此处表示年份; $Y$ 为因变量,在本文中表示研究对象,如气温、降水、径流; $a$ 、 $b$ 分别为回归系数,其值通过最小二乘法求得。

在趋势分析中,需要对研究对象和时间的相关性进行显著性检验,此处采用F检验法,统计量 $F$ 的计算公式为:

$$F = \frac{(n-2)S_R^2}{S_E^2} \quad (2)$$

式中: $S_R^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 指回归平方和; $S_E^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 指残差平方和。对于给定的显著性水平 $\alpha$ (本文选取为0.05),其显著性临界值为 $F_\alpha(1, n-2)$ 。对于计算的统计量 $F$ :如果 $F \geq F_\alpha$ ,那么回归方程所表现的相关性是显著的,即线性回归方程能够比较可信地反映序列的趋势变化;反之,则认为线性方程不显著。

### 2.2 突变分析

突变分析采用在水文、气象等长时间序列的突变识别中应用较为广泛的M-K突变检验法<sup>[13-16]</sup>。

对于样本长度为 $n$ 的长序列 $X$ ,构造的M-K检验秩序列如公式(3)~(4)所示:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i) \quad (4)$$

由于时间序列相互独立,定义新的统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

式中:  $E(S_k)$  为累计数  $S_k$  的均值;  $\text{var}(S_k)$  为  $S_k$  的方差。

其中,  $UF_1 = 0$ ,  $UF_k$  统计量服从标准正态分布。查阅特征值表来得到给定的显著性水平  $\alpha$  (本文采用  $\alpha = 0.05$ ) 所对应的临界值  $UF_\alpha$ , 如果统计量大于临界值, 则表明该序列存在着明显的增加、减少的趋势, 从而判断时间序列是否存在趋势变化特征, 作为趋势分析的补充。

$E(S_k)$ ,  $\text{var}(S_k)$  的计算公式如下:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (6)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (7)$$

按照时间序列逆序编排, 用上述的构造过程构造新的统计序列  $UB_k$ 。绘制  $UB_k$  和  $UB_k$  两条曲线图, 若  $UF_k$  和  $UB_k$  相交, 且交点处的统计值在检验的上、下置信度区间内, 可认为交点所对应的节点可能就是突变发生的时间点。

### 2.3 周期分析

周期特征通常采用 Morlet 小波分析法, Morlet 小波可以凸显长序列存在的周期特征, 同时能够定性评估序列未来的变化趋势。

其基本原理是由一组小波函数基来近似地表示所研究的特定函数, 通过小波变化计算得到小波系数, 再由小波系数的实部、模值等数值来分析时间序列中的变化特征。

(1) 小波函数。小波分析中需要构建震荡变化且最终能快速衰减到 0 的小波函数  $\Psi(t) \in L^2(R)$ , 该函数需满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (8)$$

式中:  $\Psi(t) \in L^2(R)$  为基小波函数, 该函数经由尺度伸缩及时间轴平移形成子小波函数系:

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-0.5} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (9)$$

式中:  $\Psi_{a,b}(t)$  为子小波;  $a$  为尺度因子, 且  $a \neq 0$ , 指小波周期的长度;  $b$  为平移因子, 指时间轴上的平移。

(2) 小波变换。在小波变换中, 分别在时间和频率两个尺度上分析一维序列的信息。对于已知的能量有限信号  $f(t) \in L^2(R)$ , 子小波  $\Psi_{a,b}(t)$  的连续小波变换为:

$$W_{f(a,b)} = |a|^{-0.5} \int_R f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (10)$$

式中:  $W_{f(a,b)}$  为小波变换系数;  $f(t)$  为平方可积函数。

由于获得的数据是离散的, 假定函数  $f(k\Delta t)$ , ( $k=1, 2, \dots, N$ ;  $\Delta t$  为取样间隔), 那么离散的小波变换形式为:

$$W_{f(a,b)} = |a|^{-0.5} \Delta t \sum_{k=1}^n f(k\Delta t) \overline{\Psi}\left(\frac{k\Delta t-b}{a}\right) \quad (11)$$

式中:  $\overline{\Psi}\left(\frac{x-b}{a}\right)$  为  $\Psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$  的复共轭函数。

由公式(11)可知, 小波分析借由增减伸缩因子来获得序列的低频和低频信息, 进而得到不同时间、空间尺度层面的局部变化特征。

(3) 小波方差。小波方差是将小波系数值取平方, 并在整个时间轴领域内积分, 如公式(12)所示:

$$\text{var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{f(a,b)}|^2 db \quad (12)$$

在不同的时间尺度下绘制小波方差变化过程, 形成小波方差图, 它能够体现信号波动过程中的能量汇集情况, 从而凸显出序列中扰动剧烈的信息, 分析判断主周期。

## 3 SWAT 模型构建

SWAT 模型是由美国农业研究所开发的适用于流域尺度的半分布式水文模型<sup>[17]</sup>, 包含气候、水文、侵蚀、土地覆盖变化、管理措施、主河道变化、营养物质和水体运动等多个部分<sup>[18-21]</sup>, 能够模拟流域内多种不同的水文循环过程<sup>[22]</sup>。模型具有很好的适用性, 可基于 GIS 提供的空间数据, 模拟长时段内水文过程, 被广泛用于不同区域变化环境下的流域水文特征研究<sup>[23]</sup>。

### 3.1 数据资料

本文选取诺敏河流域的小二沟站作为水文代表站点, 选取流域内的 8 个气象站点作为研究对象。SWAT 模型所需基础资料及来源见表 1, 各站点分布如图 1 所示。

表 1 诺敏河流域基础数据信息

Table 1 Basic data information of Nomin River Basin

数据类型	数据源	数据时间序列长度
DEM	中国科学院地理空间数据云	2015 年
土地利用	中国科学院资源环境科学数据中心	2015 年
土壤类型	FAO HWSD	
土壤属性	FAO HWSD	
气象数据	国家气象科学数据中心	1961—2015 年
水文数据	各年的水文年鉴	2006—2015 年

### 3.2 基础数据库构建

3.2.1 土壤数据库 本文使用 FAO 土壤数据库直接建立用户数据库<sup>[16]</sup>。模型所需的土壤物理属性参数按获取方式分为两部分: 第 1 部分可直接从 FAO

土壤数据库中查取;其余数据通过 SPAW 软件和统计分析方法计算得出<sup>[24]</sup>。

3.2.2 土地利用数据库 将 SWAT 模型中定义使用的土地利用分布类型按照植被覆盖特征进行二级分类。对于不同的土地利用类型,考虑到属性表中有十几种类型,且其中有些类型可以合并为一种,因此先将它们进行重新分类,然后再得到能够直接使用的土地利用数据。

