

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.020

和田河流域冰川径流对气候变化响应的模拟分析

魏潇娜¹, 龙爱华^{1,2}, 尹振良³, 於嘉闻²

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003;

3. 中国科学院西北生态环境资源研究院内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:为模拟和田河流域上游冰川径流,构建了嵌入冰川模块的SWAT模型,并基于实测径流数据及冰川编目数据对模型进行校正与验证,定量分析了和田河流域上游冰川径流的变化趋势及其对出山径流的贡献和对气候变化的响应规律。结果表明:1967—2017年玉龙喀什河流域多年平均冰川径流量为11.02亿m³,冰川径流对出山径流的贡献率为48.7%,喀拉喀什河流域多年平均冰川径流量为9.51亿m³,冰川径流贡献率为45.5%;在0.01显著性水平下,玉龙喀什河流域气温与降水量均呈显著上升趋势,喀拉喀什河流域气温呈显著上升趋势,降水量呈不显著上升趋势;气候变化背景下,两条支流由于地理位置、冰川特征等的不同,导致两条支流的径流响应呈现较大差异,玉龙喀什河流域冰川径流量呈显著增加趋势,而冰川径流对出山径流的贡献率呈显著下降趋势,喀拉喀什河流域冰川径流量与冰川径流贡献率均呈不显著增加趋势。

关键词:冰川径流模拟;SWAT模型;气候变化;响应分析;和田河流域

中图分类号:TV12 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0137-08

Simulation of response of glacier runoff to climate change in the Hotan River Basin//WEI Xiaona¹, LONG Aihua^{1,2}, YIN Zhenliang³, YU Jiawen²(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 3. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The SWAT model embedded with glacier module was built for glacier runoff simulation in the upper Hotan River Basin. Based on the measured runoff data and glacier cataloging data, the model was corrected and verified, and the contribution of glacier runoff to surface runoff, change trend of glacier runoff, and its response rule to climate change in the river basin were quantitatively analyzed. The results show that the average annual glacial runoff of the Yurungkash River Basin is $11.02 \times 10^8 \text{ m}^3$, with its contribution rate to surface runoff being 48.70%, and the average annual glacial runoff of the Karakash River Basin is $9.51 \times 10^8 \text{ m}^3$, with its contribution rate to surface runoff being 45.46%; with regard to the significance level of 0.01, temperature and precipitation of the Yurungkash River Basin have significant increasing trends, respectively, temperature of the Karakash River Basin has a significant increasing trend, while precipitation of the Karakash River Basin has an insignificant increasing trend; under the climate change background, there is a large difference between the runoff responses of the two tributaries due to different geographical positions and glacier characteristics, with glacier runoff of the Yurungkash River Basin and its contribution rate having a significant increasing and decreasing trend, respectively, while the glacial runoff of the Karakash River Basin and its contribution rate both having increasing trends.

Key words: glacier runoff simulation; SWAT model; climate change; response analysis; the Hotan River Basin

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0404301);新疆维吾尔自治区流域规划委员会重大咨询项目(403-1005-YBN-FT61-2,403-1005-YBN-FT61-7);水利部前期项目(WR0149B122020)

作者简介:魏潇娜(1997—),女,硕士研究生,主要从事流域水循环研究。E-mail: 2873468924@qq.com

通信作者:龙爱华(1976—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水资源配置与流域水循环研究。E-mail: ahleng@iwhr.com

我国西北地区的内陆河大多发源于高山冰川^[1],冰川融水是西北干旱区流域重要的径流来源,在西北地区水资源的开发利用中占有重要地位^[2]。冰川作为“固体水库”,对维持区域生态稳定和调节河川径流具有重要意义^[3,4],已有研究表明西北干旱区冰川融水量占全国冰川融水量的39%,占3省区(甘肃、新疆、青海)地表径流的14%^[5]。近50年来,新疆以气温明显高于世界和全国的平均增幅变暖^[3,6],其冰川整体上呈加速退缩之势^[3],大大改变了区域的径流组成、水资源量^[7]等。气候变化背景下,以典型流域为例,对冰雪补给型河流出山径流、冰川径流的变化以及冰川径流对出山径流的贡献开展评估分析对揭示流域整体变化具有重要作用。塔里木河流域是我国最大的内陆河流域,其河川径流主要以冰川积雪融水补给为主,冰川融水径流量约占总径流的40%^[7]。和田河是塔里木河四大主要源流之一,也是唯一一条完整发育着穿越塔克拉玛干沙漠绿色生态走廊的河流,在变暖变湿趋势下,流域生态环境变得异常脆弱^[8]。因此开展气候变化背景下和田河流域冰川径流变化研究,对保障流域社会经济发展与生态安全显得十分迫切^[9-11]。但是,长期以来,学界对和田河流域冰川径流变化的研究相对薄弱。

