

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221411

基于 SWAT 模型的呼玛河流域径流对气候变化的水文响应

王润蒲^{1a,1b,2}, 戴长雷^{1a,1b,2}, 于成刚^{1a,3}, 陈 蕾^{1a,1b,2}

- (1. 黑龙江大学 a. 寒区地下水研究所; b. 水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 黑龙江大学—俄科院西伯利亚冻土所寒区水文与水利工程中俄联合实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
3. 黑龙江省大兴安岭水文水资源分中心, 黑龙江 大兴安岭地区 165000)

摘要: 呼玛河流域降水及冰雪融水的补给对于黑龙江干流径流量变化影响巨大, 而气候变化是影响呼玛河降水及冰雪融水的一个重要因子。因此, 通过收集呼玛河流域呼玛、新林、塔河、呼中气象站及呼玛桥水文站的数据, 结合 DEM 数据、土地利用数据及土壤数据, 构建适用于呼玛河流域的 SWAT 径流模型并进行月径流模拟, 同时通过天气发生器设定温度与降水梯度, 研究呼玛河流域径流对气候变化的响应。结果表明, SWAT 模型在呼玛河流域具有良好的适应性, 率定期及验证期的决定系数 R^2 、纳什系数 N_{NSE} 均达到了模型的评价标准; 呼玛河流域径流对降水变化的敏感性远高于气温, 降水是该流域径流变化的主要控制因子。

关键词: 气候变化; 径流模拟; SWAT 模型; 呼玛河流域; 寒区

中图分类号: TV121⁺.4; P339

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0027-04

1 概况

呼玛河位于黑龙江上游, 是黑龙江的一级支流, 发源于伊勒呼里山北麓, 流域位于 $E122^{\circ}03' \sim E126^{\circ}43'$ 、 $N51^{\circ}15' \sim N52^{\circ}45'$ 之间, 流域面积为 $33\,924\text{ km}^2$, 河长 542 km , 海拔为 $170 \sim 1\,010\text{ m}$ ^[1]。呼玛河流域气候属寒温带大陆性气候, 年平均积温不足 $1\,600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最低气温 $-48.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最高气温 $39.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年平均气温 $-2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。流域年降水量变化大, 平均降水量为 473.4 mm , 年际变化较大, 年内分配不均, 丰枯界限分明, 降水集中于 $6 \sim 9$ 月, 约占全年的 80% ^[2]。呼玛河流域以呼玛桥水文站为流域出口。流域内有呼中、呼玛、新林、塔河四个气象站。流域土地利用类型以林地为主, 约占总面积的 87.1% , 其次为草地、沼泽地、耕地, 分别占总面积的 9.24% 、 2.12% 、 0.76% , 工业用地与居民区面积较小, 约占总面积的 0.22% , 且多位于呼玛河河畔。土壤类型较为简单, 以高活性淋溶土为主, 约占总面积的 67% , 其次为潜育土, 占 25% , 黑土主要位于流域的中

游和下游, 占总面积的 7% , 疏松岩性土面积较少, 仅为总面积的 1% 。据近 60 年的实测数据显示, 东北地区气温显著上升, 平均气温倾向率为 $0.327\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($p < 0.001$), 远高于中国平均增温速率 $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[3]。气温的急剧上升导致全球水循环受到巨大影响, 极端水文事件发生概率增大。黑龙江干流为洪水多发地带, 局部地区较严重的洪涝灾害平均 $2 \sim 3$ 年发生一次, 大范围严重的洪涝灾害 $10 \sim 30$ 年发生一次^[4], 且受气温上升所影响, 洪水灾害愈加频发。作为黑龙江上游一级支流^[5], 呼玛河流域径流量变化对黑龙江干流影响较大, 流域径流补给以降水为主, 冰雪融水为辅^[6], 因此讨论气候变化下呼玛河流域的水文响应具有重要的现实意义。SWAT 是基于水文过程、具有一定物理机制、可连续模拟分布式流域水文模型^[7], 并通过集成 RS、GIS、DEM 技术, 可有效模拟不同土壤条件、土地利用类型、气候情景及人类活动影响下的径流等^[8]。然而目前东北地区对于流域径流与气候响应的变化研究仍较少。因此, 本文选择呼玛河流域构建 SWAT 水文模型, 结合该流域地形、土地利用、土壤、气候等因素, 对

收稿日期: 2022-07-11, **修回日期:** 2022-08-16

基金项目: 黑龙江省水利厅科技项目(HSKY201317); 黑龙江省水文局科技项目(2014230101000811)

