

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210366

基于格尔木河流域的SWAT模型水文特征 情景模拟研究

邵理想¹, 饶文波¹, 檀涛¹, 谭红兵¹, 姜三元², 张西营³

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008;

3. 中国科学院盐湖研究所, 青海 西宁 810008)

摘要:以2008—2016年格尔木河流域实测径流量数据为基础,构建SWAT分布式水文模型,采用SUFI-2算法进行参数率定、验证及不确定性分析,并设置不同的气候情景(RCP2.6、RCP4.5和RCP6.0),预测流域2022—2050年的径流变化趋势,分析了研究区未来降水、气温的变化趋势并探究了这些气候要素对格尔木河流域径流的影响。结果表明:(1)SWAT模型在格尔木河流域径流过程的模拟中具有较好的适用性,率定期 R^2 和 E_{NS} 分别为0.84和0.73,验证期 R^2 和 E_{NS} 分别为0.74和0.70;(2)径流预测不确定性较小;(3)未来流域降水呈现增加趋势而气温降低;(4)未来时段流域径流增加显著,且降水是控制流域径流的主要因素。

关键词:SWAT模型;高寒干旱区;格尔木河流域;气候变化;径流模拟预测

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2023)02-0046-06

0 引言

以我国西北干旱-半干旱区为代表的区域生态环境、可持续发展等面临严峻挑战,解析其径流演变过程与径流预测已成为水文水资源研究领域的焦点^[1]。

SWAT模型已被广泛应用于全球不同流域的水资源评价(包括水循环模拟和径流预测)中^[2-3],在模拟与评估不同条件下(气候要素、土地利用等)流域径流过程、变化趋势及其影响因素等方面有很大的潜力^[4-6]。如Romanowicz等^[5]利用SWAT模型研究了比利时Thyle流域的降雨径流过程,Chen等^[6]采用SWAT模型模拟了金沙江流域气候变化和土地利用/土地覆盖变化对径流的影响。近年来,该模型在中国干旱-半干旱区流域中的应用得到了一定的发展^[7-9],而有关格尔木河

流域径流模拟和未来径流预测研究较少。因此,本文建立格尔木河流域SWAT模型,并预测2022—2050年不同气候情景下流域径流量变化趋势,并评估其影响因素,旨在为当地缓解水资源供需矛盾问题和制定水资源管理规划提供参考依据。

1 研究区域

格尔木河流域属典型高原内陆盆地气候,地形总体为南高北低(高程在2 700~3 000 m之间)(见图1),高寒干旱,多风少雨,日照时间长,昼夜温差大,多年平均气温4.79℃,多年平均降水量42.42 mm/a,年内降水量分布不均,多集中在6—8月^[10]。格尔木河由西支昆仑河、东支雪水河汇合形成,流经格尔木市区,注入达布逊湖,干流总长378.5 km,落差2 882 m,多年平均径流量为 $5.640 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ^[11]。

收稿日期:2021-09-12

网络首发日期:2022-05-27

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.P.20220526.1618.001.html>

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0406601);江苏省自然科学基金面上项目(BK20191304)