目前冰川径流的研究方法大致分为直接观测法、冰川物质平衡法、水量平衡方程法、水化学示踪法、水文模型法等5种,水文模型法是最常用的方法^[12-13]。赵求东等^[14]利用VIC(variable infiltration capacity)分布式水文模型估算得出天山南坡木扎提河流域冰川径流占总流量的66.6%;李洪源等^[15]利用包含冰雪消融模块的寒区分布式水文模型——SPHY(spatial processes in hydrology)模型对疏勒河流域的径流过程进行定量模拟,得出冰川径流约占总径流的年均比例为30.5%。SWAT(soil and water assessment tool)模型能够充分利用遥感数据提供的空间信息,模拟复杂流域条件下气候变化、土地利用变化和不同管理措施等对流域水量、水质的影响^[16-18]。Adnan等^[16]在中国青藏高原南部南柯湖冰川和非冰川区子流域进行的SWAT模型适应性评价表明,常规的SWAT模型在有冰川的流域模拟效果并不理想,将SWAT模型与冰川模块相结合才能更好地模拟冰川地区的流域径流。近年来,有学者试图在SWAT模型中嵌入冰川模块,从而提高SWAT模型在高冰川覆盖率地区的适用性。如Luo等^[17]提出了冰川算法并将其嵌入SWAT模型中,在玛纳斯河流域的应用中验证了该方法的可靠性;Yin等^[18]利用嵌入冰川模块的SWAT模型定量估算了

叶尔羌河流域冰川径流对出山径流的贡献,认为嵌入冰川模块的SWAT模型在该流域有较好的适用性。

本文针对和田河流域上游冰川径流构建了嵌入冰川模块的SWAT模型来模拟分析冰川径流变化规律及其对气候变化的响应,以期对塔里木河水资源利用与规划提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

和田河流域位于新疆塔里木盆地的南部,流域面积约7.95万km²^[19],多年平均出山径流量为44.90亿m³。流域上游由玉龙喀什河(简称玉河)与喀拉喀什河(简称喀河)两支流组成(图1),出山口分别设有同古孜洛克与乌鲁瓦提水文站。主河流玉河发源于昆仑山,河长504km,多年(1967—2017年)平均出山径流量为22.64亿m³。喀河发源于喀喇昆仑山,河长808km,多年(1967—2017年)平均出山径流量为22.26亿m³。两支流于阔什拉什(88°33'E,38°05'N)汇合后始称和田河,并进入塔克拉玛干沙漠,和田河长319km^[19],最终经由肖塔水文站汇入塔里木河。和田河流域气候干旱少雨,寒冷干燥,常年处于极端干旱状态^[20]。和田河及其支流属于冰雪融水及降水混合补给河流,冰川融水补给量占年平均径流的40%以上^[7],夏季(6—8月)径流占年总量的70%以上。据第一次冰川编目,和田河流域上游的冰川面积为5687.35km²,冰川覆盖率为15.84%,其中玉河流域与喀河流域冰川覆盖率分别为22.72%和11.13%。

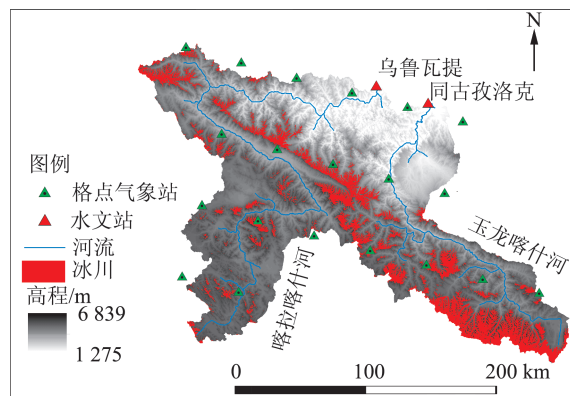


图1 研究区位置与水文站、气象站以及冰川分布

Fig.1 Location of study area and distributions of hydrological and meteorological stations as well as glacier