作者简介: 王润蒲(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源, E-mail: hss_wangrunpu@126.com

通讯作者: 戴长雷(1978-), 男, 博士、教授, 研究方向为水利工程, E-mail: daichanglei@126.com

该流域进行径流模拟,并分析气候变化情景下流域径流量变化情况,以期为当地防洪防汛、春季灌溉等提供理论参考。

2 基础数据及研究方法

2.1 数据来源及用途

呼玛河流域 SWAT 模型所需数据见表 1。其中,气象数据为 2010~2018 年的降水、气温、风速、太阳辐射、相对湿度;水文数据为 2010~2018 年呼玛桥站的水文站实测径流观测数据。根据以上数据绘制子流域分布图、DEM 高程图、流域水系图、土地利用图、土壤类型图,见图 1。

表 1 SWAT 模型数据来源

Tab. 1 SWAT model data source

数据类型	分辨率	时间尺度	数据来源	用途
DEM 高程	90 m		地理空间数据云	生成河网及子流域
土地利用	1 km		中科院数据中心	构建土地利用数据库
土壤类型	1 km		HWSD 全球土壤数据库	构建土壤数据库
水文数据		日值	呼玛桥水文站	径流模拟、率定及验证
气象数据		日值	CMADS 数据集	配置天气发生器

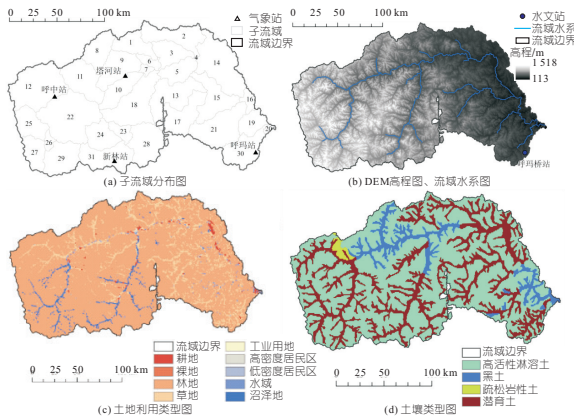


图 1 呼玛河流域子流域分布图、DEM 高程图、流域水系图、土地利用类型图、土壤类型图

Fig. 1 Water system map, DEM elevation map, land use type map and soil type map of Huma River

2.2 研究方法

SWAT 模型主要基于水量平衡来模拟径流的产汇流过程。其水文建模可划分为水文循环的陆地阶段、水文循环的汇流或演算阶段两个主要阶段。所涉及的主要水文过程有冠层截留、下渗、再分配、蒸散发、壤中流、地表径流、坑塘、支流河道、回归流等。计算公式为:

$$S_{SW_i} = S_{SW_0} + \sum_{i=1}^i (R_d - Q_s - E_a - W_s - Q_g) \quad (1)$$

式中, S_{SW_i} 为土壤含水率最终值; S_{SW_0} 为起始土壤含水率; i 为时间序列; R_d 、 Q_s 、 E_a 、 Q_g 分别为第 i 时段的降水量、地表径流量、蒸散发量、地下水回流量; W_s 为第 i 时段向下渗透的地表水量。

呼玛河流域地处寒区,冰雪融水也是河道径流来源的重要组成部分。SWAT 融雪模块的计算主要考虑空气温度的影响^[9],通过度日因子法模拟融雪径流,但该方法较适用于降雨量大的平原地区,而呼玛河流域海拔较高,昼夜温差极大,对径流模拟的精准度也有一定程度的影响。

3 基于 SWAT 模型的径流模拟

3.1 模型构建

模型构建时使用了呼玛、呼中、塔河、新林四个气象站的气象数据及呼玛桥站的径流数据。基于呼玛河流域 DEM 数据将该地区划分为 31 个子流域,见图 1(a)。并通过设置土地利用、土壤类型和坡度数据的阈值(分别为 10%、10%、5%),将子流域划分为 97 个 HRU。后续在天气发生器中输入呼玛等气象站的数据,完成模型的前期设置。

3.2 参数敏感性分析

利用 SWAT-CUP 软件率定影响呼玛河流域产汇流过程的参数,其中影响其模拟精度的参数共有 28 个。根据呼玛河水文站径流实测数据,选择 2010~2012 年作为模型预热期,2013~2016 年为模型率定期,2017~2018 年为模型验证期。同时参数的显著性通过 T 检验法中的 p-state 指标进行评价,p-state 的取值范围为 0~1,p-state 的值越小表示参数敏感性越显著^[10]。通过多次迭代,不断缩小参数的上下限,最终确定了 12 个具有显著影响的参数及其敏感性排序(表 2),并选择决定系数 R^2 、纳什系数 N_{NSE} 作为模型评价指标。

