

基于SWAT模型的沙河流域气候变化对径流的影响

赵 娴¹, 孙建伟², 吕正虎³, 刘光辉¹, 任 帅⁴, 刘芮廷¹

¹河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸

²邯郸市水利局节约用水促进中心, 河北 邯郸

³河北省邢台水文勘测研究中心, 河北 邢台

⁴河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2023年10月23日; 录用日期: 2024年1月8日; 发布日期: 2024年1月18日

摘 要

为了探讨气候变化下沙河流域地表径流演变趋势以及其对径流的影响, 本文基于1960~2020年沙河流域逐日气象水文数据, 采用统计分析法对比分析了流域降水、温度和径流的演变趋势性和突变性, 并结合沙河流域1980、1990、2000、2010、2020年五期土地利用数据, 建立了多时段沙河流域SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型。根据未来趋势设置不同气候变化情景, 分析了沙河流域径流对气候变化的响应。研究表明: 1) SWAT模型在沙河流域径流模拟中具有较好的适用性, 率定期和验证期的相关系数(R^2)均在0.6以上, Nash-Sutcliffe纳什效率系数(Ens)均在0.5以上, 相对误差(Re)均在 $\pm 25\%$ 以内。2) 过去61年沙河流域温度呈显著上升趋势, 降水量下降不明显, 而实测径流量呈显著下降趋势。3) 不同气候变化情景下的模拟表明, 研究区径流与降水呈正相关, 与温度呈负相关, 且径流对降水变化的敏感程度高于径流对温度变化的敏感程度。

关键词

气候变化, SWAT模型, 沙河流域, 径流

The Impact of Climate Change on Runoff in the Shahe River Basin Based on the SWAT Model

Xian Zhao¹, Jianwei Sun², Zhenghu Lyu³, Guanghui Liu¹, Shuai Ren⁴, Ruiting Liu¹

¹School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Handan Water Conservation Promotion Center, Handan Water Conservancy Bureau, Handan Hebei

³Xingtai Hydrological Survey Research Center of Hebei Province, Xingtai Hebei

文章引用: 赵娴, 孙建伟, 吕正虎, 刘光辉, 任帅, 刘芮廷. 基于 SWAT 模型的沙河流域气候变化对径流的影响[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(1): 12-29. DOI: 10.12677/ag.2024.141002

⁴School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: Oct. 23rd, 2023; accepted: Jan. 8th, 2024; published: Jan. 18th, 2024

Abstract

To explore the evolution trends of surface runoff in the Shahe River Basin under climate change and its impacts, we used daily meteorological and hydrological data from 1960 to 2020 in the Shahe River Basin. We employed a statistical analysis method to compare and analyze the trend and abrupt changes in precipitation, temperature, and runoff in the basin. Additionally, we established a multi-period SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model for the Shahe River Basin, considering land use data for five periods in 1980, 1990, 2000, 2010, and 2020. We set different climate change scenarios according to the future trends to analyze the response of runoff in the Shahe River Basin to climate change. The research results indicate: 1) The SWAT model demonstrates good applicability in simulating runoff in the Shahe River Basin, with correlation coefficients (R^2) above 0.6 during the calibration and validation periods, Nash-Sutcliffe efficiency coefficients (Ens) above 0.5, and relative errors (Re) within $\pm 25\%$. 2) Over the past 61 years, the temperature in the Shahe River Basin showed a significant upward trend, with a less pronounced decrease in precipitation, while observed runoff exhibited a significant decreasing trend. 3) Simulations under different climate change scenarios revealed that runoff in the study area is positively correlated with precipitation and negatively correlated with temperature. Runoff is more sensitive to changes in precipitation than to changes in temperature.

Keywords

Climate Change, SWAT Model, Shahe River Basin, Runoff

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会的快速发展, 温室气体大量排放, 全球平均温度明显上升。2021 年, IPCC 在发布的第六次气候变化评估报告中表明, 全球的平均温度在未来 20 年内将再升高大约 1.5°C 左右[1]。由于全球变暖影响了降水、蒸发、径流等水文因素, 进而改变了水文循环过程, 在一定程度上改变了水资源的总量, 并导致了水资源在时间和空间上的再分配[2]。此外, 温度上升易引起强降雨、干旱、洪涝等极端降水事件频繁发生, 直接影响人类的生命财产、生产和水资源安全, 对生态环境和社会的可持续发展构成威胁[3] [4], 气候变化已成为全球学者广泛研究的热点问题[5] [6]。

近年来, 众多学者针对气候变化对国内外不同流域径流的响应开始进行大量研究[7], 主要采用分布式水文模型, 其可以更加准确、详细地描述流域内的水文物理过程, 特别是对流域内的空间异质性描述, 更能较真实地反映出气候和土地利用变化对流域水资源的影响情况[8] [9]。相较于其他分布式水文模型, 如 VIC 水文模型[10]、MIKE-SHE 水文模型[11] [12]等, SWAT 模型是目前应用较好的分布式水文模型。SWAT 模型由美国农业部(USDA) Jeff Arnold 博士于 1994 年开发出来的, 是对大中型复杂流域进行长期水文过程的模拟研究, 并且能够考虑气候、土壤数据、地形等综合作用, 具有一定的物理机制, 计算高

效且模型简单易用[13] [14]。由此可见, SWAT 模型已成为研究水资源变化的重要工具。SWAT 水文模型最早由水文学家 Srinivasan 等人利用 SWAT 模型应用于美国伊利诺伊州流域进行径流模拟, 研究表明, 在长时间序列中模拟效果较为准确, 但在短时间序列的径流模拟方面表现较差[15]。Zahabiyoun 等人采用 SWAT 模型和全球气候模型(GCM)针对未来气候变化对伊朗主要河流 Gharesoou 的径流影响进行了研究, 研究表明, 随着温度的持续升高, 降雨量也将发生明显的变化, 进而引发了研究区内径流的相应改变[16]。国内对 SWAT 模型的研究起步相对较晚, 于二十世纪前后开始对 SWAT 模型进行研究和应用, 但发展速度较快、发展形式较好。目前 SWAT 模型在国内广泛应用于各大小流域的径流模拟研究, 在气候和土地利用水文循环响应[17]、非点源污染[18]、水质模拟[19]等方面进行了大量研究。目前运用 SWAT 模型在典型流域开展关于气候变化对径流影响的研究相对较少, 如祁雪姣等[20]、吴安琪等[21]、陈鑫[22]对长江源区、淮河以及海河流域进行了径流模拟。

沙河为海河流域子牙河水系滏阳河支流, 主要是邢台市行洪的主要河道, 担负起城市补水以及生态恢复功能的作用。但目前分析沙河流域气候变化对径流影响的研究成果十分稀少, 仅是在海河流域相关研究中作为一个子流域进行了分析, 研究成果远不能满足该流域水资源管理和开发利用需求。因此, 本文以沙河流域为研究区, 通过统计方法对沙河流域的降水、温度和径流演变趋势和特征进行分析, 建立了不同时期沙河流域 SWAT 水文模型, 在此基础上采用任意情景假设法模拟不同气候变化情景对径流的影响, 这将为该地区水资源的合理规划和配置提供重要的科学依据, 从而对流域的生态环境保护具有极其重要的意义。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域

沙河发源于河北省内丘县白鹿角川的山丘区地带, 沙河又名大沙河, 全长 166 km, 流域面积 2280 km², 其中在邢台境内全长 53 km, 流域面积 1804 km², 是邢台市境内流经距离最长、流域面积最大、流经县市最多、流量最大的河流。本文以邢台境内的沙河为研究对象, 研究流域面积为 1681.37 km²。该流域属于暖温带半湿润大陆性季风型气候, 季节交替明显, 年平均温度 12.8℃, 年平均降水量 571.4 mm, 降水量年际变化大, 而且年内分配极不均匀, 汛期(6~9 月)降水量约占全年的 75%以上。沙河流域地理位置如图 1 所示。