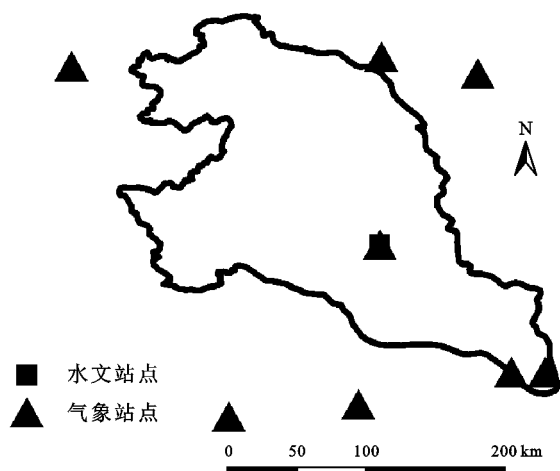


图 1 诺敏河流域气象、水文站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological and hydrological stations in Nomin River Basin

3.2.3 气象数据库 按照模型所需的格式要求,对各站点日值气象数据进行整理,并计算特征值,将结果录入 SWAT 模型的基础数据库中。

3.2.4 空间离散数据库 SWAT 模型基于流域 DEM 提取河网水系并进行子流域划分,再根据不同的土地使用类型、土壤类型和坡度,将具有相同类型的单元进行

归集,将诺敏河流域划分成 273 个水文响应单元。

### 3.3 模型参数率定与验证

根据实测径流数据,选取小二沟站作为研究对象,从日尺度层面对小二沟径流进行率定和验证。其中,将 2006—2010 年作为率定期,并设置 2006 年为预热期;将 2011—2015 年作为验证期。

选用决定系数  $R^2$  以及纳什系数  $E_{ns}$  来对 SWAT 模型的拟合效果进行评价,其计算公式为公式(13)—(14)。模型误差评价参考表见表 2。径流拟合曲线见图 2—3。

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{m,avg})(Q_{s,i} - Q_{s,avg})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{m,avg})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{s,avg})^2} \quad (13)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_a)^2} \quad (14)$$

表 2 模型误差评价

Table 2 Model error evaluation

可靠性	$R^2$	$E_{ns}$
很好	0.81~1	0.76~1
良好	0.71~0.8	0.66~0.75
一般	0.51~0.7	0.51~0.65
不满足	$\leq 0.5$	$\leq 0.5$

从径流拟合曲线来看,径流模拟值和实测值趋势一致,两条曲线较为贴合。率定期和验证期的  $R^2$  分别为 0.76, 0.73,  $E_{ns}$  分别为 0.72, 0.70, 两者的模拟效果都表现为良好。因此,径流的模拟能够满足模型所需的精度要求,故可以选用调整后的敏感参数值来进行后续的径流模拟,调整后的敏感参数见表 3。

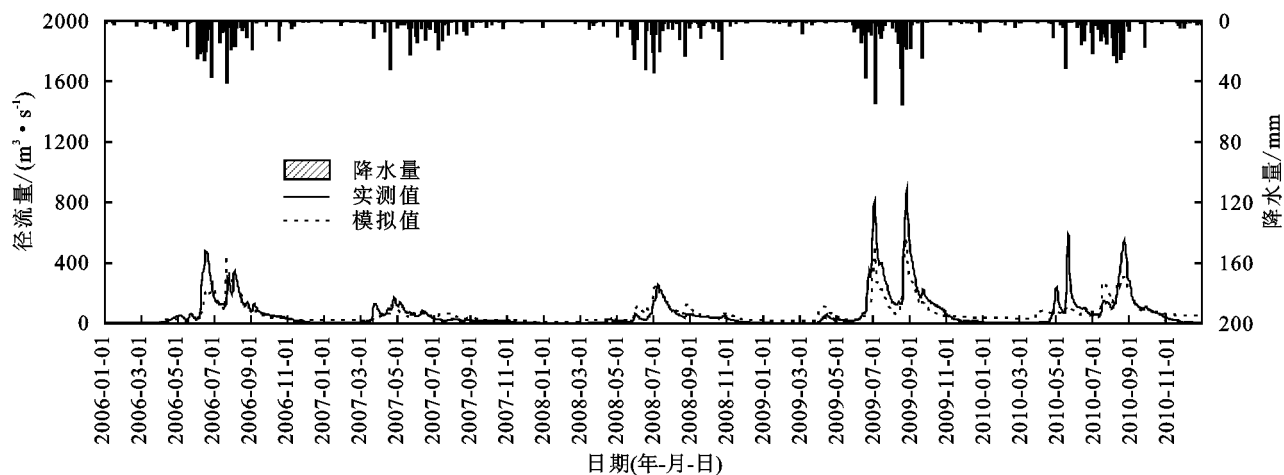


图 2 小二沟站率定期(2006—2010 年)年日径流拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of annual daily runoff at Xiaogou station from 2006 to 2010

## 4 未来情景模式下径流变化规律分析

对诺敏河流域而言,气温和降水是影响径流变化

的最直接、最重要的气候因素。本文选择较常用、在我国东北地区适应性强的 CanESM 5 大气环流模式,采用 SDSM 统计降尺度对不同排放情景模式进行统



计降尺度, 获得诺敏河流域未来几十年的气象要素序列值, 并将其输入率定后的 SWAT 模型, 模拟研究区域径流对气候变化的响应, 并分析径流的趋势、突变及周期变化特征。

4.1 气候情景设定

为模拟评估未来气候变化, IPCC 第五次评估报告采用 CMIP 5 中的气候模式, 预设了温室气体排放

浓度情景(RCPs)。  
其中: RCP2.6 情景假设全球能源使用发生改变, 温室气体排放将显著减少; RCP4.5 情景假设可再生能源和碳捕捉系统广泛使用、森林储碳量增加, 温室气体排放量也将显著减少; RCP8.5 情景假设无政策干预, 全球人口大幅增加、化石燃料消耗变大, 温室气体排放和浓度不断增加。