作者简介:邵理想(1996—),男,安徽阜阳人,在读研究生,主要研究方向为水文及水资源。E-mail:2805377003@qq.com

通信作者:饶文波(1973—),男,湖南祁阳人,博士,教授,主要研究方向为同位素水文与环境地质学。E-mail:raowenbo@163.com

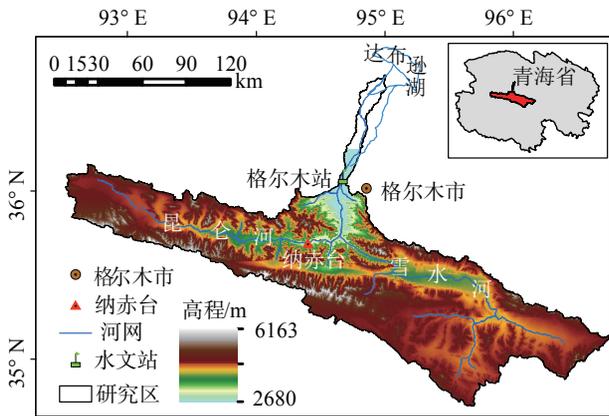


图1 格尔木河流域示意图
Fig.1 Schematic diagram of the Golmud River basin

2 数据和方法

2.1 数据来源及用途

格尔木河流域SWAT模型所需数据类型见表1。其中,气象数据为流域2008—2016年的降水、温度等。未来气候情景数据为RCP2.6、RCP4.5和RCP6.0排放情境下流域2022—2050年逐月气象数据。水文数据为2008—2016年格尔木水文站径流观测数据(2008年4月至2012年1月作为模型率定期,2013年1月至2016年12月作为模型验证期)。

表1 模型数据来源

Table1 Model data sources

数据类型	分辨率	数据来源	数据用途
数字高程DEM	90 m	地理空间数据云	生成河网、流域
土地利用	1 000 m	中科院数据中心	生成HRU
土壤类型	1 000 m	HWSD全球土壤数据库	构建土壤数据库
气象数据	日值	CMADS数据集	构建属性数据库
水文数据	月值	格尔木水文站	径流率定及验证
未来气候情景数据	月值	国家青藏高原科学数据中心	径流模拟预测

2.2 模型评价指标

2.2.1 参数率定与验证评价指标

采用Nash-Suttcliffe效率系数 E_{NS} 、决定系数 R^2 两个指标评价模拟的效果^[12-13]。研究表明^[12-13]: $E_{NS} > 0.50$ 且 $R^2 > 0.6$,则模型模拟结果合格,其值越接近于1,则拟合效果越好。

2.2.2 不确定性评价指标

采用SUFI-2算法的2.5%~97.5%区间作为95%置信区间(95PPU),以 P -factor、 R -factor两个指标衡量参数的不确定性。理论上, P -factor的区间为0~

100%、 R -factor的区间为0~ ∞ 。当 P -factor接近1, R -factor接近0时,完全接近观测数据^[14]。

3 模型适用性分析

由图2可知,验证期的径流模拟比率定期径流模拟的不确定性小,可得出SWAT模型适用于格尔木河流域的径流模拟。

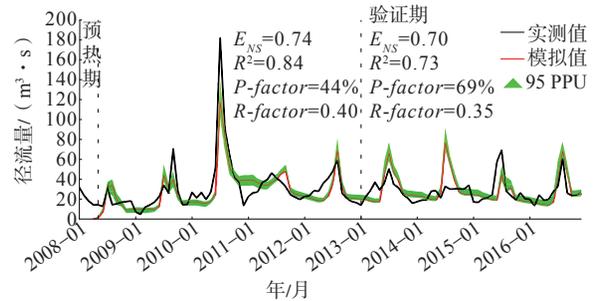


图2 模型率定、验证结果及不确定性分析
Fig.2 Model calibration, verification results and uncertainty analysis

4 未来气候变化对流域径流的影响

4.1 未来降水、气温变化趋势分析

利用RCP气候情景数据(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0),将1970—2018年作为基准期,分析了流域2022—2050年的降水、最高气温和最低气温变化趋势。

由图3可知,相对于基准期,三种气候情景下流域降水量均有增大的趋势。由多年平均降水量对比来看,RCP2.6、RCP4.5和RCP6.0情景下降水量较基准期分别增加了24.4%、52.0%和47.3%。但是,RCP2.6、RCP4.5和RCP6.0情景下,2022—2050年期间降水量随时间整体呈略微下降的趋势,年变化率分别为-0.415 mm/a、-1.052 mm/a和-0.422 mm/a。

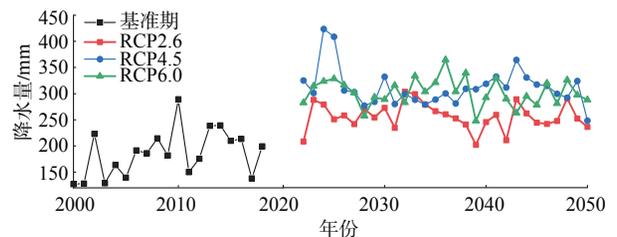


图3 流域未来气候情景下(2022—2050年)降水量变化趋势
Fig.3 Changes in precipitation in the basin under future climate scenarios (2022—2050)