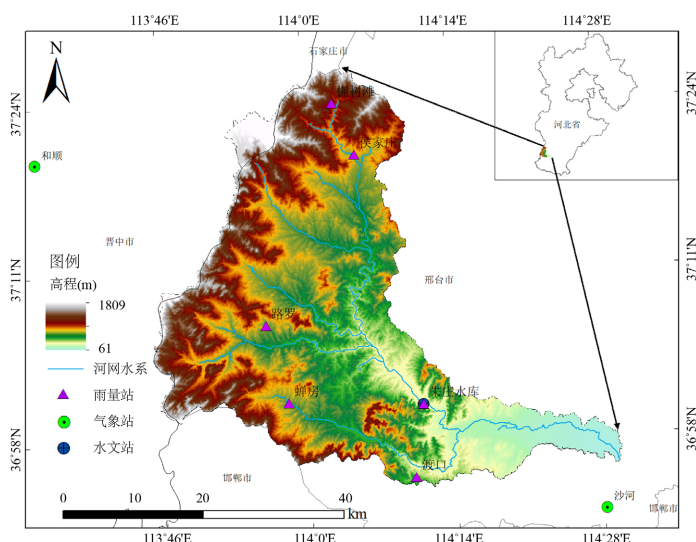


Figure 1. Geographical location of Shahe River Basin
图 1. 沙河流域地理位置

2.2. 数据准备

构建 SWAT 模型所需的基础数据如表 1 所示。主要包括数字高程 DEM 图、五期土地利用数据、土壤数据以及气象水文数据，其气象数据来源于 6 个雨量站(日降水量)和 2 个气象站(日平均风速、最高、最低温度、相对湿度和日照时数)；水文数据来源于朱庄水库水文站(逐月实测径流)。此外，运行 SWAT 模型之前，需要构建 DEM 数据库、土地利用数据库、土壤数据库以及气象数据库，并且对空间数据进行相同的投影坐标处理，选取统一 UTM 中 WGS_1984_UTM_Zone_49N 的投影坐标。

Table 1. Basic data sources of SWAT model

表 1. SWAT 模型基础数据来源

数据类型	分辨率	数据格式	数据年份	数据来源
数字高程图	30 m	GRID	2020	地理空间数据云
土地利用图	30 m	GRID	1980、1990、2000、2010 和 2020	中国科学院资源环境中心
土壤类型图	1 km	GRID	-	世界土壤数据库(HWSD)
气象数据	日	TXT	1960~2020	中国气象站
水文数据	月	TXT	1960~2020	水文年鉴

2.3. 研究方法

2.3.1. SWAT 模型

SWAT 模型是由美国农业部农业研究中心(USDA-ARS)开发的分布式水文模型，其能够模拟复杂流域内不同的土地利用类型、土壤类型和土地管理措施下的各水文要素的长期变化[9] [23] [24]。

利用数字高程 DEM 数据库、土地利用数据库、土壤数据库以及气象数据库，分别对五期土地利用情况进行构建沙河流域 SWAT 模型，划分为 30 个子流域。根据径流突变以及五期土地利用数据，将 1960~2020 年气象水文数据划分为 1960~1978 年、1979~1990 年、1991~2000 年、2001~2010 年、2011~2020 年五个时段，为了减小误差，都设置一年预热期。利用 SWAT-CUP 软件对朱庄水库水文站 1960~2020 年逐月实测径流数据对模型的参数进行率定和验证[25] [26]。

对模型参数进行率定和验证之前，首先对模型的参数进行参数敏感性分析，然后选用敏感性最高的参数。参考其他文献[27] [28]以及自己的理解综合分析，最终选取了 10 个对研究流域的径流有较大影响的水文参数并进行参数敏感性分析。选取 Nash-Sutcliffe 纳什效率系数(Ens)、相关系数(R^2)和相对误差(Re)这三个评价指标，对该模型在沙河流域的适用性进行分析，计算公式如下：

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_0^i - Q_m^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0^i - \bar{Q}_0)^2} \quad (2-1)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_0^i - \bar{Q}_0)(Q_m^i - \bar{Q}_m)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0^i - \bar{Q}_0)^2 \sum_{i=1}^n (Q_m^i - \bar{Q}_m)^2} \quad (2-2)$$

$$Re = \frac{Q_m - Q_0}{Q_m} \times 100\% \quad (2-3)$$

在月尺度模拟径流情况下，当率定期与验证期的数据要同时满足纳什效率系数(Ens)大于 0.5、相关系数(R^2)大于 0.6 和相对误差(Re)小于 25%时，说明满足模型精度要求，表明模型在研究流域具有适用性。

2.3.2. 统计分析方法

本文基于沙河流域长时间序列 1960~2020 年降水、温度和径流数据,采用滑动平均法[29]和线性回归检验法[30]研究气象水文要素年际趋势性变化,采用 Mann-Kendall 突变检验法[31]、累积距平法[32]研究气象水文要素年际突变时间。

2.3.3. 任意情景假设法

将基于未来可能的气候变化范围进行研究,这些范围包括温度增加或减少 1℃、2℃、3℃,以及降水增加或减少 10%、20%等情况。将通过数量化方法来分析单一气候要素对径流的影响,或者对不同气候要素进行不同的组合,以研究在这些不同组合情景下径流的影响过程。

根据 IPCC 第六次评估报告的结果[1],以 1980 年土地利用现状图和 1960~2020 年气象数据模拟的径流数据为基准期情景 S_0 ,设定了以下三种情景与基准期情景 S_0 的径流量相对比,分析在仅考虑单一气候变化因素以及综合降水和温度变化情景下沙河流域径流变化情况。

情景 S_{C1} :采用 1980 年土地利用数据,保持沙河流域 1960~2020 年降水不变,将各气象站逐日温度均升高 0℃、1℃、2℃、3℃和降低 1℃、2℃、3℃的 7 种方案。

情景 S_{C2} :采用 1980 年土地利用数据,保持沙河流域 1960~2020 年温度不变,将各雨量站逐日降水均增加 0%、10%、20%和减少 10%、20%℃的 5 种方案。

情景 S_{C3} :采用 1980 年土地利用数据,将各气象站逐日温度均升高 1℃、2℃、3℃和降低 1℃、2℃、3℃,各雨量站逐日降水均增加 10%、20%和减少 10%、20%℃,温度和降水两两综合组合情景下的 23 种方案。

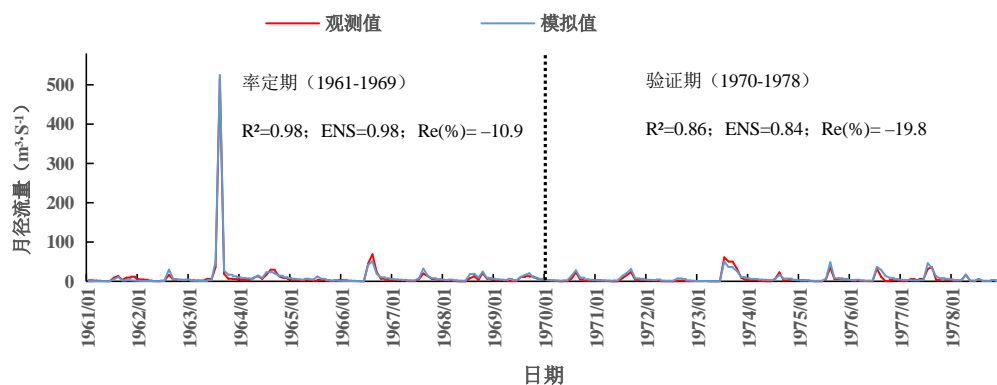
3. 结果与分析

3.1. 模型率定及验证

对朱庄水库水文站所在子流域出口的不同时段月实测径流量与模拟径流量进行对比来看(图 2),SWAT 模型模拟沙河流域的径流与实测径流拟合较好,率定期和验证期的相关系数(R^2)均在 0.6 以上,纳什效率系数(Ens)均在 0.5 以上,相对误差(Re)均在 $\pm 25\%$ 以内,均满足三个评价指标,表明了 SWAT 模型在沙河流域具有良好的适用性。