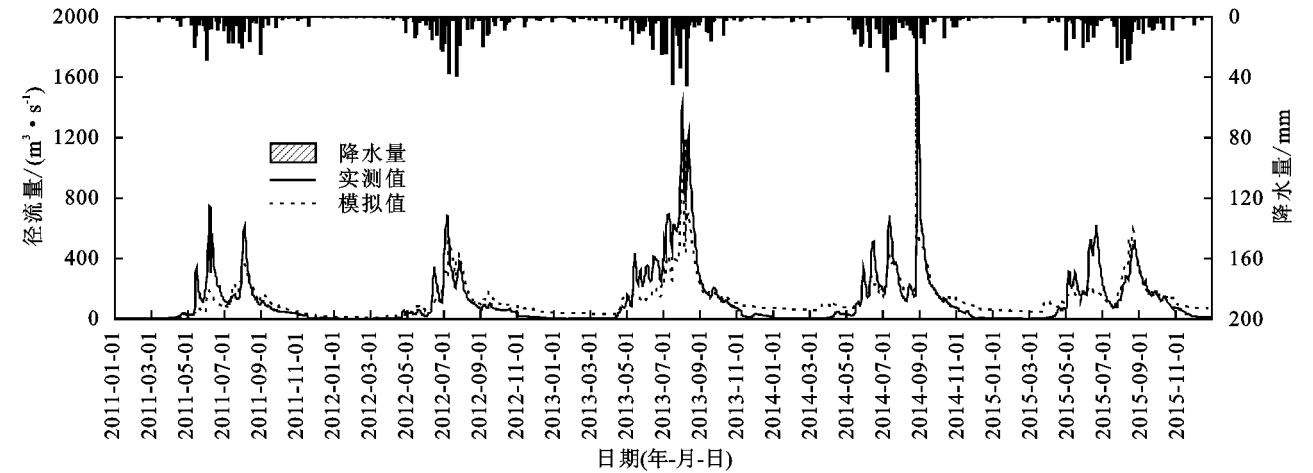


图 3 小二沟站验证期(2011—2015 年)年日径流拟合曲线  
Fig. 3 Fitting curve of annual daily runoff at Xiaogou station from 2011 to 2015

表 3 SWAT 模型敏感参数率定结果

Table 3 Sensitivity parameter calibration results of SWAT model

参数	含义	参数值
r__CN2	SCS 径流曲线数	0.600
v__ALPHA_BF	基流 $\alpha$ 因子	0.278
v__GW_DELAY	地下水延迟时间	96.375
v__GWQMN	浅层含水层发生回归流的水位阈值(mm)	0.007
v__GW_REVAP	地下水再蒸发系数	0.246
v__ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.428
v__CH_N2	主河道曼宁系数	0.118
v__CH_K2	支流冲积层有效渗透系数	68.433
r__SOL_AWC(1)	第 1 层土壤可用含水量	0.461
r__SOL_K(1)	第 1 层土壤饱和和渗透系数	0.450
v__SFTMP	降雪温度, 为降雪转化为雪或冻雨的平均温度(°C)	-3.515

注: r\_\_表示参数值进行相对变化或乘以(1+给定值); v\_\_表示将参数替代为给定值。

本文使用 CMIP 5 中 CGCMs 模式的数据集 CanESM5。该数据集包含了全球的历史数据集和全球 2006—2100 年 RCP2.6, RCP4.5 和 RCP8.5 三种情景下的基础数据。

4.2 气候要素分析

将大气环流模式中的未来数据统计降尺度, 生成 3 种排放情景模式下的数据。对 2021—2100 年进行分析, 设定 2021—2060 年为 21 世纪中期, 2061—2100 年为 21 世纪后期。

4.2.1 气温变化趋势分析 绘制 3 种模式下气温的

趋势变化图并统计其特征值(图 4、表 4), 3 种情景模式下年均气温、年平均最高气温和年平均最低气温都保持增长的趋势。对比 21 世纪中、后期 3 种气温变化趋势可发现, 随着时间的持续, 3 种排放导致的气候变暖结果差距将越来越大, 尤其对于 RCP8.5 模式, 整个 21 世纪都保持很高的增长率, 增幅几乎都在 0.65℃/10 a 以上。对于 RCP2.6 和 RCP4.5 模式, 气候变暖得到了有效控制, 虽也呈现一定的增幅, 但增幅明显小于 RCP8.5 模式, 增长速率仅为 RCP8.5 模式下的 1/4~1/2。两者相比较来看, 对于 21 世纪中

期,RCP2.6 模式下多年平均气温稍高于 RCP4.5 模式,但相差不大;而对于 21 世纪后期,RCP2.6 模式对气候变暖效果的控制要好于 RCP4.5 模式。

4.2.2 降水变化趋势分析 绘制 3 种模式下年降水的趋势图并统计特征值。由图 5、表 5 可知,3 种情景模式下年降水都保持增长的趋势。其中,RCP8.5 模

式下降水的增幅最大,在 21 世纪后期增幅已经超过 20 mm/10 a。对于 RCP4.5 模式,在 21 世纪中期,年降水的增幅为 6.05 mm/10 a,到了 21 世纪后期,降水增幅增大至 12 mm/10 a。RCP2.6 模式下,降水增幅相对较小,且 21 世纪后期与中期相近,增幅相比另两种情景模式有所减缓。