为分析不同气候情景下降水年内变化规律,将研究时段每年分为四个季节(3—5月为春季、6—8月为夏季、9—11月为秋季、12月—次年2月为冬季),计算了各季节多年平均降水量(见图4(a))。相较于基准期,3种气候情景下流域各季节降水量增加显著。相

对于基准期,春季RCP4.5和RCP6.0情景下降水增加量相近,RCP2.6情景下降水增加量最小。其余三个季节降水量大小为RCP4.5>RCP6.0>RCP2.6>基准期,与春季稍有不同。各气候情景下夏季降水量最大(接近春季的2倍),冬季最小。

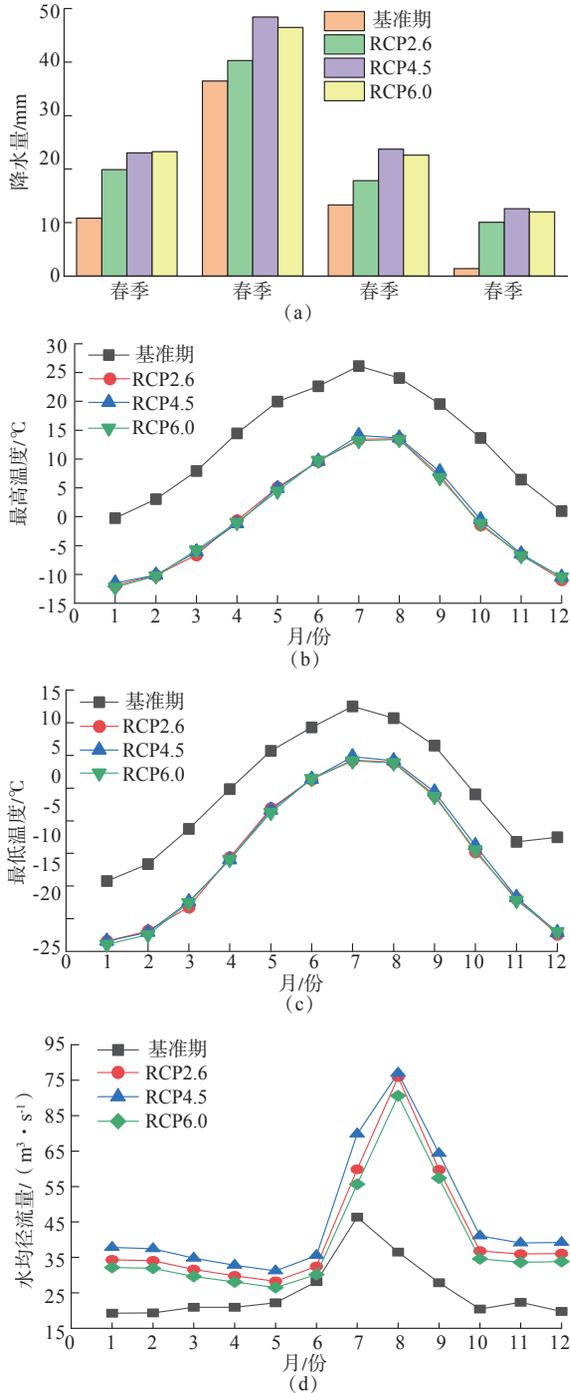


图4 基准期与RCP情景下流域各季节平均降水量、月均最高气温和最低气温、月均径流量分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of average precipitation, monthly average maximum and minimum temperature, and monthly average runoff in the basin under the base period and RCP scenarios

由图5(a~b)可知,在未来30年3种气候情景下流域最高气温和最低气温均呈波动式上升,RCP6.0情景下最高气温和最低气温年增加率最大,RCP2.6情景下最高气温、最低气温上升率最小。由图4(b~c)可知,3种气候情景下流域月均最高气温、最低气温都较基准期降低,气温分布特征与基准期相似。月均最高气温和最低气温在不同气候情景之间无显著差异。