3.2. 沙河流域气候变化特征

对沙河流域 6 个雨量站:朱庄水库站、渡口站、蝉房站、路罗站、侯家庄站以及榭树滩站 1960~2020 年年降水量数据进行线性趋势分析,可以看出年降水量极大值出现在 1963 年,多年降水量最小值在朱庄



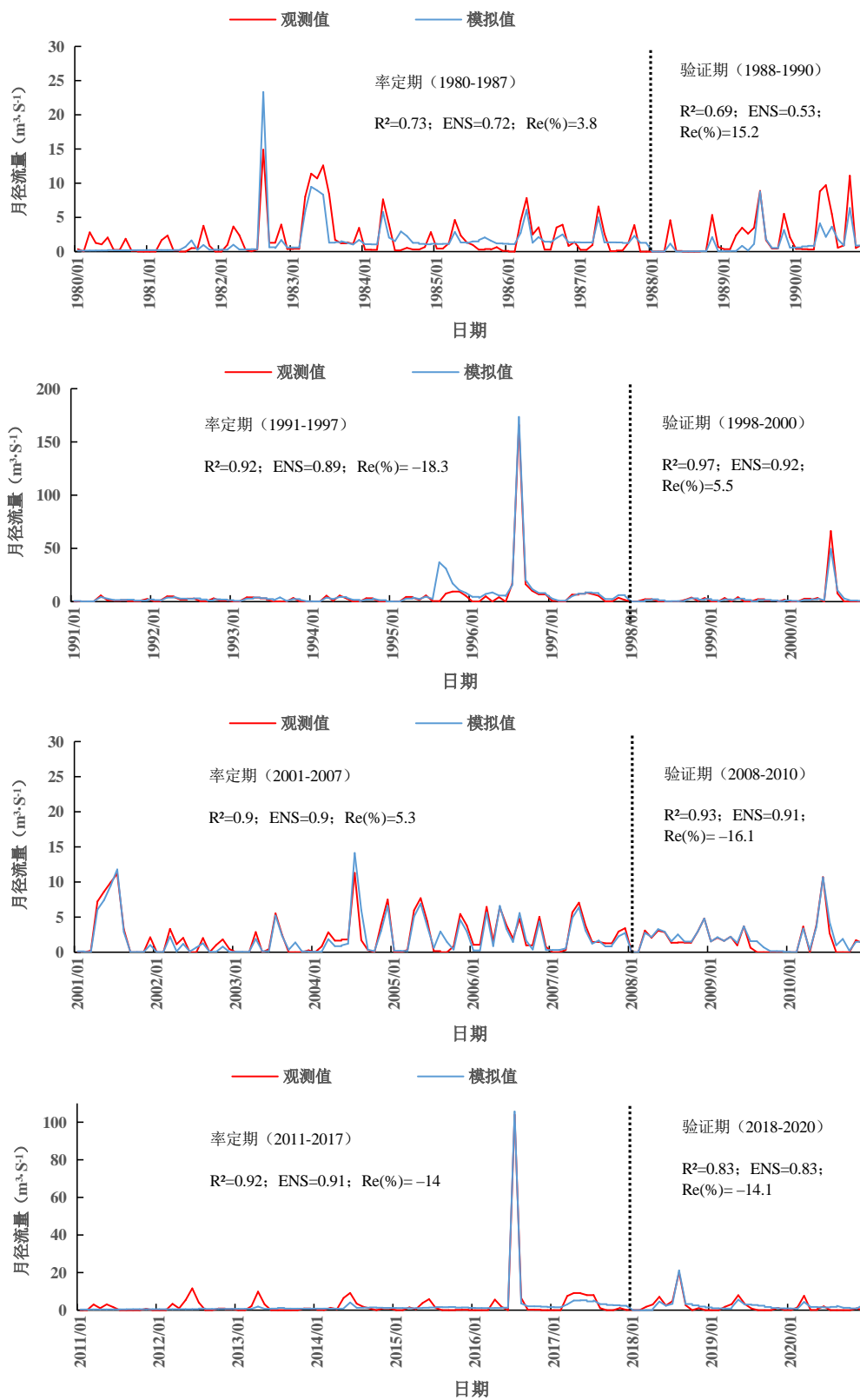
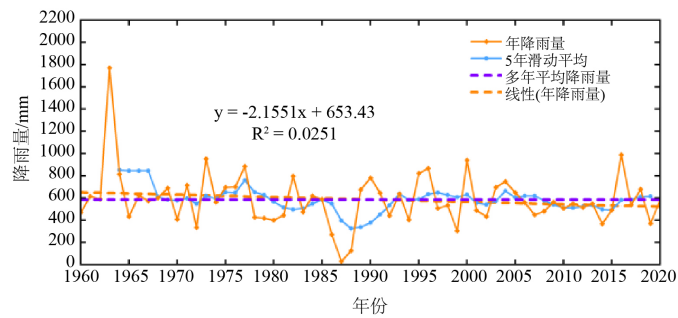
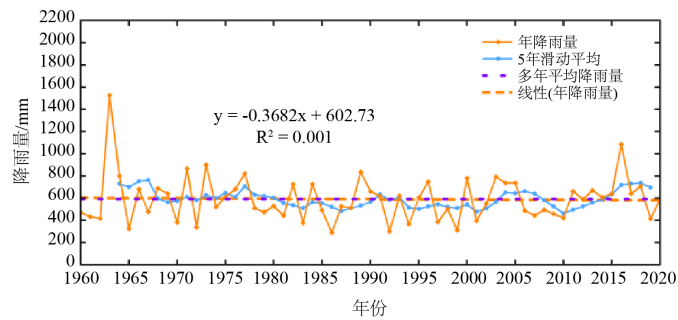


Figure 2. Measured and modelled monthly runoff values for five periods calibration and validation periods
图 2. 五个时段率定期和验证期月径流实测值和模拟值

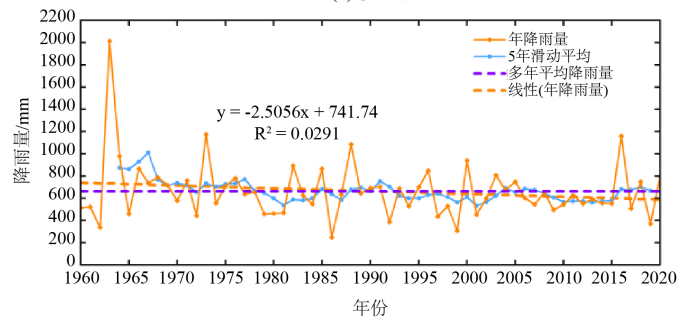
水库站的 1987 年的 29.6 mm。之后根据线性回归检验和 M-K 非参数检验法进行显著性程度可知, 六个雨量站线性倾向率整体呈现不显著减少, 说明降水在这 61 年里表现出不显著减少趋势, 除了柵树滩站倾向斜率呈现正向, 其他几个站都呈现负向, 倾向率不同, 表现的降低速率有所不同, 沙河流域降水量趋势变化特征见图 3(a)~图 3(f)。采用 M-K 突变检验和累积距平法对降水数据进行突变检测(图 4、图 5), 发现朱庄水库站、渡口站、蝉房站雨量站的降水时间序列突变年为 1978 年, 路罗站和侯家庄站突变年为 1974 年, 柵树滩站突变年为 1968 年。