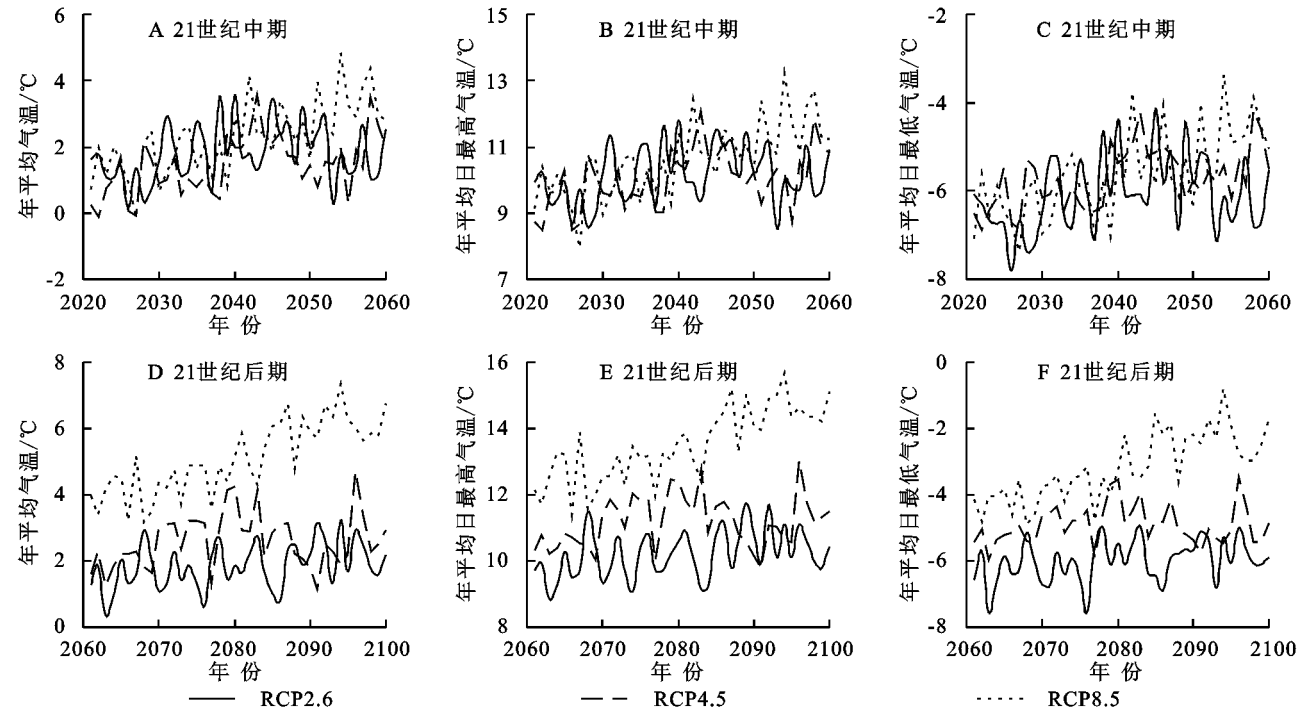


图 4 诺敏河流域 21 世纪中期和后期 3 种排放情景模式气温变化趋势

Fig. 4 Temperature change trends of three emission scenario modes in Nomin River Basin in the mid 21st century and late 21st century

表 4 诺敏河流域 3 种排放情景模式气温特征值

Table 4 Temperature characteristic values of three emission scenario modes in Nomin River Basin						
气温类型	时间段	情景模式	平均值/°C	最高值/°C	最低值/°C	线性趋势/(°C/10 a)
年平均气温	21 世纪中期	RCP2.6	1.81	3.59	0.18	0.19
		RCP4.5	1.45	3.58	−0.10	0.38
		RCP8.5	2.29	4.83	−0.13	0.64
	21 世纪后期	RCP2.6	1.86	3.26	0.35	0.24
		RCP4.5	2.60	4.71	1.16	0.15
		RCP8.5	5.10	7.34	3.17	0.76
年平均最高气温	21 世纪中期	RCP2.6	10.16	11.80	8.51	0.20
		RCP4.5	10.03	12.05	8.50	0.35
		RCP8.5	10.63	13.24	7.94	0.67
	21 世纪后期	RCP2.6	10.18	11.76	8.85	0.23
		RCP4.5	11.18	13.05	9.79	0.15
		RCP8.5	13.50	15.67	11.38	0.75
年平均最低气温	21 世纪中期	RCP2.6	−6.08	−4.12	−7.81	0.21
		RCP4.5	−5.71	−4.16	−6.89	0.31
		RCP8.5	−5.63	−3.35	−7.38	0.55
	21 世纪后期	RCP2.6	−6.01	−4.97	−7.56	0.19
		RCP4.5	−4.91	−3.46	−5.97	0.06
		RCP8.5	−3.18	−0.77	−4.89	0.67

4.3 径流变化特征分析

4.3.1 径流趋势特征分析 绘制 3 种排放情景模式

下年径流的趋势变化图并统计特征值(图 6、表 6)。结果显示:3 种情景模式下径流都保持增长趋势。

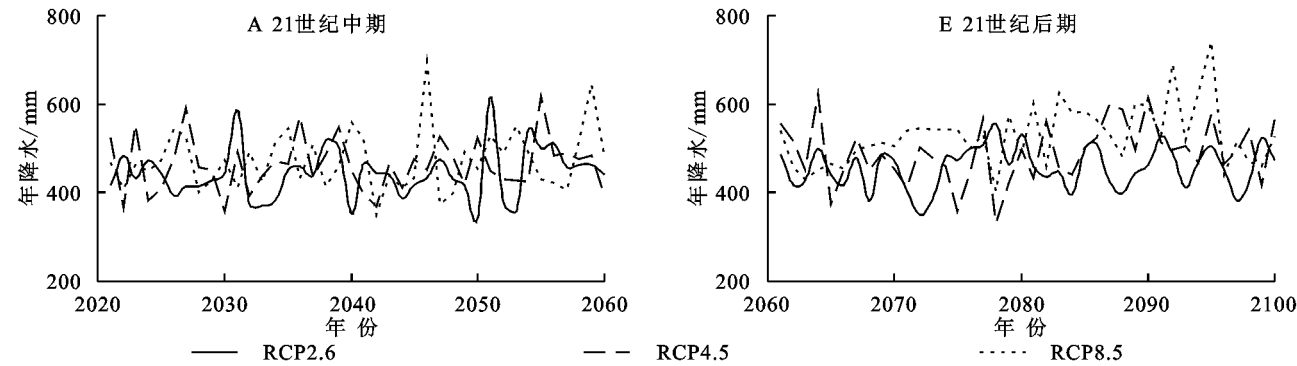


图 5 诺敏河流域 21 世纪中期和后期 3 种排放情景模式降水变化趋势

Fig. 5 Precipitation change trends of three emission scenario modes in Nomin River Basin in the mid 21st century and late 21st century

表 5 诺敏河流域 3 种排放情景模式年降水特征值

Table 5 Annual precipitation characteristic values of three emission scenario modes in Nomin River Basin					
时间段	情景模式	平均值/mm	最大值/mm	最小值/mm	线性趋势/(mm/10 a)
21 世纪中期	RCP2.6	472.93	645.87	342.65	4.57
	RCP4.5	492.82	647.37	388.95	6.05
	RCP8.5	503.20	725.09	379.39	8.81
21 世纪后期	RCP2.6	485.37	584.72	380.956	6.63
	RCP4.5	518.65	651.69	361.61	12.37
	RCP8.5	557.74	771.62	434.30	20.96

其中,RCP8.5 模式下径流增幅最大,在 21 世纪中期保持 1.15 亿 m<sup>3</sup>/10 a 的增速,后期以 1.72 亿 m<sup>3</sup>/10 a 增长,因此到 21 世纪后期,其多年平均年径流量也最大,达到 40.23 亿 m<sup>3</sup>。RCP4.5 模式其次,在 21 世纪中、后期分别以每 10 年 0.49 亿 m<sup>3</sup>,0.96 亿 m<sup>3</sup>的增速增长,到 21 世纪后期多年平均径量达到 35.34 亿 m<sup>3</sup>。RCP2.6 模式下径流量增长相对较少,在 21 世纪中期和后期增长量仅为每 10 年 0.06 亿 m<sup>3</sup>,0.27 亿 m<sup>3</sup>。