结合图3与图5分析,与基准期相比,2022—2050年降水量增加,而气温则下降,表现出降水与气温的相反变化。陈阳等^[15]研究发现青海地区降水与三类气温(最低温度、平均温度、最高温度)相关性较弱。Wang等^[16]研究表明21世纪以后全国大范围降水以增加为主,气温则呈下降趋势,这与本文的结果一致。然而,在未来时段,流域气温下降显著,可能原因之一是未来气候情景模型的不确定性所导致,此问题尚需后续研究。同时,即使3种气候情景下气温都较基准期低,但随着全球温室气体排放量增多,温度逐渐回升。温度的升高将导致格尔木河上游昆仑山冰川、积雪的加速消融,从而影响格尔木河流域的径流机制。

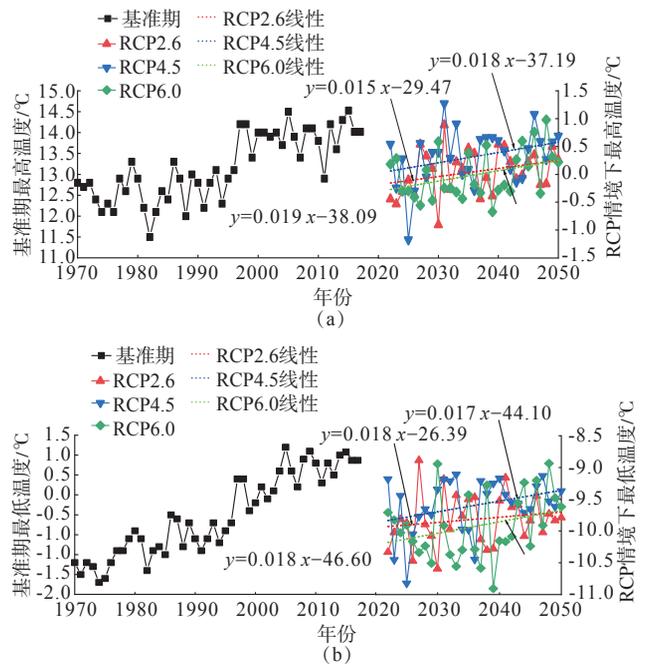


图5 基准期与不同气候情景下流域最高气温与最低气温变化特征
Fig.5 Variation characteristics of maximum and minimum temperature in the basin under different climate scenarios during the base period and the future

4.2 未来径流的模拟预测

利用率定的SWAT模型及全球气候模式数据,对流域未来时段径流变化趋势进行模拟预测。结果表

明:3种气候情景下流域2022—2050年径流总体均呈上升趋势(见图6),变化幅度相对较大,径流量较基准期分别增加了1.67倍、1.81倍和1.56倍,年均径流量分别为13.27亿m³/a(RCP2.6)、14.46亿m³/a(RCP4.5)和12.46亿m³/a(RCP6.0)。不同气候情景之间径流也有一定的差异。RCP2.6情景下年径流量增长趋势微小,增长率约为0.026亿m³/a,RCP4.5情景下年径流量变化最明显,年径流量增长率约为0.2亿m³/a,RCP6.0情景年径流量增长趋势介于两者之间,增长率约为0.1亿m³/a。

结合流域基准期实测的径流数据可知(见图6),年径流量以2020年为界,整体呈现先减后增趋势。在1990年和2010年格尔木河径流达16亿m³(异常值),引发了洪涝灾害^[17-18]。RCP2.6情景下,2034年与2035年的年径流量超过16亿m³,2049年与2050年的年径流量接近16亿m³。因此,2034、2035、2049及2050年很可能再次出现大的河流洪峰,引发洪涝灾害。RCP4.5情景下,2046—2050年期间各年年径流量高于2010年的值。因此,这种情景下,这几年流域可能发生类似甚至比2010年更严重的洪涝灾害。在RCP6.0情景下,只有2050年的年径流量稍高于16亿m³,其它年份