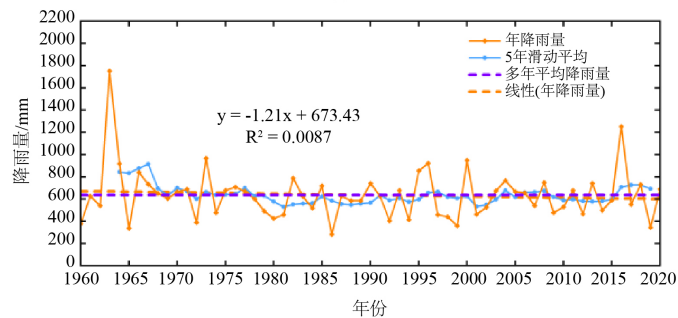
(a) 朱庄水库站



(b) 渡口站



(c) 禅房站



(d) 路罗站

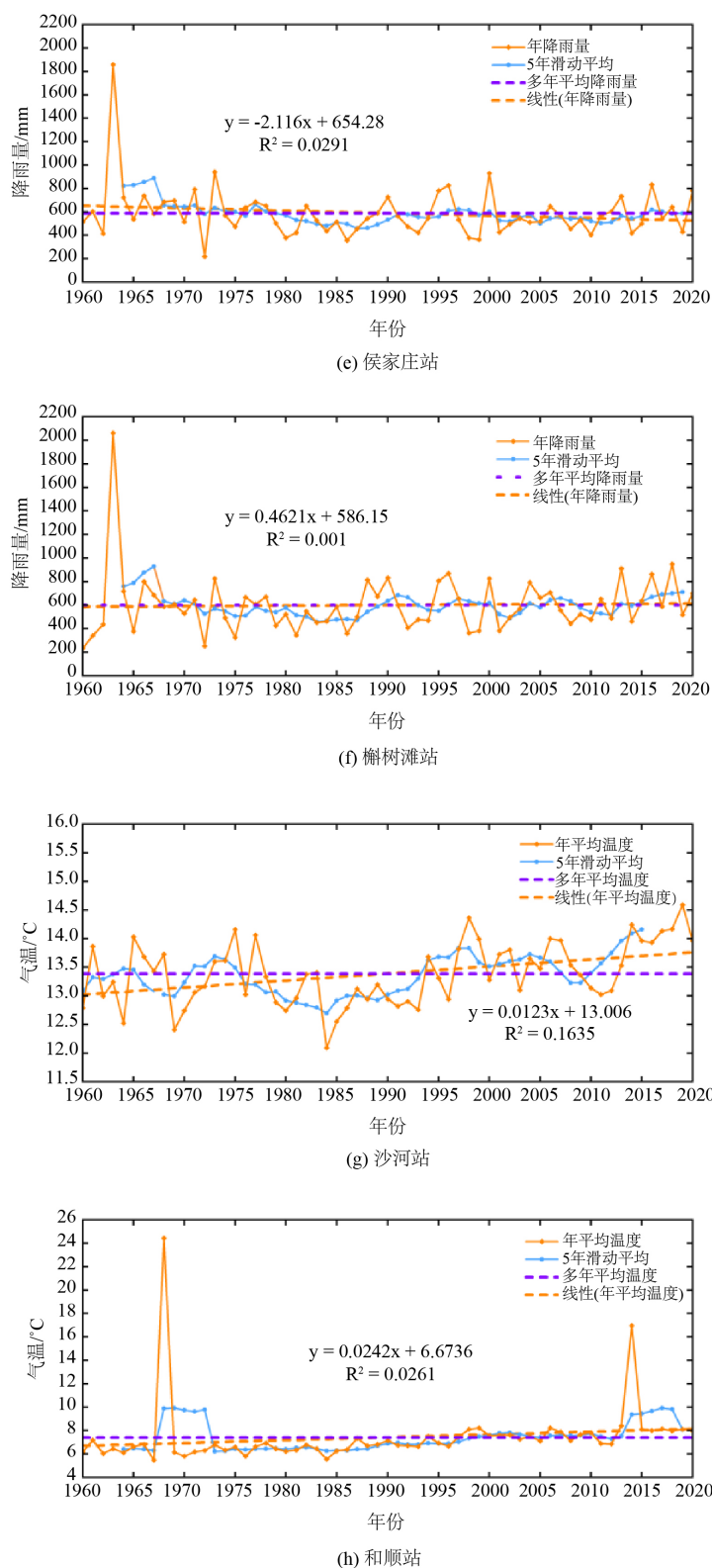
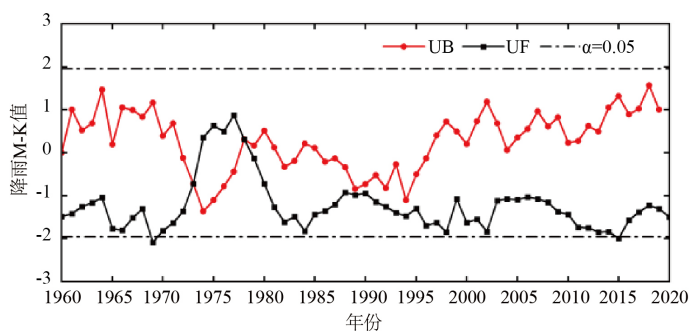


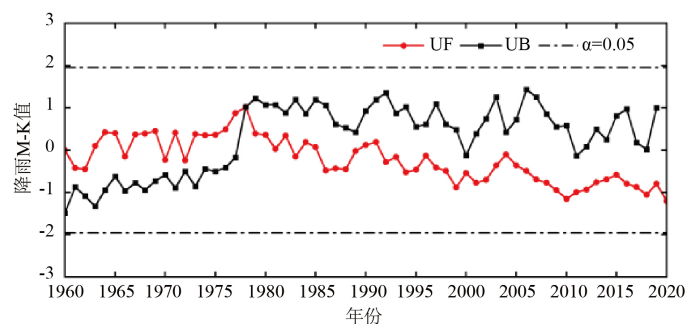
Figure 3. Interannual trend variation characteristic maps of precipitation and temperature at different stations in the Shahe River Basin

图 3. 沙河流域不同站降水、温度年际趋势变化特征图

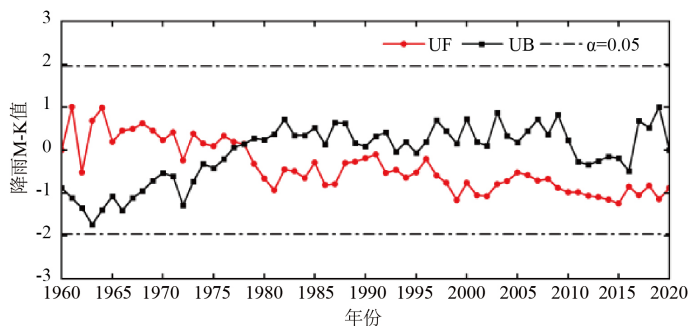
沙河、和顺气象站 1960~2020 平均温度趋势变化特征见图 3(g)、图 3(h), 不同气象站线性倾向率不同, 呈现出来的增加速率也有所不同, 沙河站温度以 $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率呈显著增加, 和顺站温度以 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率呈显著增加, 表明沙河流域 1960~2020 年总体气温呈现显著上升趋势, 这与全球气候变化趋势一致[33]。通过 M-K 突变检验和累积距平法对温度进行突变检测(图 4、图 5), 在 1997 年沙河、和顺气象站的平均气温时间序列发生突变。