径流的增长特征与流域未来的降雨和气温关系密切,一方面,降水增加对径流有着最直接的影响,径流随着降水的增加而增加;另一方面可以看到,RCP8.5 模式下,21 世纪后期降雨增加值非常大,为 21 世纪中期的 3 倍,而 21 世纪后期的径流增幅仅为中期的 1.5 倍,同样地,RCP4.5 模式和 RCP2.6 模式下,降雨增幅分别为 2,1.5 倍,而径流增幅则分别为 2 倍和 4 倍。这是由于气温升高引起蒸发增加,进而抑制了降水促进径流增加的作用。

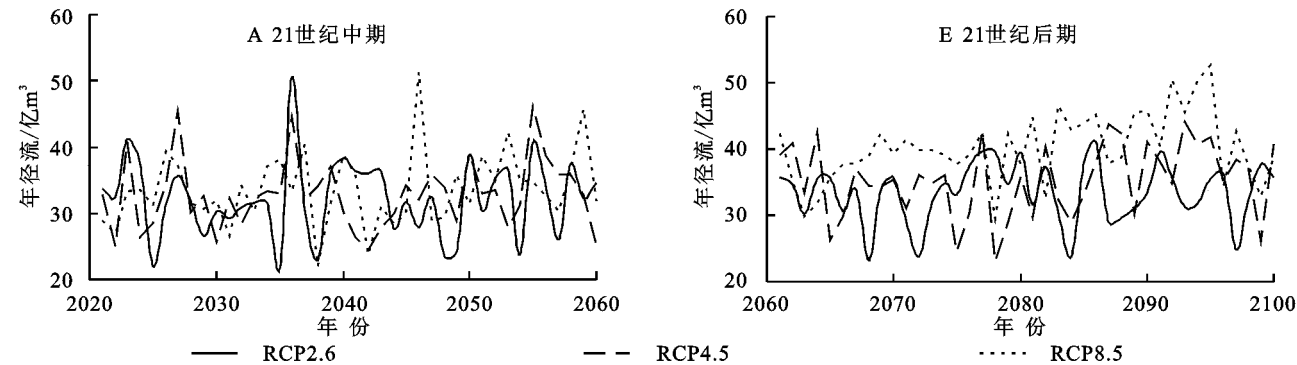


图 6 诺敏河流域 21 世纪中期和后期 3 种排放情景模式下径流变化趋势

Fig. 6 Runoff variation trend of three emission scenario modes in Nomin River Basin in the mid 21st century and late 21st century

4.3.2 径流突变特征分析 绘制 3 种情景模式下 2021—2100 年诺敏河流域径流的突变检验曲线(图

7—9)。结果显示:随着气候变化,3 种情景模式的径流突变特征产生了很大的差别。

表 6 诺敏河流域 3 种排放情景模式下年径流特征值

Table 6 Annual runoff characteristic values under three emission scenario modes in Nomin River Basin

时间段	情景模式	平均值/亿 m <sup>3</sup>	最大值/亿 m <sup>3</sup>	最小值/亿 m <sup>3</sup>	线性趋势/(亿 m <sup>3</sup> /10 a)
21 世纪中期	RCP2.6	32.30	50.49	21.84	0.06
	RCP4.5	32.79	46.11	24.40	0.49
	RCP8.5	33.63	51.20	21.86	1.15
21 世纪后期	RCP2.6	33.44	41.01	23.25	0.27
	RCP4.5	35.34	44.10	23.05	0.96
	RCP8.5	40.23	52.65	29.45	1.72

对于 RCP2.6 模式,正反向序列曲线存在多个交点,且所处的区间位于上下置信区间内,但从年径流的趋势变化来看,序列的正向曲线均未能突破上下置信度线。结合 Pettitt 检验曲线看,该曲线并不存在明显的最低点。因此可认为在 RCP2.6 模式下诺敏河流域年径流在未来不会突变。

对于 RCP4.5 模式,正反向序列曲线也存在多个交点,且所处的区间位于上下置信区间内,年径流序列的正向曲线突破了上置信度线,但并不显著。结合 Pettitt 检验曲线,该曲线存在一个明显的最低点。因

此可认为在 RCP4.5 模式下诺敏河流域年径流在未来存在很大的可能形成突变。

对于 RCP8.5 模式,正反向序列曲线存在 1 个交点,且交点位于上下置信区间内,年径流序列的正向曲线明显地突破了置信度线,交点位于 2067 年附近。结合 Pettitt 检验曲线看,该曲线存在一个明显的最低点,对应的时间为 2067 年。因此可认为在 RCP8.5 模式下诺敏河流域年径流将在 2067 年附近发生突变,突变后的径流表现为显著的增加。径流的突变特征与趋势特征也表现出了较好的一致性。

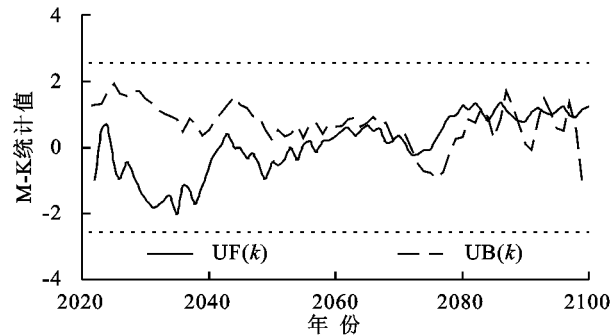


图 7 诺敏河流域 RCP2.6 模式下径流 M-K 法突变识别、Pettitt 法突变识别

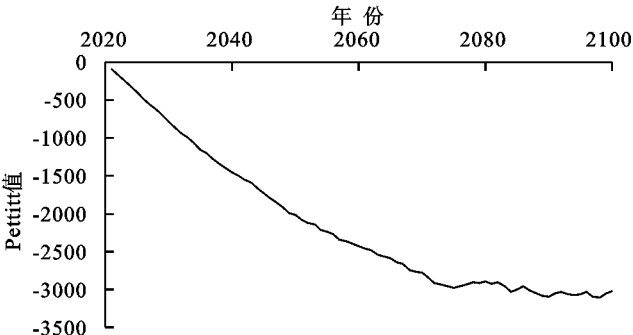


Fig. 7 Runoff M-K and Pettitt method mutation identification under RCP2.6 mode in Nomin River Basin