1.2 数据来源

a. DEM数据。在地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)获取了90m分辨率的DEM数据,并对数据进行了投影变换处理,将两个出山水文站作为流域出口控制断面得到和田河上游的

DEM 数据。通过 DEM 数据进行水流方向、集水面积的计算以及河网与子流域的划分^[21-22]。

b. 土壤数据。土壤类型与土壤的物理属性数据来自中国科学院南京土壤研究所发布的 1:1 000 000 土壤数据集,其中土壤容重(SOL_BD)、饱和导水率(SOL_K)和田间持水量(SOL_AWC)等参数通过 SPAW(soil-plant-atmosphere-water)模型中的土壤水文特性模块计算得到。根据研究区情况,共划分了 10 种土壤类型。

c. 土地利用数据。土地利用数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)提供的 2015 年全国土地利用数据,分辨率为 30 m × 30 m。研究区的数据经过 SWAT 重分类为 12 种数据。

d. 冰川编目数据。冰川数据来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn/>)中国第一次与第二次冰川编目数据,第一次冰川编目数据主要依据 1987—2004 年航测地形图制作而成,第二次冰川编目数据主要由 2006—2013 年 Landsat TM/ETM+ 和 ASTER 遥感影像提取而成。本研究的模型率定期(1967—1992 年)采用第一次冰川编目数据,验证期(1993—2017 年)采用第二次冰川编目数据。

e. 水文气象数据。本文采用中国地面降水日值 0.5° × 0.5° 格点数据集(V2.0)、中国地面气温日值 0.5° × 0.5° 格点数据集(V2.0),时间序列为 1961—2017 年,其中包括了日最高、平均、最低气温与日降水数据,提取 20 个格点作为虚拟气象站(图 1),格点数据经过校正后作为模型的输入数据。水文数据来自和田河流域管理局,包括乌鲁瓦提与同古孜洛克水文站 1961—2017 年的逐月径流数据。

2 研究方法

2.1 冰川融化算法

采用修正的温度指数法对冰川融化过程进行模拟^[18,23]。根据消融因子与气温之间的线性关系计算冰川融化量,基于太阳辐射和地形两个因素的影响对空间异质性进行修正^[23]。计算公式为

$$M = \begin{cases} (F_M + r_i I_p)(T - T_{MT}) & T > T_{MT} \\ 0 & T \leq T_{MT} \end{cases} \quad (1)$$

式中: M 为日消融量,mm; F_M 为温度消融因子,mm/(°C·d); r_i 为辐射消融因子,m²·mm/(W·d·°C); I_p 为潜在太阳总辐射,W/m²; T 为日平均气温,°C; T_{MT} 为冰川消融阈值温度,°C。

2.2 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall(M-K)检验法作为非参数检验方法,能够很好地揭示时间序列的变化趋势^[24-25]。已

知某时间序列数据,可计算得到两组数据序列 U_F 和 U_B 。若 $U_F > 0$,序列呈上升趋势;若 $U_F < 0$,序列呈下降趋势。若 U_F 和 U_B 曲线交点位于显著性水平线之间,交点对应时间为突变点,该方法广泛应用于水文和气象时间序列的趋势变化分析^[26-28]。

2.3 模型评价指标

选用纳什效率系数(E_{NS})、均方根误差与实测值标准差的比值(R_{RS})及百分比误差(P_{BIAS})对模型进行评价^[18]。 E_{NS} 越接近 1,表明模拟值对实测值的拟合精度越高,一般认为月尺度上 $E_{NS} > 0.6$ 时模拟结果较可靠^[29]。当 $0.75 \leq E_{NS} \leq 1$ 、 $0 \leq R_{RS} \leq 0.5$ 、 $|P_{BIAS}| < 10\%$ 时,认为模型模拟效果为优^[24]。

3 结果与分析

3.1 模型评价

分别选取乌鲁瓦提水文站、同古孜洛克水文站逐月径流数据,进行喀河流域与玉河流域的率定与验证,选取 1961—1966 年为模型预热期,1967—1992 年为模型率定期,1993—2017 年为模型验证期。

3.1.1 模型参数率定

采用 SUFI2 算法进行参数敏感性分析^[30-31],选取最敏感的参数进行率定,最终根据参数的物理意义和该流域的水文过程进行参数的确定与调整,参数率定结果见表 1。