都未超过2010年的值。尽管径流模拟预测具有不确定性,上述分析的异常年份需引起当地水资源管理部门的格外关注。

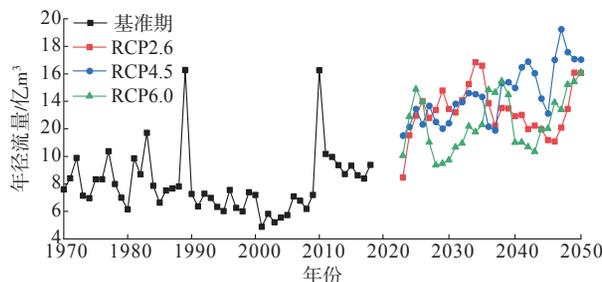


图6 基准期与未来不同情景下流域径流变化趋势
Fig.6 The trend of runoff changes in the basin under different scenarios in the base period and in the future

为进一步分析未来气候情景下月均径流量较基准期的变化情况,分析了基准期与2022—2050年径流变化的年内过程(见图4(d))。相较于基准期,3种气候情景下流域的月均径流量整体显著增加,月均径流变化趋势相近,月均径流量几乎相等,7、8月流量增幅较大,在8月达到最大值,大小超过80 m³/s。这可能与模型不确定性与RCP气候情景不确定性叠加影响有关^[19]。

表2 不同气候情景下径流与气候相关系数检验

Table 2 Test of correlation coefficient between runoff and climate under different climate scenarios

气候情景	指标	春季平均降水量	夏季平均降水量	秋季平均降水量	冬季平均降水量	年均降水量	年均气温	年均径流量
RCP2.6	年均径流量	-0.029	0.039	0.045	-0.101	0.652**	0.590*	1
	春季平均径流量	-0.043	-0.001	0.078	-0.100	-0.125	0.585*	0.995**
	夏季平均径流量	0.465**	0.661**	-0.676**	0.269*	0.553**	0.547	0.222*
	秋季平均径流量	-0.246*	-0.342**	0.619**	-0.172	-0.344**	0.433	0.492**
	冬季平均径流量	0.024	0.024	0.079	-0.058	-0.039	0.453	0.934**
RCP4.5	年均径流量	-0.015	-0.128	0.024	-0.103	0.636**	0.427	1
	春季平均径流量	-0.028	-0.158	0.067	-0.083	-0.107	0.409	0.992**
	夏季平均径流量	0.482**	0.583**	-0.689**	-0.057	0.388**	0.076	0.157
	秋季平均径流量	-0.310**	-0.454**	0.546**	-0.108	-0.342**	0.124	0.401**
	冬季平均径流量	-0.019	-0.165	0.062	-0.109	-0.099	0.063	0.899**
RCP6.0	年均径流量	-0.262	-0.044	0.202	0.070	0.660**	0.437	1
	春季平均径流量	-0.270*	-0.087	0.249*	0.063	-0.154	0.410	0.994**
	夏季平均径流量	0.399**	0.676**	-0.639**	0.103	0.459**	0.033	0.178
	秋季平均径流量	-0.271*	-0.387**	0.686**	0.044	-0.282**	-0.190	0.390**
	冬季平均径流量	-0.238*	-0.078	0.233**	0.069	-0.178	-0.099	0.890**

注:*表示相关关系通过0.05显著水平检验,**表示相关关系通过0.01显著水平检验。

4.3 未来气候变化对流域径流的影响分析

由表2可知,在RCP2.6情景下,年径流量与年均降水量呈显著的正相关关系,这表明降水量是流域年径流量的主要控制因素。RCP4.5和RCP6.0情景下,年径流量只与年均降水量呈显著正相关关系。因此,三种情景下流域年径流量主要受降水量的影响,这与图3和图5的分析相吻合。

在RCP2.6情景下,夏季径流量与春季降水量呈正相关关系,反映该情景下径流量相对于降水量存在滞后效应。这种效应也反映在RCP4.5和RCP6.0情景下。在3种气候情景下,夏、秋两季径流量与该季节降水量皆呈显著正相关关系,且夏季径流量与年降水量皆呈正相关关系。这表明随着年降水量的增加流域夏季径流量增加(图4(a))。而春、冬两季径流量与该季节降水量不相关。