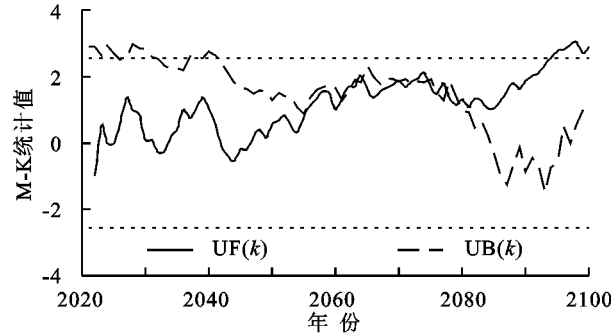


图 8 诺敏河流域 RCP4.5 模式下径流 M-K 法突变识别、Pettitt 法突变识别

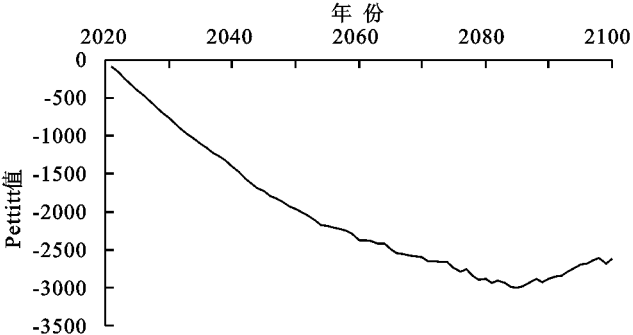


Fig. 8 Runoff M-K and Pettitt method mutation identification under RCP4.5 mode in Nomin River Basin

4.3.3 径流周期特征分析 对 3 种模式下 2021—2100 年的径流进行小波计算,并绘制小波图(图 10—12)。对于 RCP2.6 模式,序列存在 3 个峰值,对应 7, 19, 56 a 时间尺度。其中 56 a 时间尺度为峰值的最高点,可认为是该序列的第一主周期,7 a 时间尺度次之,为序列的第二周期,19 a 则对应第三周期。结合

实部等值线图可知,虽然 30, 45 a 的时间尺度在方差图上没有明显的峰值特征,但也存在一些周期特征。

对于 RCP4.5 模式,序列存在 4 个峰值,对应 19, 32, 44, 56 a 时间尺度。其中 56 a 时间尺度为峰值的最高点,可认为是该序列的第一主周期,44 a 时间尺度次之,为序列的第二周期,32 a 和 19 a 则对应了第



三、第四周期。相比于 RCP2.6 模式, 7 a 时间尺度在周期特征变现上产生了波动, 而 30 a 和 45 a 附近的周期特征得到了更明显的凸显。

对于 RCP8.5 模式, 其周期特征和 RCP4.5 模式

相似, 峰值对应的时间分别为 19, 32, 44, 56 a。其中 56 a 时间尺度为峰值的最高点, 可认为是该序列的第一主周期, 44 a 时间尺度次之, 对应为序列的第二周期, 32 a 和 19 a 则对应了第三、第四周期。

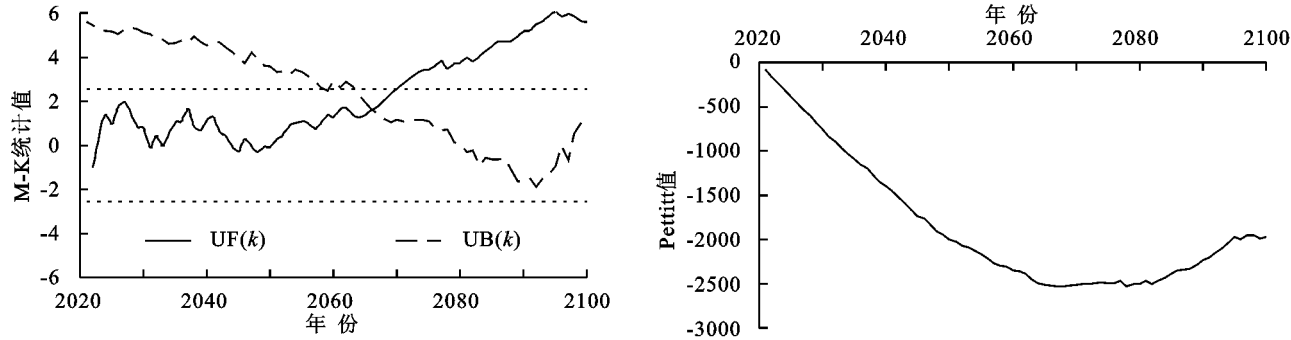


图 9 诺敏河流域 RCP8.5 模式下径流 M-K 法突变识别、Pettitt 法突变识别

Fig. 9 Runoff M-K and Pettitt method mutation identification under RCP8.5 mode in Nomin River Basin

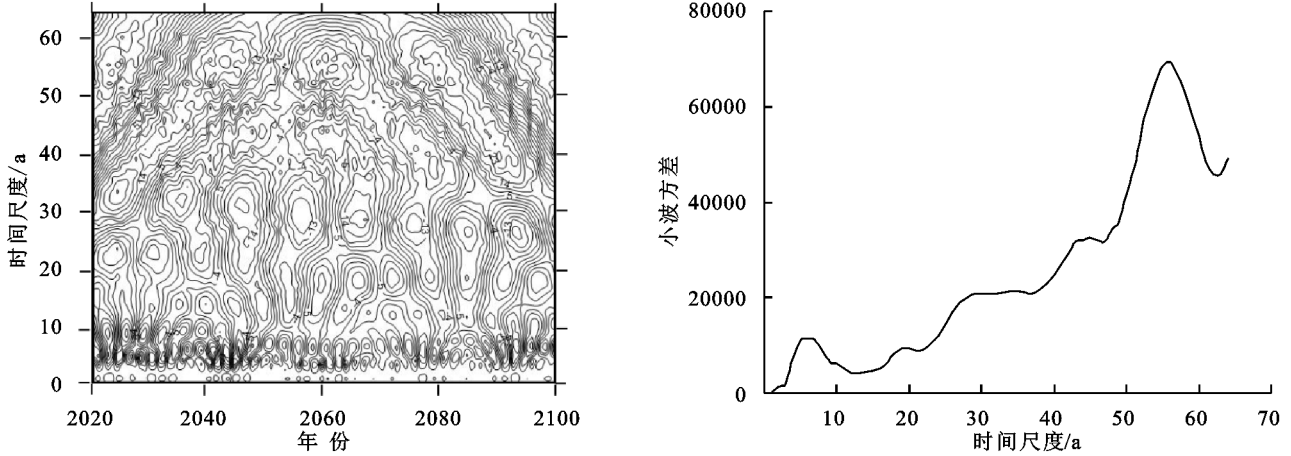


图 10 诺敏河流域 RCP2.6 模式下径流小波系数实部等值线图、小波方差

Fig. 10 Real part contour map and wavelet variance map of runoff wavelet coefficients under RCP2.6 mode in Nomin River Basin