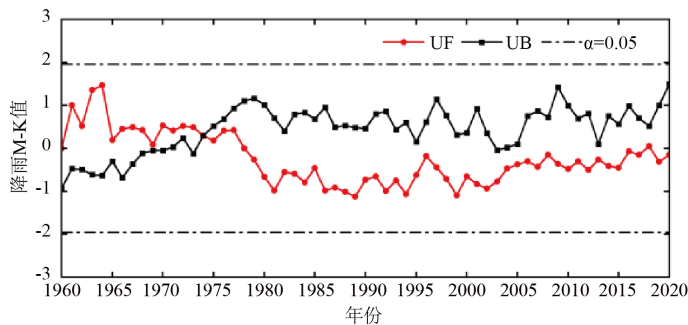
(a) 朱庄水库站



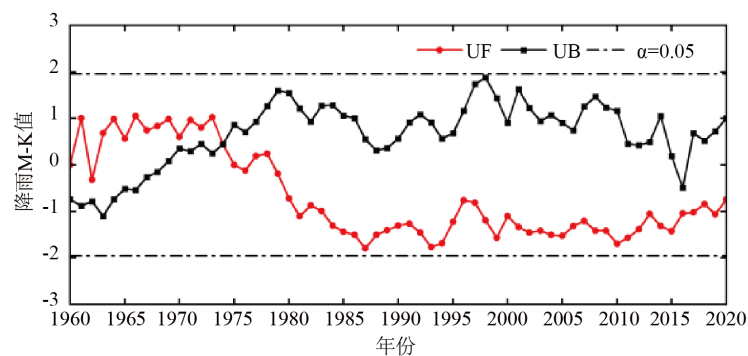
(b) 渡口站



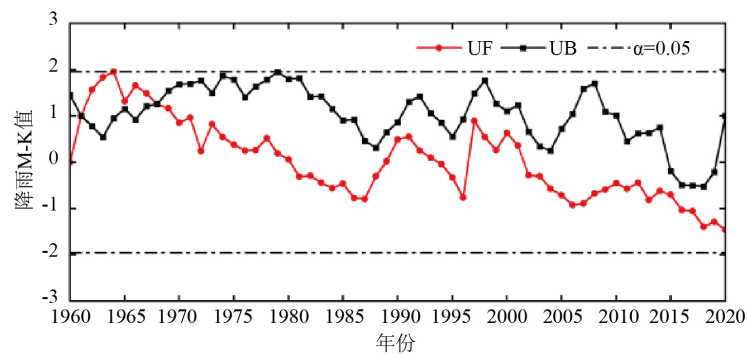
(c) 禅房站



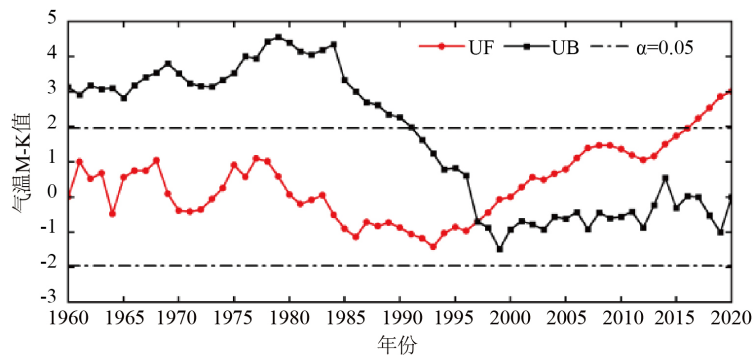
(d) 路罗站



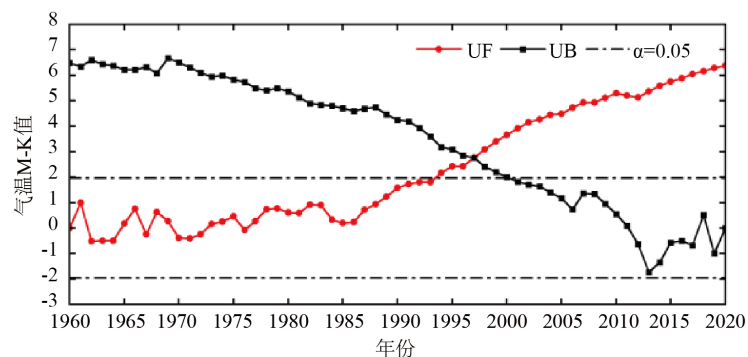
(c) 侯家庄站



(d) 榭树滩站



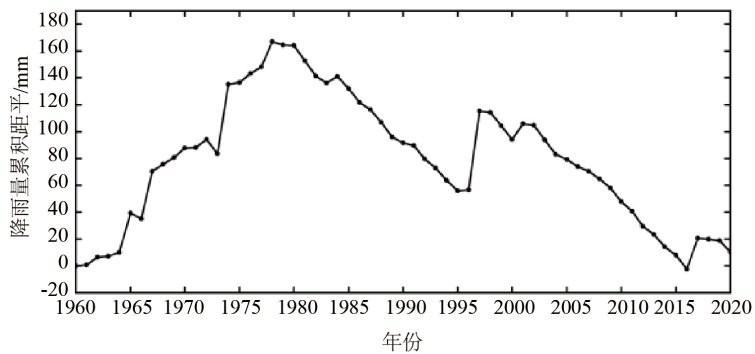
(g) 沙河站



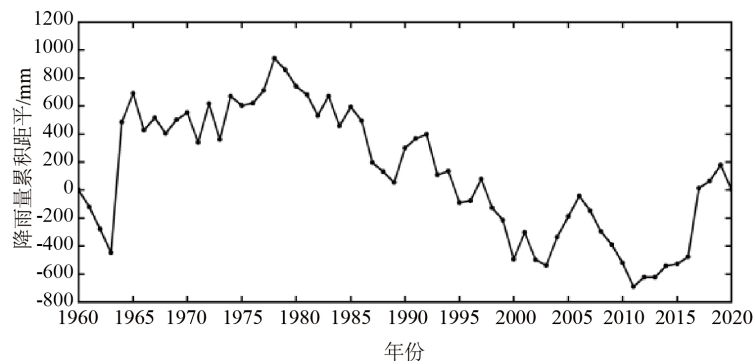
(h) 和顺站

Figure 4. M-K change point test of precipitation and temperature series at different stations in the Shahe River Basin