3.1.2 模型评价结果

将率定期的最优参数代入 SWAT 模型和嵌入冰川模块的 SWAT 模型进行验证,模型评价结果如表 2 所示,率定期与验证期月径流实测值与模拟值对比结果如图 2 所示。结果表明,嵌入冰川模块后,率定期与验证期 E_{NS} 均在 0.75 以上, P_{BIAS} 均在 10% 以内, R_{RS} 均在 0.5 以内;模拟的出山径流与实测径流变化过程基本一致,其中玉河流域率定期峰值处模拟值偏低,主要原因是气温偏低导致冰川融水模拟值偏低,进而导致峰值模拟值偏小。以上均表明嵌入冰川模块的 SWAT 模型在和田河流域适用性较好。

3.2 气候与水文过程

3.2.1 气候特征

1961—2017 年,玉河与喀河流域年平均气温均呈显著上升趋势($p < 0.01$),上升速率分别为 0.028 °C/a 和 0.021 °C/a;玉河流域降水量呈显著增加趋势,喀河流域降水量呈不显著增加趋势,降水量增长速率分别为 0.997 mm/a 和 0.646 mm/a(图 3)。就季节变化而言,玉河、喀河流域均在秋季升温最明显,夏季降水量增加最快,但玉河流域气温、降水量的增长速率普遍高于喀河流域(表 3)。

表 1 参数率定结果

Table 1 Parametric calibration results

模块	参数	物理意义	单位	范围	最优值	
					喀河流域	玉河流域
融雪模块	SMTMP	积雪融化的阈值温度	℃	-5.0 ~ 5.0	0.5	0.5
	SFTMP	发生降雪的阈值温度	℃	-5.0 ~ 5.0	1.0	1.0
	SMFMX	6 月 21 日积雪融化因子	mm/(℃ · d)	0 ~ 10.0	6.5	6.5
	SMFMN	12 月 21 日积雪融化因子	mm/(℃ · d)	0 ~ 10.0	1.5	1.5
	TIMP	积雪温度滞后因素		0.1 ~ 1.0	1.0	1.0
冰川模块	B_{melt6}	6 月 21 日冰融化因子	mm/(℃ · d)	1.4 ~ 16.0	4.0	3.0
	B_{melt12}	12 月 21 日冰融化因子	mm/(℃ · d)	1.4 ~ 16.0	0.5	0.5
	gm1t_tmp	冰融化阈值温度	℃	-5.0 ~ 5.0	2.0	4.0
径流	ALPHA_BF	基流 alpha 因子	d	0 ~ 1.000	0.048	0.048
	GW_DELAY	地下水滞后时间	d	0 ~ 450	60	60
	CH_K2	主河道河床有效水力传导度	mm/h	0 ~ 50	1.5	1.5
	ESCO	土壤蒸发补偿系数		0.01 ~ 1.00	0.75	0.95
	GWQMN	浅层含水层产生基流的阈值深度	mm	1 ~ 300	100	100

表 2 模型评价结果

Table 2 Model evaluation results

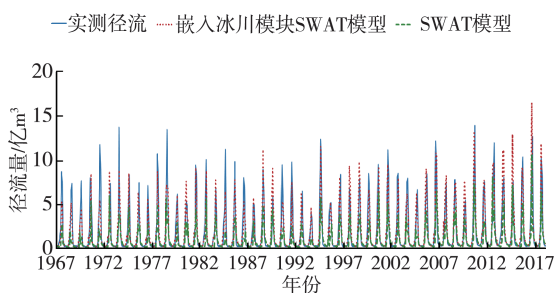
支流流域	模型	率定期(1967—1992 年)			验证期(1993—2017 年)		
		E_{NS}	R_{RS}	$P_{BIAS} / \%$	E_{NS}	R_{RS}	$P_{BIAS} / \%$
玉河流域	SWAT 模型	0.30	0.84	-55.03	0.46	0.74	-42.91
	嵌入冰川模块 SWAT 模型	0.79	0.46	-7.79	0.77	0.48	7.09
喀河流域	SWAT 模型	0.27	0.85	-47.48	0.28	0.85	-50.01
	嵌入冰川模块 SWAT 模型	0.80	0.45	-4.81	0.77	0.48	-7.25