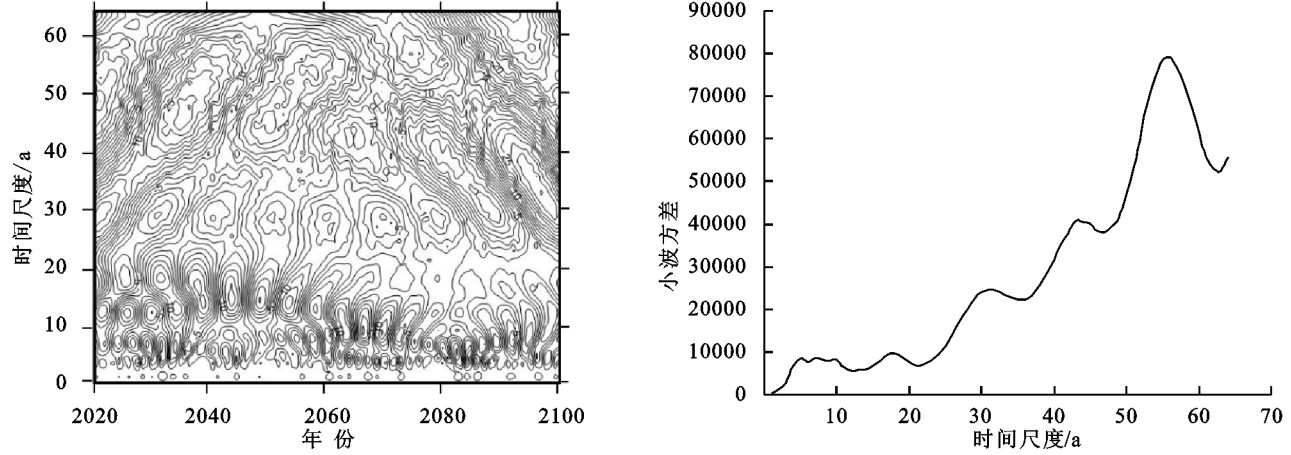


图 11 诺敏河流域 RCP4.5 模式下径流小波系数实部等值线图、小波方差

Fig. 11 Real part contour map and wavelet variance map of runoff wavelet coefficients under RCP4.5 mode in Nomin River Basin

5 讨论与结论

本文用未来气候数据驱动 SWAT 模型进行气候变化条件下径流特征分析。从趋势上看: 3 种情景模式下径流都保持增长趋势。其中, RCP8.5 模式下增幅最大,

21 世纪中期保持 1.15 亿 m<sup>3</sup>/10 a 的增速, 后期以 1.72 亿 m<sup>3</sup>/10 a 增长。RCP4.5 模式其次, 在 21 世纪中、后期分别以 0.49 亿 m<sup>3</sup>/10 a, 0.96 亿 m<sup>3</sup>/10 a 的增速增长。RCP2.6 模式下径流量增长相对较少, 在 21 世纪中期和后期增速仅为每 10 年 0.06 亿 m<sup>3</sup>, 0.27 亿 m<sup>3</sup>。

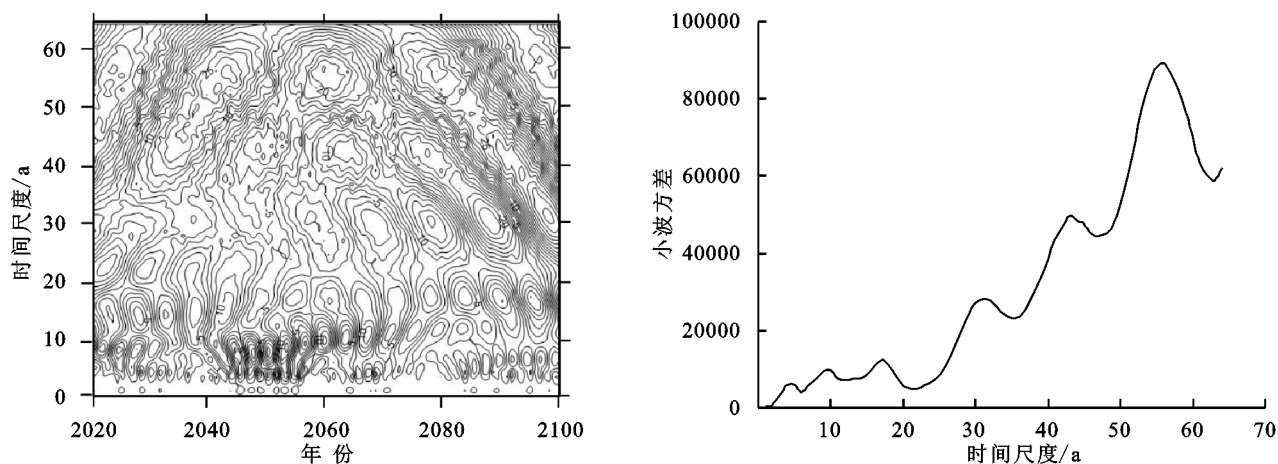


图 12 诺敏河流域 RCP8.5 模式下径流小波系数实部等值线图、小波方差

Fig. 12 Real part contour map and wavelet variance map of runoff wavelet coefficients under RCP8.5 mode in Nomin River Basin

从突变上看:RCP2.6 模式下,诺敏河流域年径流依旧不会突变;RCP4.5 模式下,年径流在未来存在很大的可能形成突变。而 RCP8.5 模式下,年径流将在 2067 年附近发生突变,突变后的径流表现为显著的增加。

从周期上看:RCP2.6 模式下,年径流变化周期主要由 56 a 时间尺度的主周期控制,7 a 和 19 a 时间尺度对应的次周期控制效果一般;RCP4.5 模式下,年径流变化周期主要由 56 a 和 44 a 的第一、第二主周期控制,32 a 和 19 a 对应的次周期控制效果不强。RCP8.5 模式下,其周期特征和 RCP4.5 模式相似,相比之下,56 a 时间尺度下能量密度更为密集,该周期的控制效果得到进一步增强,而其余几个周期下的控制效果则进一步减弱。

本文在研究的过程中,水文模型、气候模式、降尺度模型中都存在不确定性,怎样量化这些模型在计算中的不确定性,了解计算过程中相互之间存在的分歧,需要更为深入地研究。同时,除气候变化环境因素外,人类活动如砍伐森林、城市化发展等,都会对径流产生较大的影响<sup>[25-27]</sup>,如何定量地区分其中气象要素和人类活动的贡献率也有待进一步分析。