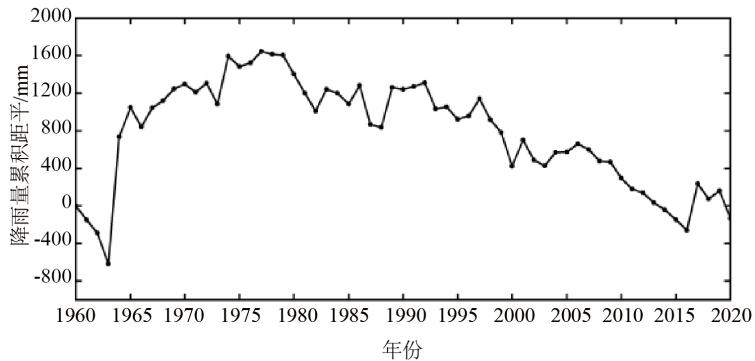
图 4. 沙河流域不同站点降水、温度序列 M-K 突变点检验



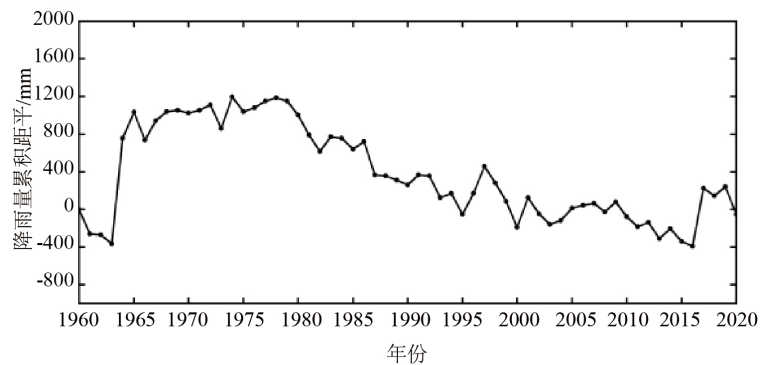
(a) 朱庄水库站



(b) 渡口站



(c) 禅房站



(d) 路罗站

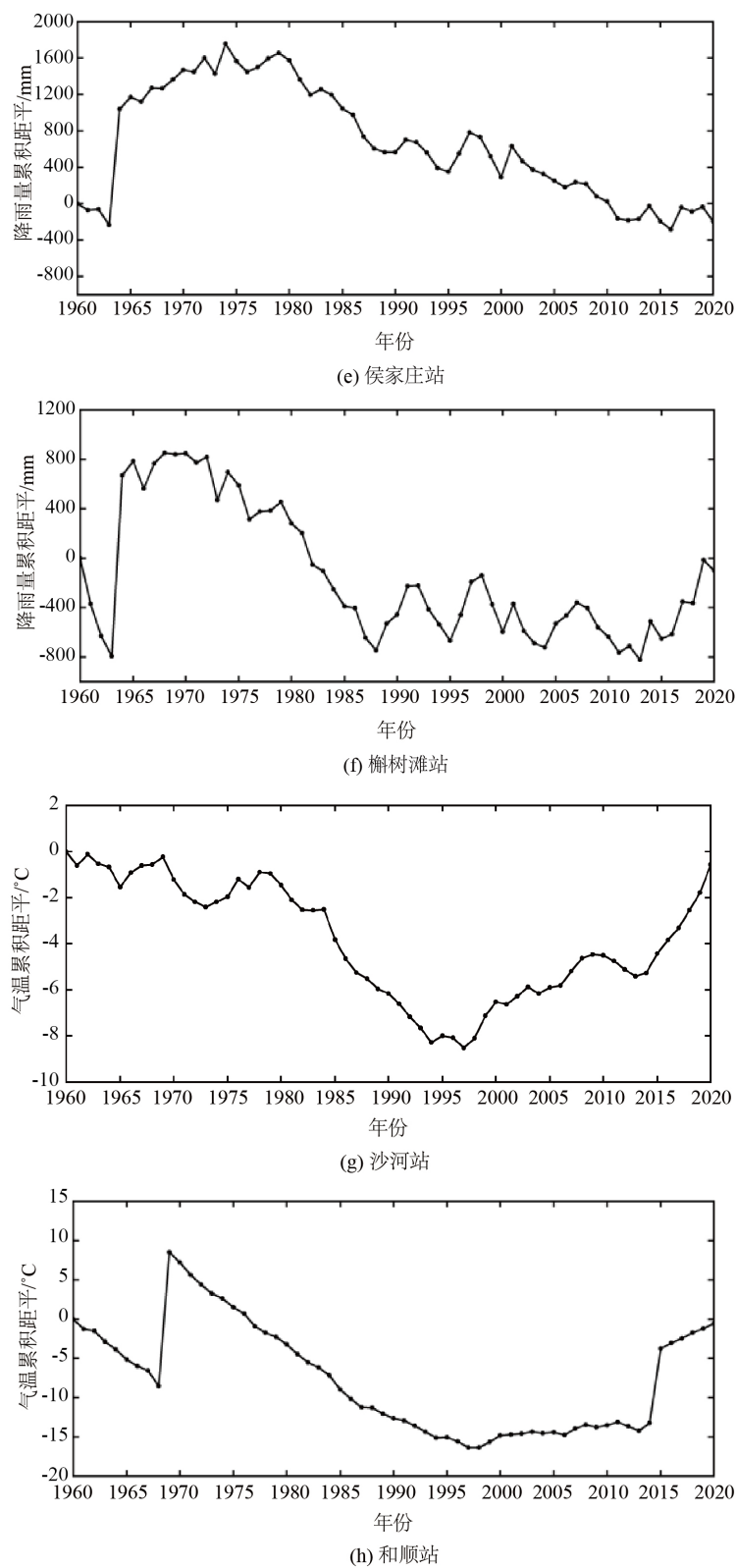


Figure 5. Cumulative anomalies of precipitation series at different stations in the Shahe River Basin

图 5. 沙河流域不同站点降水序列累积距平

3.2. 沙河流域径流变化特征

沙河流域在 1960~2020 年的年平均径流量为 17.32 亿 m^3 ，最大年径流量为 190.86 亿 m^3 ，出现的年份为 1963 年，最小年径流量为 2011 年，径流量为 2.99 亿 m^3 。朱庄水库水文站径流量趋势变化见图 6(a)，根据 M-K 非参数检验和线性回归检验(表 2)可知，沙河流域以 -5.0 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ 的速率呈显著减少，说明近 61 年沙河流域径流量呈现显著下降趋势。首先对朱庄水库水文站实测年径流序列进行 M-K 突变检验，结果如图 6(b)，UF 和 UB 两条曲线在 0.05 显著性临界值直线之间有一个交点，说明径流量突变点发生在 1978 年，为了进一步检验证明，采用了累积距平法来判断突变点(图 6(c))，由图可知，在 1978 年径流量累积距平值达到最高值之后，累积距平值的曲线开始呈现下降趋势，结合 M-K 突变检验和累积距平值的结果，表明 1978 年是朱庄水库水文站径流量时间序列发生的突变年份。当流域发生显著人类活动后，水文系列的自然过程会受到破坏，从而导致趋势性变化或跳跃性突变，故选择不受人类活动影响天然状态下 1960~1978 年为基准期，干扰期为 1979~2020 年。

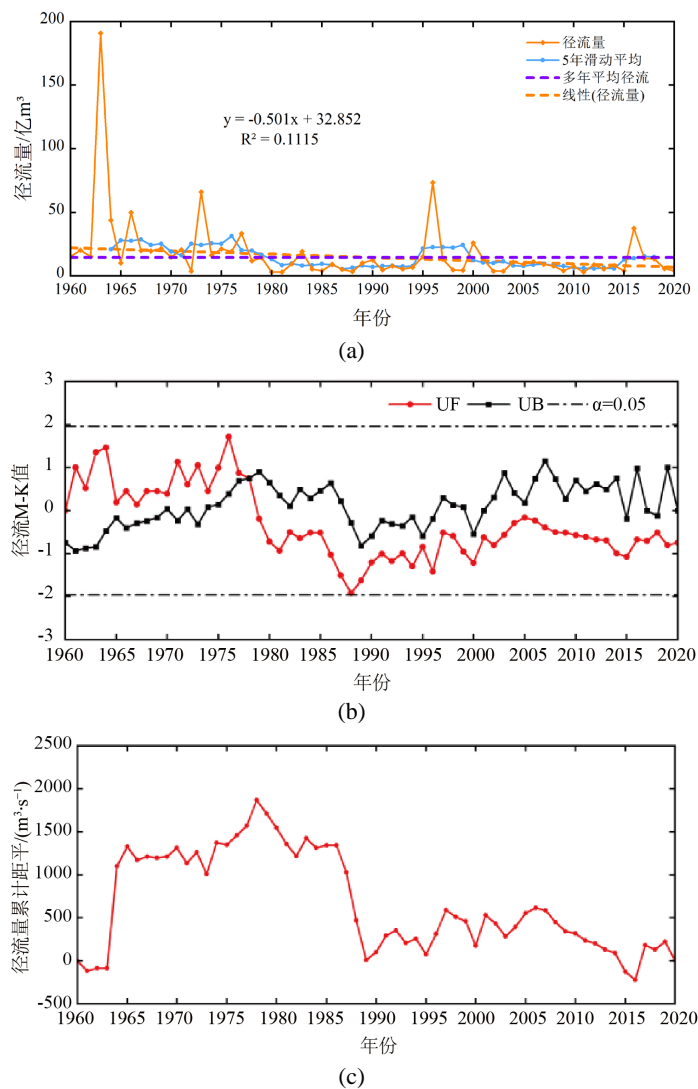


Figure 6. Runoff change trend, M-K mutation test, and cumulative anomaly value in the Shahe River Basin

图 6. 沙河流域径流量变化趋势、M-K 突变检验、累积距平值

Table 2. System result data of standard experiment
表 2. 标准试验系统结果数据

气象水文	站点	倾向率 (mm/10a 或 °C/10a 或亿)	变化趋势	线性回归		Mann-Kendall		显著性
				检验值 T	$T_{(0.05/2)}$	统计量 Zc	$Z_{C(0.05)}$	
降水	朱庄水库站	-21.6	下降	1.23	1.64	0.752	1.96	不显著
	渡口站	-3.7	下降	0.24	1.64	0.285	1.96	不显著
	蝉房站	-25.1	下降	1.33	1.64	0.888	1.96	不显著
	路罗站	-12.1	下降	0.72	1.64	0.148	1.96	不显著
	侯家庄站	-21.2	下降	1.33	1.64	0.752	1.96	不显著
	榭树滩站	4.6	上升	0.25	1.64	1.458	1.96	不显著
温度	沙河站	0.1	上升	3.08	1.64	3.007	1.96	显著
	和顺站	0.2	上升	8.35	1.64	6.389	1.96	显著
径流	朱庄水库水文站	-5.0	下降	2.58	1.64	3.496	1.96	显著