表 3 和田河流域上游平均气温、降水量增长速率

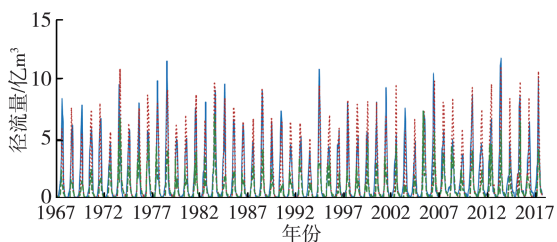
Table 3 Average temperature and precipitation increase rates in the upper Hotan River Basin

支流流域	平均气温上升速率/(℃ · a ⁻¹)				降水量增长速率/(mm · a ⁻¹)			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
玉河流域	0.018 **	0.022 **	0.042 **	0.032 **	0.151	0.728 **	0.096	0.022
喀河流域	0.011 *	0.013 **	0.036 **	0.023 *	0.019	0.513 **	0.072	0.042

注：**、* 分别表示通过 0.01、0.05 的显著性水平检验。



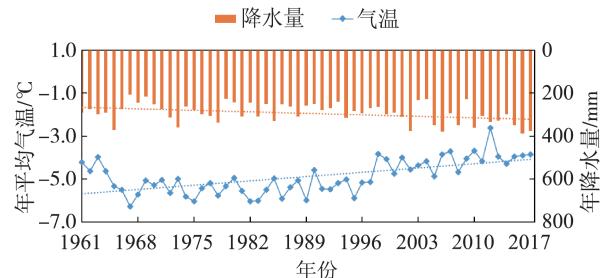
(a) 玉河流域



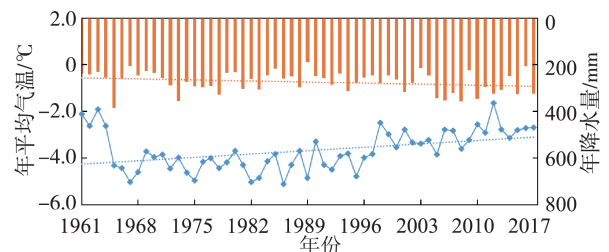
(b) 喀河流域

图 2 1967—2017 年月出山径流量模拟结果

Fig.2 Simulation results of monthly runoff from 1967 to 2017



(a) 玉河流域



(b) 喀河流域

图 3 1961—2017 年年平均气温和年降水量

Fig.3 Annual average temperature and annual precipitation from 1961 to 2017

3.2.2 水文特征

1967 年以来,玉河流域出山径流和冰川径流模拟值均呈显著增加趋势($p < 0.01$),增长速率分别为 $0.248 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 和 $0.077 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$;喀河流域出山径流和冰川径流模拟值均呈不显著增加趋势,增长速率分别为 $0.061 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 和 $0.035 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 。玉河流域冰川径流量的增长速率远小于出山径流量的增长速率,冰川径流增加对出山径流增加的贡献率约为 31.1%,冰川径流对出山径流的贡献(简称冰川径流贡献率)呈显著下降趋势;而喀河流域冰川径流量的增长速率超过出山径流量增长速率的 50%,冰川径流增加对出山径流增加的贡献率约为 57.38%,冰川径流贡献率呈不显著的上升趋势(图 4)。