#### 参考文献:

- [1] Lipczynska-Kochany E. Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: A review[J]. Science of the Total Environment, 2018,640:1548-1565.
- [2] Fanzo J, Davis C, McLaren R, et al. The effect of climate change across food systems: Implications for nutrition outcomes[J]. Global Food Security, 2018,18:12-19.
- [3] 赵宗慈,罗勇,黄建斌.回顾 IPCC 30 年(1988—2018 年)[J].气候变化研究进展,2018,14(5):540-546.
- [4] Shi C, Jiang Z, Chen W, et al. Changes in temperature extremes over China under 1.5°C and 2°C global warming targets[J]. Advances in Climate Change Research, 2018,9(2):120-129.
- [5] 张徐杰.气候变化下基于 SWAT 模型的钱塘江流域水文过程研究[D].杭州:浙江大学,2015.
- [6] Ma C, Sun L, Liu S, et al. Impact of climate change on the streamflow in the glacierized Chu River Basin, Central Asia[J]. Journal of Arid Land, 2015,7(4):501-513.
- [7] 牟婷婷.基于 SWAT 模型的径流模拟及预测研究[D].武汉:武汉大学,2018.
- [8] 刘春蓁.气候变化对我国水文水资源的可能影响[J].水科学进展,1997,8(3):220-225.
- [9] 郭生练,郭家力,侯雨坤,等.基于 Budyko 假设预测长江流域未来径流量变化[J].水科学进展,2015,26(2):151-160.
- [10] 江介伦,刘子明,童庆斌,等.基于不同大气环流模型评估气候变迁对高屏溪流域河川流量的影响[J].水利学

Zhao Z C, Luo Y, Huang J B. Reviewing the 30 Years of IPCC (1988—2018)[J]. Climate Change Research, 2018,14(5):540-546.

Zhang X J. Study on Hydrological Process of Qiantang River Basin Based on SWAT Model Under Climate Change[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

Mou T T. Research on Runoff Simulation and Prediction Based on SWAT model[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.

Liu C Z. Potential impact of climate change on hydrology and water resources in China [J]. Advances in Water Science, 1997,8(3):220-225.

Guo S L, Guo J L, Hou Y K, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (2):151-160.

Jiang J L, Liu Z M, Tong Q B, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (2):151-160.

Jiang J L, Liu Z M, Tong Q B, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (2):151-160.

Jiang J L, Liu Z M, Tong Q B, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (2):151-160.

Jiang J L, Liu Z M, Tong Q B, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (2):151-160.

Jiang J L, Liu Z M, Tong Q B, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (2):151-160.

Jiang J L, Liu Z M, Tong Q B, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (2):151-160.

Jiang J L, Liu Z M, Tong Q B, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (2):151-160.

Jiang J L, Liu Z M, Tong Q B, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (2):151-160.

- 报,2010,41(2):148-154.
- Jiang J L, Liu Z M, Tong Q B, et al. Variation evaluation of the impact on water resources derived from various General Circulation Models[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(2):148-154.
- [11] 韩慧毅,丛刚春.复州河流域径流趋势性变化[J].水土保持应用技术,2011(1):4-6.
- Han H Y, Cong G C. Trend changes of runoff in the Fuzhou River Basin[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2011(1):4-6.
- [12] Khaled H, Hamed A, Ramachandra R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998,204:182-196.
- [13] 雷红富,谢平,陈广才,等.水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J].水电能源科学,2007,25(4):36-40.
- Lei H F, Xie P, Chen G C, et al. Performance comparison and analysis of variational point testing methods for hydrological sequences[J]. Water Resources and Power, 2007,25(4):36-40.
- [14] Hamed K H, Ramachandra Rao A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998,204(1/4):182-196.
- [15] 周园园,师长兴,范小黎,等.国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J].地理科学进展,2011,30(11):1361-1369.
- Zhou Y Y, Shi C X, Fan X L, et al. Advances in the research methods of abrupt changes of hydrologic sequences and their applications in drainage basins in China[J]. Progress in Geography,2011,30(11):1361-1369.
- [16] 汪飞,洪林,吐尼亚孜·亚森,等.澜沧江流域气候时空变化规律[J].武汉大学学报:工学版,2020,53(5):394-403.
- Wang F, Hong L, Tun Y, et al. Spatial-temporal variations of climate over Lancang River Basin[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2020,53(5):394-403.
- [17] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theroetical Documentation Version[Z].Texas Water Resources Institute,2005.
- [18] Schlesinger M E, Zhao Z. Seasonal climatic changes induced by doubled CO<sub>2</sub> as simulated by the OSU atmospheric GCM/mixed-layer ocean model[J]. Journal of Climate, 1989,2(5):459-495.
- [19] 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.
- Li F, Hu T S, Huang H J. Research on the principle, structure, and application of SWAT model[J]. China rural water and hydropower,2008(3):24-28.
- [20] Williams J R, Nicks A D, Arnold J G. Simulator for water resources in rural basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985,111(6):970-986.
- [21] Lai G Y, Wu D Y, Zhong Y X, et al. Progress in development and applications of SWAT model[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012,40(3):243-251.
- [22] 姜晓峰,王立,马放,等.SWAT 模型土壤数据库的本土化构建方法研究[J].中国给水排水,2014,30(11):135-138.
- Jiang X F, Wang L, Ma F, et al. Research on localization construction method of SWAT model soil database[J]. China Water & Wastewater,2014,30(11):135-138.
- [23] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1990, 329(1255):421-428.
- [24] 郝芳华,程红光,杨胜天.非点源污染模型:理论与应用[M].北京:中国环境科学出版社,2006.
- Hao F H, Cheng H G, Yang S T. Non Point Source Pollution Models: Theory, Methods, and Applications [M]. Beijing: China Environmental Science Press,2006.
- [25] 林娴,陈晓宏,何艳虎,等.气候变化和人类活动对武江流域年径流及最大日流量影响的定量分析[J].自然资源学报,2018,33(5):828-839.
- Lin X, Chen X H, He Y H, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on annual and maximum daily runoff in the Wujiang River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(5):828-839.
- [26] 刘春蓁,占车生,夏军,等.关于气候变化与人类活动对径流影响研究的评述[J].水利学报,2014,45(4):379-385.
- Liu C Z, Zhan C S, Xia J, et al. Review on the impact of climate change and human activities on runoff research[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014, 45(4):379-385.
- [27] 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.
- Dong L H, Xiong L H, Yu K X, et al. Research progress on the impact of climate change and human activities on hydrology[J]. Advances in Water Science, 2012,23(2):278-285.