年均径流量与年均温度只在RCP2.6情景下呈正相关关系,其他气候情景下不相关,而年均径流量与各季节的降水量相关不显著,表明随着温室气体排放的加剧,流域温度上升,蒸发作用强烈,使得降水引起径流变化的作用降低。3种气候情景下,流域季节性径流量与年均径流量呈显著正相关关系(RCP4.5和RCP6.0情景下夏季径流量与年均径流量不相关)。其中,春、冬两季径流量与年均径流量相关系数接近于1,而春、冬两季径流量与年均降水量不相关,表明未来30年流域降水量虽然增加显著,但春、冬两季径流量并不受降水影响。3种气候情景下,春、冬两季径流量与年均径流量相关系数之所以较大,是因为随着温室气体的排放,春、冬两季温度升高导致流域上游高山积雪消融使得春、冬两季径流量陡增。因此,在未来气候情景下,水资源管理相关部门需要提前做好防洪排涝准备,以防由于春、冬两季径流增大的极端事件发生。同时,还要注意雨季降水极有可能导致流域季节性径流量的增大,进而引发洪涝灾害事件。

5 结论

(1)以格尔木河流域为研究区构建的SWAT模型,拟合效果较好,不确定性较小,具有较好的适用性。

(2)3种不同气候情景下,流域2022—2050年降水量均高于基准期,且季节性降水量明显增多;而流域最高温度和最低温度都较基准期降低,表现出降水与气温的相反变化。

(3)相较于基准期,在RCP2.6、RCP4.5和RCP6.0气候情景下,流域2022—2050年径流量均显著增加,在未来时段应特别关注径流增加的异常年份,防范由于河流洪峰引发的洪涝灾害。在3种气候情境下,春、冬两季径流量陡增,反映出随着全球温室气体的排放,流域上游高山积雪加速消融。

(4)SWAT模型与气象预报数据相结合,可对格尔木河流域径流过程预报。但在径流预测的过程中,模型输入与率定的误差/不确定性、气象条件与水文过程的时空变异、气候情景的不确定性等均会影响模型精度和预测结果,这些问题还需进一步研讨。

参考文献:

- [1] 朱乔,梁睿,晋华,等.基于SWAT模型的岚河流域径流模拟[J].水电能源科学,2013,31(3):25-27.
- [2] GASSMAN P W, SADEGHI A M, SRINIVASAN R. Applications of the SWAT model special section: overview and insights[J]. Journal of Environmental Quality, 2014, 43(1): 1-8.
- [3] GASSMAN P W, REYES M R, GREEN C H, et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(4): 1211-1250.
- [4] AWAN U K, LIAQAT U W, CHOI M, et al. A SWAT modeling approach to assess the impact of climate change on consumptive water use in Lower Chenab Canal area of Indus basin[J]. Hydrology Research, 2016, 47(5): 1025-1037.
- [5] ROMANOWICZ A A, VANCLOOSTER M, ROUNSEVELL M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium[J]. Ecological Modelling, 2005, 187(1): 27-39.
- [6] CHEN Q H, CHEN H, ZHANG J, et al. Impacts of climate change and LULC change on runoff in the Jinsha River Basin[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(1): 85-102.
- [7] BA W L, DU P F, LIU T, et al. Impacts of climate change and agricultural activities on water quality in the Lower Kaidu River Basin, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(1): 164-176.
- [8] HU S, QIU H J, YANG D D, et al. Evaluation of the applicability of climate forecast system reanalysis weather data for hydrologic simulation: A case study in the Bahe River Basin of the Qinling Mountains, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(5): 546-564.
- [9] 王军德,李元红,李赞堂,等.基于SWAT模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究——以石羊河上游杂木河流域为例[J].生态学报,2010,30(21):5875-5885.
- [10] 寇文杰.格尔木河流域地表水与地下水相互转换关系及其合理开发利用研究[D].北京:中国地质大学(北京),2006.
- [11] 王秀莲,杨丽蓉,闫永福,等.柴达木盆地格尔木地区地下水资源开发与保护的探讨[J].科技和产业,2014,14(7):161-163.