表 2 SWAT 参数物理意义及其敏感性排序

Tab. 2 Physical meaning and sensitivity ranking of SWAT parameters

参数名称及敏感性排序	物理意义	最佳值	下限	上限
1;R_SOL_K(1).sol	土壤饱和水力传导度	-0.179	-0.612	0.027
2;R_CN2.mgt	SCS 径流曲线系数	0.193	0.046	0.200
3;R_SOL_BD(1).sol	土壤湿度	0.245	0.223	0.600
4;V_SMTMP.bsn	融雪基础温度	3.752	-1.707	4.890
5;V_ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	0.734	0.728	0.851
6;R_SLSUBBSN.hru	子流域平均坡长	0.056	0.027	0.140
7;R_OV_N.hru	坡面漫流的曼宁系数	-0.115	-0.135	-0.056
8;V_SMFMN.bsn	12月21日融雪因子	7.194	2.703	7.571
9;V_CH_N2.rte	河道曼宁系数	0.263	0.169	0.271
10;R_SOL_Z(1).sol	土壤表层到底层深度	0.436	-0.164	0.509
11;V_ALPHA_BF.gw	基流消退系数	0.356	0.356	0.661
12;V_CH_K2.rte	主河道水力传导度	69.158	37.456	102.486

注:R为参数百分比变化;V为参数值。

3.3 模型结果与分析

将参数率定最优值代入 SWAT 模型得到径流模拟结果,其率定结果见图 2。由图 2 可知,径流模拟结果的 R^2 、 N_{NSE} 在率定期和验证期分别为 0.78、0.74 和 0.75、0.65,率定期的 N_{NSE} 略高

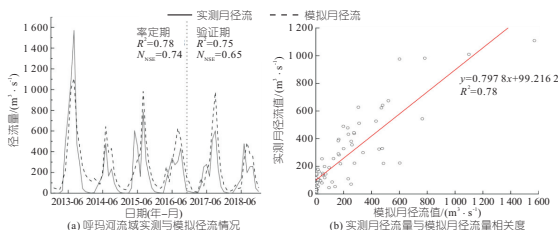


图 2 呼玛河流域率定期与验证期模拟值与实测值对比
Fig. 2 Comparison between simulated and measured values of Huma River Basin rate in regular and validation periods

于验证期的原因可能是土地利用数据(2015年)与率定期更相近,且率定期内丰水年较多。由图1(a)、(b)与图2可知,率定期和验证期径流的模拟值与实测值拟合较好,且径流量与降水量变化趋势基本一致,模拟值可较好地反映实际径流的变化。综上所述,SWAT模型在呼玛河流域具有较好的适应性,该模型可用于呼玛河流域径流模拟及对气候变化的响应研究。

呼玛河流域 11 月~次年 4 月为少雨期,河流封冻,降水的主要形式为降雪,径流量较小,一般约占全年的 4%。5~10 月为呼玛河流域的降雨期,随着气温的逐渐回升,冰雪逐渐消融,河流逐渐解冻,加之该地区受到大兴安岭东侧的高空槽、东北冷涡及西风带的影响,冷暖气流交汇,常出现暴雨,两者导致该地区下游出口断面径流量急剧上升,在 8、9 月达到峰值,易出现洪水。且由于 4、5 月气温的反复,该流域冻土的冻融现象使降雨下渗较为困难,常会有洪水双峰的现象出现。由图 2 可看出,SWAT 模型径流模拟值多为单峰,可能是由于该模型不能很好地反映出该流域冻土的冻融现象,与已有研究基本一致^[11]。

4 气候变化对呼玛河流域径流的影响

为了确定气候变化对呼玛河流域径流变化的影响,参考 RCP 情景模式(RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)所导致的全球升温现象设定温度变化梯度^[12],设置 SWAT 模型天气发生器中其他的因素保持不变,改变降水量、温度数据,共设置 25 种气候变化情景(表 3),研究该流域气候变化对径流的水文响应。