3.4. 沙河流域气候情景设计结果分析

为了进一步研究流域径流对气候变化的响应, 设定了 35 种的降水和温度两个主要因素不同的气候变化情景, 气候变化中的降水和温度的数据来源于雨量站和气象站来进行情景设计, 采用率定好的 SWAT 水文模型, 并假设保持土地利用不变的条件下, 分析不同气候变化情景对径流的影响。本文采用 1980 年土地利用类型图, 根据 1960~1978 年已率定好的 SWAT 模型, 模拟 1960~2020 年天然径流, 并与不同气候变化情景组合依次输入已率定 SWAT 水文模型模拟径流进行对比分析, 结果见表 3。

Table 3. Change rate of runoff under different climate change scenarios in the Shahe River Basin
表 3. 沙河流域不同气候变化情景下径流变化率

温度变化(°C)	降水变化(%)				
	-20%	-10%	0%	10%	20%
-3	-28.64	-5.99	26.73	58.71	89.90
-2	-36.64	-9.83	17.28	48.77	79.64
-1	-43.86	-18.34	7.97	38.77	69.29
0	-49.56	-25.42	-	30.14	60.22
1	-53.68	-30.90	-6.33	23.03	52.61
2	-56.92	-35.56	-12.14	16.21	44.96
3	-59.86	-39.80	-17.53	9.70	37.68

1) 温度对径流的影响

由图 7 的情景 S_{C1} 模拟结果可知, 从趋势方面进行分析, 当降水保持不变时, 随着温度从 1°C、2°C、3°C 增加, 模拟径流逐渐呈现减少趋势, 模拟径流的减少率为 -6.33%、-12.14%、-17.53; 当温度从 -1°C、-2°C、-3°C 逐渐降低, 模拟径流逐渐呈增加趋势, 模拟径流的增加率为 7.97%、17.28%、26.73%。影响结果可以看出, 径流随着温度减少而增加, 表明温度与径流呈负相关关系, 与第三章数理统计分析温度趋势一致。当温度减少和温度增加的幅度相同时, 发现温度减少对径流的影响程度较大, 而且随着温度

的降低，径流的增加比例也随之增大，可见温度下降对径流影响的敏感程度高于温度上升的敏感程度。总体可以看出，当降水不变时，温度对径流整体的影响程度不大。

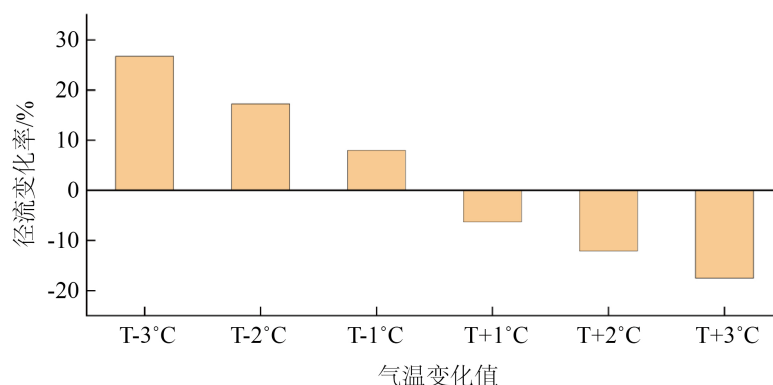


Figure 7. Relative change rate of runoff under temperature change scenarios
图 7. 温度变化情景下径流相对变化率

2) 降水对径流的影响

由图 8 的情景 S_{C2} 模拟结果可知，从趋势方面进行分析，当温度保持不变时，随着降水从-10%、-20%减少，模拟径流逐渐呈现减少趋势，模拟径流的减少率为-25.42%、-49.56%；当降水从 10%、20% 逐渐增加，模拟径流逐渐呈增加趋势，模拟径流的增加率为 30.14%、60.22%。影响结果可以看出，径流随着降水增加而增加，表明降水与径流呈正相关关系，与第三章数理统计分析降水趋势一致。当降水减少和降水增加的幅度相等时，观察到降水增加对径流的影响程度较大，而且随着降水量的增加，径流的增加比例也相应增大，观察表明，对于径流影响，降水增加的敏感程度高于降水减少。总体而言，径流对降水变化的响应相对于温度变化的响应更加敏感，当温度变化在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 范围内时，径流的变化率比较小，仅在 26.73% 以内。然而，当降水发生 $\pm 20\%$ 的变化时，径流的变化率可以达到 60.22% 以内。这表明，降水对于径流的影响更大，并且径流对降水的变化更加敏感。

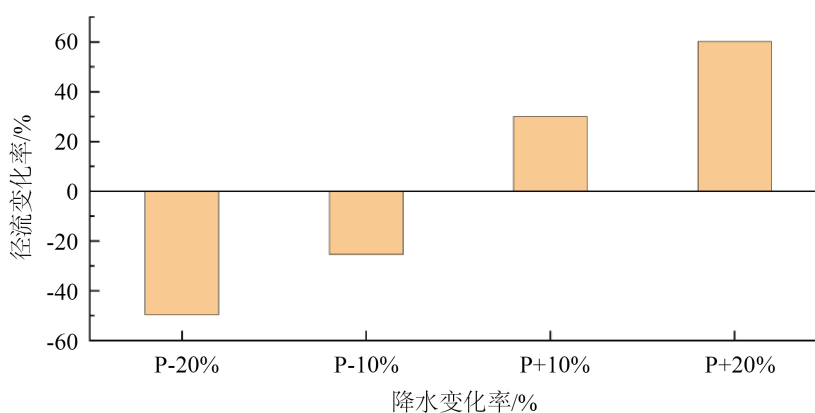


Figure 8. Relative change rate of runoff under precipitation change scenarios
图 8. 降水变化情景下径流相对变化率

3) 温度和降水变化组合对径流的影响

由图 9 的情景 S_{C3} 模拟结果可知，当降水和温度同时变化情景下，当降水减少 20% 时，温度从 1°C 、

2℃、3℃逐渐增加,模拟径流的减少率为-53.68%、-56.92%、-59.86%。从趋势方面进行分析,模拟径流呈减少趋势,当降水减少20%时,温度从-1℃、-2℃、-3℃逐渐降低,模拟径流的减少率为-43.86%、-36.64%、-28.64%,温度降低和降水减少对径流起相互抑制作用,模拟径流逐渐呈现减少趋势,进一步说明降水相对温度对径流的影响程度大。当降水减少20%时,温度增加比温度减少对径流的影响程度大,可见温度增加对径流影响的敏感程度高于温度减少的敏感程度。当降水减少10%时,与降水减少20%趋势基本一致,可见温度增加对径流影响的敏感程度高于温度减少的敏感程度。当降水增加20%时,温度从1℃、2℃、3℃逐渐增加,模拟径流的增加率为52.61%、44.96%、37.68%,可以看出,温度增加和降水增加对径流起相互抑制作用,模拟径流逐渐呈现增加趋势,当降水增加20%时,温度从-1℃、-2℃、-3℃逐渐减少,模拟径流的增加率为69.29%、79.64%、89.90%,模拟径流呈增加趋势。进一步说明降水相对温度对径流的影响程度大。当降水增加20%时,径流随着温度减少而增加,温度减少比温度增加对径流的影响程度大,可见温度减少对径流影响的敏感程度高于温度增加的敏感程度。降水增加10%与降水增加20%趋势基本一致,可见温度降低对径流影响的敏感程度高于温度增加的敏感程度。表明降水是导致径流变化的直接因素,而温度是导致径流变化的次要因素。