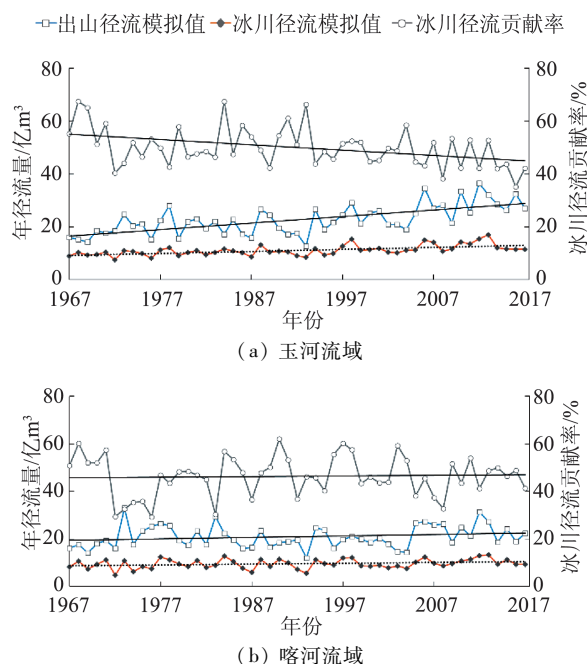


图 4 年径流量年际变化趋势
Fig. 4 Annual runoff trends

3.3 冰川径流对气候变化的响应

分析表明,玉河、喀河流域冰川径流量与气温的相关系数分别为 0.70 和 0.43,均通过 0.01 的显著性水平检验;玉河、喀河流域冰川径流量与降水量的相关系数分别为 0.42 和 0.32,分别通过 0.01 和 0.05 的显著性水平检验。由此可知,玉河、喀河流域冰川径流对气温的变化均更为敏感,而玉河流域的冰川覆盖率约为喀河流域的 2 倍,使得玉河流域冰川径流对气温变化的响应更敏感,一定程度上解释了玉河、喀河流域气温均呈显著上升趋势时,冰川径流却表现出显著性不同的变化趋势。冰川径流量年代变化趋势如图 5 所示(图中 1970s 表示 20 世纪 70 年代),从图 5 可以看出,玉河流域冰川径流量与气温变化规律基本一致;喀河流域冰川径流量变化与气温变化趋势之间关系并不明显,但与降水量的

变化规律相反,与赵求东等^[14]得到的降水量增加对冰川消融有抑制作用的结论基本一致。由此可知,在气温、降水的共同作用下,气温上升加速了冰川的消融,但冰川萎缩与降水量增加均对冰川消融产生了抑制作用。

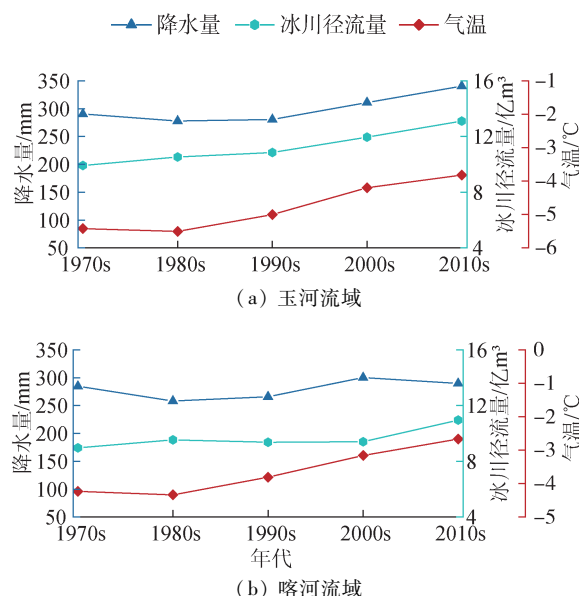


图 5 降水量、冰川径流量、气温年代际变化趋势
Fig. 5 Decadal trends of precipitation, glacier runoff, and air temperature

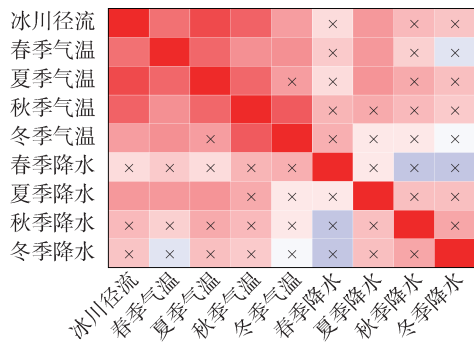
冰川径流主要发生在 4—10 月,对冰川径流量与季节性气候的相关性分析(图 6)表明,玉河流域冰川径流量与夏季气温的相关系数为 0.76,高于与秋季气温的相关系数(0.64),与夏季降水量的相关系数为 0.38;喀河流域冰川径流量与夏季气温的相关系数为 0.67,与秋季气温的相关系数为 0.40。气温是冰川消融最关键的因子,由于夏季气温基本在 0°C 以上,因此夏季气温对冰川径流产生了较大的影响。同时,玉河、喀河流域海拔较高,秋季气温基本在 0°C 以下,秋季降水通过降雪的形式降落到地表,促进冰川的积累,使得玉河、喀河流域的冰川径流受秋季气温的影响也较大。