表 3 气候变化情景类型

Tab. 3 Types of climate change scenarios

气候变化	$\Delta T/^\circ\text{C}$				
	$\Delta P/\%$	-2	-1	0	+1
-10	情景 1	情景 6	情景 11	情景 16	情景 21
-5	情景 2	情景 7	情景 12	情景 17	情景 22
0	情景 3	情景 8	情景 13	情景 18	情景 23
+5	情景 4	情景 9	情景 14	情景 19	情景 24
+10	情景 5	情景 10	情景 15	情景 20	情景 25

注: ΔP 、 ΔT 分别为降水变化幅度、气温变化幅度。

4.1 单一气候因子对流域径流的影响

图 3 为气温或降水单一因子影响下的年平均径流量模拟变化率与变化值。由图 3 可知:①在保持降水不变的情况下,通过设置气温的梯度变化(± 2 、 $\pm 1^\circ\text{C}$),月平均径流量的变化值范围为 $+20.6 \sim -21.4 \text{ m}^3/\text{s}$,月平均径流量的变化率为 $7\% \sim -8\%$,气温升高时径流量减小,气温降低时径流量增大,两者呈负相关。②在保持气温不变的情况下,通过设置降雨梯度变化($\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$),月平均径流量的变化值范围为 $-49.4 \sim +44.1 \text{ m}^3/\text{s}$,月平均径流量的变化率为 $-18\% \sim +16\%$,降雨增大时,径流量增大,降雨减小时,径流量减小,两者呈正相关。呼玛河流域研究时段内年平均气温为 -1.71°C ,气温所设置的梯度变化百分比远高于降水,但降水对径流的影响仍大于气温,两者相比反映出降水变化对径流变化的影响远比气温要大的多。

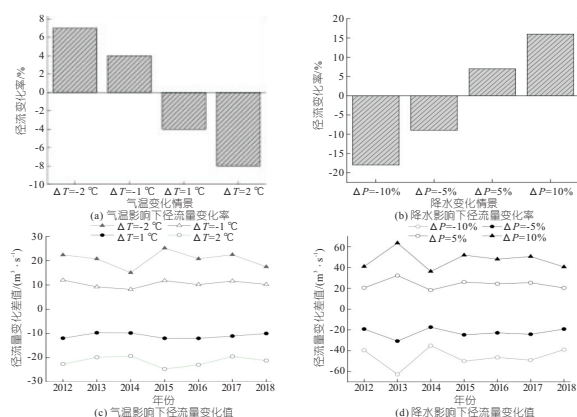


图 3 气温或降水单一因子影响下的年平均径流量模拟变化率与变化值

Fig. 3 Simulated change rate and change value of annual average runoff under influence of a single factor of temperature or precipitation

4.2 不同气候变化情景组合对径流的影响

图 4 为 25 种气候变化情景下的年平均径流量模拟变化率与变化值。由图 4 可知,从 25 种不同气候场景的组合来看,当处于 $\Delta P = -10\%$ 、 $\Delta T = +2^\circ\text{C}$ 的情景下,月平均径流量与基准期相比减少了 24%,其径流量减少了 $67.4 \text{ m}^3/\text{s}$;当处于 $\Delta P = +10\%$ 、 $\Delta T = -2^\circ\text{C}$ 的情景下,月平均径流量与基准期相比增加了 25%,其径流量增加了 $68.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 。反映了即使在降水充沛、昼夜温差极大的呼玛河流域,降水变化仍是径流变化的主要影响因子。

5 结论

a. SWAT 模型在半湿润地区,产流模式为蓄

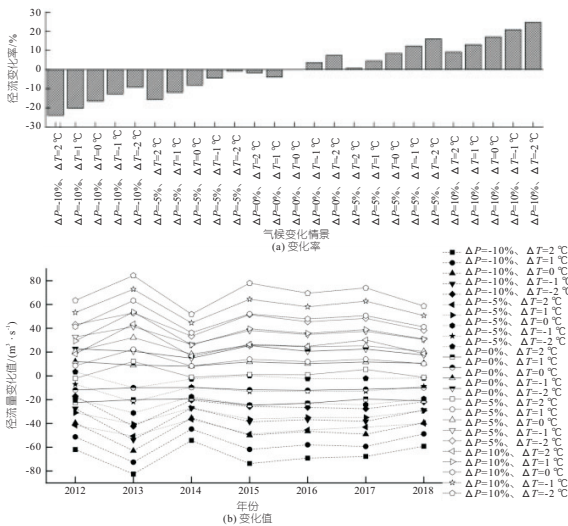


图 4 25 种气候变化情景下的年平均径流量模拟变化率与变化值

Fig. 4 Simulated change rate and change value of annual average runoff under 24 climate change scenarios