- [12] 白淑英, 王莉, 史建桥, 等. 基于SWAT模型的开都河流域径流模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 79-84.
- [13] 王磊, 杜欢, 谢建治. 基于SWAT模型的张家口清水河流域径流模拟[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(4): 34-40.
- [14] 李谦, 张静, 宫辉力. 基于SUFI-2算法和SWAT模型的妫水河流域水文模拟及参数不确定性分析[J]. 水文, 2015, 35(3): 43-48.
- [15] 陈阳, 马龙, 刘廷玺, 等. 中国北方地区年降水与气温关系及其时空变异性[J]. 生态环境学报, 2021, 30(1): 135-145.
- [16] WANG Q F, ZENG J Y, LENG S, et al. The effects of air temperature and precipitation on the net primary productivity in China during the early 21st century [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2018, 12(4): 818-833.
- [17] 韩廷芳, 陈宏松, 石秀云, 等. 1961 ~ 2015年格尔木市汛期极端降水事件变化特征[J]. 青海草业, 2018, 27(2): 51-55.
- [18] 马生玉, 徐亮. 2010年夏季格尔木河流域汛情及气候成因分析[J]. 青海科技, 2011, 18(1): 38-41.
- [19] 王书霞, 张利平, 李意, 等. 气候变化情景下澜沧江流域极端洪水事件研究[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(1): 23-32.

Scenario Simulation Research on Hydrological Characteristics of the Golmud River Basin Based on SWAT Model

TAI Lixiang¹, RAO Wenbo¹, TAN Tao¹, TAN Hongbing¹, JIANG Sanyuan², ZHANG Xiyang³

(1. *College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;*

2. *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Jiangsu Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

3. *Qinghai Institute of Salt Lakes, CAS, Xining 810008, China)*

Abstract: Based on the measured runoff data of the Golmud River basin from 2008 to 2016, this paper constructed a SWAT distributed hydrological model with the use of the SUFI-2 algorithm for parameter calibration, verification and uncertainty analysis, and set up different climate scenarios (RCP2.6, RCP4.5 and RCP6.0) to predict the runoff change trend of the basin from 2022 to 2050, analyzed the future precipitation and temperature change trends in the study area, and explored the impacts of these climatic factors on the runoff of the basin. The results show that: (1) the SWAT model has good applicability in the simulation of the runoff process of the basin. For the calibration period R^2 and E_{NS} are 0.84 and 0.73, respectively, and for the verification period R^2 and E_{NS} are 0.74 and 0.70, respectively; (2) the runoff prediction uncertainty interval is small; (3) In the future, the precipitation in the basin will increase while the temperature will decrease; (4) The runoff in the basin will increase significantly in the future time period, and precipitation is the main factor controlling the runoff in the basin.

Keywords: SWAT model; alpine and arid region; Golmud River basin; climate change; runoff simulation and prediction

=====

(上接第17页)

Long-Term Runoff Forecasting Based on Multiple Factors in Middle and High Latitude Arid Areas

CHEN Xiaoting¹, ZHANG Shuanghu¹, WANG Dan^{1,2}, WANG Xingbo¹

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;*

2. *Dalian University of Technology, Dalian 116081, China)*

Abstract: Taking the Irtysh River basin as an example, the research on runoff forecast in middle and high latitudes based on multiple climate factors was carried out. The Irtysh River Basin is deep in the inland, which is the key to accurately screen out the main influencing factors to carry out the medium and long term runoff forecast. According to the characteristics of the geographical position of Irtysh River basin, the 500 hPa height field in the northern hemisphere, ENSO events and the arctic sea ice area during ice period are the main factors influencing the river runoff. By means of Canonical Correlation Analysis, general correlation between annual runoff of Irtysh River and influencing factors was analyzed, and typical regression equations for predicting annual runoff was established. The results show that there is a high correlation between annual runoff and climatic factors in the multi-factor scenario. The result meets the requirements of the anomaly sign agreement rate and the forecast accuracy, which could be used as a medium and long-term runoff forecast model for the Irtysh River. The results could provide a reliable support for water resources scheduling practice in the Irtysh River basin, and also has reference significance for runoff prediction in middle and upper latitudes arid region.

Keywords: medium and long-term runoff prediction; CCA method; geopotential height of 500 hectopascal; NINO index; Arctic sea-ice