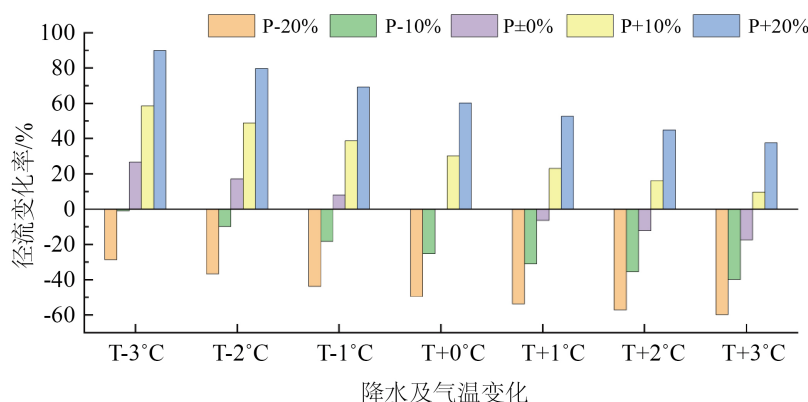


Figure 9. Relative change rate of runoff under combined temperature and precipitation change scenarios

图9. 温度和降水组合变化情景下径流相对变化率

4. 结论

文章基于1960~2020年沙河流域的气象水文数据,采用数理统计方法分析了降水、温度和径流的变化规律,并建立了多时段沙河流域SWAT模型,分析了不同气候情景设置下径流变化,得到以下结论:

1) 沙河流域1960~2020年温度呈现显著上升趋势,径流呈显著减少趋势,降水整体呈不显著下降趋势,仅有榭树滩站降水量呈不显著上升趋势。

2) 构建了不同土地利用情景下沙河流域SWAT模型,对不同时段10个较敏感参数进行了率定和验证,相关系数(R^2)、纳什效率系数(Ens)以及相对误差(Re)均满足评价指标要求,表明所构建的SWAT模型适用于沙河流域。

3) 模拟了三种气候变化情景对径流的影响,表明沙河流域径流与降水呈正相关,径流对降水变化的敏感程度高于径流对温度变化的敏感程度。

本文考虑到不同时期下垫面的水文物理特性有所不同,前期的下垫面参数无法充分反映后期的水文物理特性。因此,为了更好地了解径流的变化,对径流突变前和突变后进行多时段调参,建立了基于多时段参数的SWAT模型,多时段参数的水文模型能够显著提升模拟精度,具有良好的效果,与前人采用

两三期土地利用数据相比较, 本文采用每十年五期土地利用数据构建模型, 使模拟结果更加精确, 能更好地模拟沙河流域径流过程。

参考文献

- [1] Legg, S. (2021) IPCC, 2021: Climate Change 2021—The Physical Science Basis. *Interaction*, **49**, 44-45.
- [2] 李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学, 2013, 33(4): 457-464.
- [3] Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., et al. (1998) Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **34**, 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- [4] Arnell, N.W. (1999) Climate Change and Global Water Resources. *Global Environmental Change*, **9**, S31-S49. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(99\)00017-5](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(99)00017-5)
- [5] 夏军, 刘春蓁, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 1-12.
- [6] Beniston, M. (2006) *Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*. Springer Science & Business Media, Berlin.
- [7] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883.
- [8] Lai, G., Wu, D., Zhong, Y., et al. (2012) Progress in Development and Applications of SWAT Model. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, **40**, 243-251.
- [9] Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., et al. (2007) Modelling Hydrology and Water Quality in the Pre-Alpine/Alpine Thur Watershed Using SWAT. *Journal of Hydrology*, **333**, 413-430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>
- [10] Georgakakos, A., Yao, H., Kistenmacher, M., et al. (2012) Value of Adaptive Water Resources Management in Northern California under Climatic Variability and Change: Reservoir Management. *Journal of Hydrology*, **412**, 34-46. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.038>
- [11] Christian, R.J., Storm, B. and Clausen, T. (2010) Système Hydrologique Européen (SHE): Review and Perspectives after 30 Years Development in Distributed Physically-Based Hydrological Modelling. *Hydrology Research*, **41**, 355-377. <https://doi.org/10.2166/nh.2010.009>
- [12] Golmohammadi, G., Prasher, S., Madani, A., et al. (2014) Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology*, **1**, 20-39. <https://doi.org/10.3390/hydrology1010020>
- [13] 尹振良, 肖洪浪, 邹松兵, 等. 祁连山黑河干流山区水文模拟研究进展[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 438-446.
- [14] White, E.D., Easton, Z.M., Fuka, D.R., et al. (2011) Development and Application of a Physically Based Landscape Water Balance in the SWAT Model. *Hydrological Processes*, **25**, 915-925. <https://doi.org/10.1002/hyp.7876>
- [15] Srinivasan, R., Arnold, J. and Jones, C. (1998) Hydrologic Modelling of the United States with the Soil and Water Assessment Tool. *International Journal of Water Resources Development*, **14**, 315-325. <https://doi.org/10.1080/07900629849231>
- [16] Zahabiyoun, B., Goodarz, M., Bavani, A.M., et al. (2013) Assessment of Climate Change Impact on the Ghareosu River Basin Using SWAT Hydrological Model. *CLEAN—Soil, Air, Water*, **41**, 601-609. <https://doi.org/10.1002/clen.201100652>
- [17] 刘晋, 李致家. 黄河河源区分布式水文模拟研究[J]. 人民黄河, 2007, 29(9): 30-32.
- [18] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. SWAT 模型研究应用进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 31-35.
- [19] 李道峰, 田英, 刘昌明. 黄河河源区变化环境下分布式水文模拟[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 565-573.
- [20] 祁雪姣, 杨颖, 韩传楠, 等. 气候变化对长江源区地表径流的影响[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2022, 45(4): 81-90.
- [21] 吴安琪, 石朋, 陆美霞, 等. 气候变化对淮河流域径流及洪峰流量的影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(1): 13-17.
- [22] 陈鑫. 基于 SWAT 模型的海河典型流域径流变化归因分析[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [23] Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., et al. (2011) *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute, College Station.
- [24] 安晨, 方海燕. 基于 SWAT 模型的妫水河流域径流空间分布特征[J]. 水文, 2021, 41(4): 81-87+47.
- [25] 曹灿, 孙瑞, 吴志祥, 等. 基于 SWAT 模型的南渡江上游流域径流对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 255-264.

-
- [26] 寇丽敏, 刘建卫, 张慧哲, 等. 基于 SWAT 模型的洮儿河流域气候变化的水文响应[J]. 水电能源科学, 2016, 34(2): 12-16.
- [27] Chang, J., Wang, Y., Istanbuloglu, E., *et al.* (2015) Impact of Climate Change and Human Activities on Runoff in the Weihe River Basin, China. *Quaternary International*, **380**, 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.03.048>
- [28] Zuo, D., Xu, Z., Peng, D., *et al.* (2015) Simulating Spatiotemporal Variability of Blue and Green Water Resources Availability with Uncertainty Analysis. *Hydrological Processes*, **29**, 1942-1955. <https://doi.org/10.1002/hyp.10307>
- [29] 王维, 鞠琴, 王乐扬, 等. 渭河上游流域径流对土地利用变化的时空响应[J]. 水力发电, 2021, 47(9): 41-45+93.
- [30] 陈明康. 大理河流域多尺度径流变化归因分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [31] 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.
- [32] 田小靖, 赵广举, 穆兴民, 等. 水文序列突变点识别方法比较研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 33-40.
- [33] Ye, P.L., Wang, Y., Xu, L.L., Han, L.J. and Li, R. (2021) Climate Change in the Upper Yellow River Basin and Its Impact on Ecological Vegetation and Runoff from 1980 to 2018. *Transactions of Atmospheric Sciences*, **43**, 967-979.