满产流的呼玛河流域具有良好的适应性。率定期和验证期的 R^2 、 N_{NSE} 分别为 0.78、0.74 和 0.75、0.65。

b. 降雨与冰雪融水是呼玛河流域径流的重要来源,且降雨与径流具有较好的一致性。同时,由于该地区气温极低且冻土发育,春季气温反复回升与冻土冻融现象的出现,一定程度上导致呼玛河流域双峰现象的出现,但由于 SWAT 融雪模块不能很好地反映出流域实际的径流情况,某种程度上降低了模型精度,但总体上仍符合要求。

c. 降水与气温是影响呼玛河流域径流变化的重要因子,降水与径流呈正相关,气温与径流呈负相关。气温通过影响蒸散发来影响径流变化,降水则是通过直接影响地表径流、基流改变径流。从 25 种不同情景模式来看,降水变化是控制径流变化的显著因子,其敏感程度远比温度要高。

d. 本文所选择的呼玛河流域面积较大,但实测气象站点较少,能否代表该流域的降水与气温

存疑,后续考虑通过结合 CMADS、CFSR 等格点数据,对研究区的气象数据进行插补,以提高气象数据的代表性和可靠性。

参考文献:

[1] 司国佐,田晓冬,孙丽萍. 呼玛河流域暴雨洪水分析[J]. 黑龙江水利科技,2009,37(6):73-74.

[2] 张鹏远,肖兴涛,丛丽君. 2003 年呼玛河流域洪水特性分析[J]. 黑龙江水利科技,2011,39(1):201-202.

[3] 吴金华,盛芝露,杜加强,等. 1956-2017 年东北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 水土保持研究,2021,28(3):340-347,415.

[4] 王容,尹志杰,朱春子. 2013 年黑龙江、松花江暴雨洪水分析[J]. 水文,2014,34(6):67-71,76.

[5] 季山,张德伟,王红星. 呼玛河流域水文特性及水文模拟[J]. 黑龙江水专学报,1998(3):15-26.

[6] 戴长雷,王思聪,李治军,等. 黑龙江流域水文地理研究综述[J]. 地理学报,2015,70(11):1823-1834.

[7] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development[J]. JAWRA journal of the American water resources association, 1998,34(1):73-89.

[8] 冯夏清,章光新,尹雄锐. 基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应[J]. 地理科学进展,2010,29(7):827-832.

[9] 余文君,南卓铜,赵彦博,等. SWAT 模型融雪模块的改进[J]. 生态学报,2013,33(21):6992-7001.

[10] TESHAGER A D, GASSAN 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]. Environmental management, 2016, 57(4):894-911.

[11] 孙瑞,张雪芹. 基于 SWAT 模型的流域径流模拟研究进展[J]. 水文,2010,30(3):28-32,47.

[12] 程雪蓉. 基于 CMIP5 模式预估长江上游流域气温及降水时空特征[J]. 水电能源科学,2019,37(1):13-16.

Hydrological Response of Runoff to Climate Change in Huma River Basin Based on SWAT Model

WANG Run-pu^{1a,1b,2}, DAI Chang-lei^{1a,1b,2}, YU Cheng-gang^{1a,3}, CHEN Lei^{1a,1b,2}

(1a. Institute of Cold Groundwater; 1b. School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 2. Joint Laboratory of Hydrology and Hydraulic Engineering, Siberian Frozen Soil Institute, Heilongjiang University-Russian Academy of Sciences, Harbin 150080, China; 3. Heilongjiang Daxing'anling Hydrological and Water Resources Sub-Center, Daxing'anling 165000, China)

Abstract: The precipitation and ice melt water supply in Huma River Basin have a great impact on the runoff changes of the main stream of Heilongjiang Province. Climate change is an important factor affecting the precipitation and ice melt water of the Huma River. By collecting the data of Huma, Xinlin, Tahe, Huzhong meteorological stations and Humaqing hydrological stations in the basin, combined with the DEM data, land use data and soil data, a SWAT runoff model suitable for the basin was constructed to simulate the monthly runoff. At the same time, the response of runoff to climate change in the basin was studied by setting temperature and precipitation gradients through the weather generator. The results show that the SWAT model has good adaptability in the basin, and the R^2 and N_{NSE} in the calibration and validation periods have reached the evaluation standard of the model. The runoff of Huma River Basin is much more sensitive to precipitation changes than temperature, and precipitation is the main control factor of runoff changes in the basin.

Key words: climate change; runoff simulation; SWAT model; Huma River Basin; cold region