4 讨论

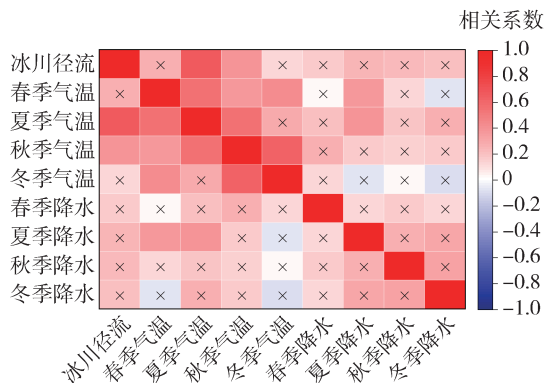
4.1 模型的适用性

从模型评价结果可以看出,未嵌入冰川模块的 SWAT 模型模拟结果与实测径流相比,误差较大,嵌入冰川模块的 SWAT 模型在玉河与喀河流域的模拟效果较好。玉河流域多年(1967—2017 年)平均年径流量模拟值为 22.63 亿 m^3 ,其中冰川径流量为 11.02 亿 m^3 ,冰川径流贡献率为 48.70%(图 4),与陈亚宁等^[32]估算的塔里木河流域的冰川融水贡献率(50%)较为接近。喀河流域多年(1967—2017

×没有通过0.01显著性检验



(a) 玉河流域



(b) 喀河流域

图6 冰川径流与气象因子相关系数

Fig.6 Correlation coefficient between glacier runoff and meteorological factors

年)平均年径流量模拟值为 20.92 亿 m^3 , 冰川径流量为 9.51 亿 m^3 , 冰川径流贡献率为 45.46% (图 4), 与杨针娘^[33]估算的(45.7%)较为接近。因此, 改进的 SWAT 模型不仅可以对高冰川覆盖率流域的水文过程进行较精确的模拟, 也可对高寒山区水文过程研究提供参考。

4.2 径流对气候变化的响应

在气候暖湿化背景下, 和田河流域的冰川径流量呈现出与塔里木盆地其他冰川流域类似的增加趋势^[34-35]。但由于玉河流域与喀河流域气温、降水的增加速率不同, 虽然冰川径流量与出山径流量均呈增加趋势, 但冰川径流占出山径流的比例呈现不同的变化趋势, 表明和田河流域出山径流组分发生了变化。其中, 玉河流域冰川径流贡献率下降的原因之一可能是冰川径流量的上升速率变缓, 冰川径流量可能已到达拐点附近。而喀河流域的冰川径流贡献率的上升趋势表明, 冰川径流量可能还处在加速上升的阶段, 但需进一步确证研究。

近几十年来, 受全球变暖的影响, 冰川普遍萎缩。据第一期、第二期冰川编目数据, 和田河上游冰川面积减少了 16.72%; 1993—2017 年和田河两支流实测出山径流序列的年际变差系数相较于

1967—1992 年增加了 21%, 表明冰川萎缩降低了冰川的多年调节作用^[2], 冰川的调丰补枯作用正在发生着显著变化; 同期, 径流年内分配不均匀系数减少了 6%, 这是由于气温上升引起冰川融化提前, 一定程度上缓解了过去径流年内分配不均的问题。

玉河与喀河同属和田河流域的两条支流, 但各自径流对气候变化的响应却存在一定差异, 主要原因可能是两条支流发源于不同的山系。喀喇昆仑山与昆仑山气候环境不同, 其冰川结构(大小、分布)、动态变化规律也存在一定差异。加之玉河流域实测径流年内分配不均匀系数(0.53)高于喀河流域(0.45), 从水资源高效利用与生态保护的角度, 应该采取不同的人工调控措施对两支流的径流进行调节^[36-39]。

5 结 论

a. 利用嵌入冰川模块的 SWAT 模型模拟和田河上游玉河流域与喀河流域的冰川径流, 率定期与验证期纳什效率系数均在 0.75 以上, 百分比误差均在 10% 以内, 均方根误差与实测值标准差的比值均在 0.5 以内, 表明嵌入冰川模块的 SWAT 模型在玉河流域与喀河流域适用性较好。

b. 1967 年以来, 玉河流域气温、降水与冰川径流均呈显著增加趋势, 冰川径流贡献率呈显著下降趋势, 冰川径流增加对出山径流增加的贡献率约为 31.1%, 冰川径流对出山径流的影响呈下降的趋势; 喀河流域气温呈显著上升趋势, 降水量呈不显著增加趋势, 冰川径流、冰川径流贡献率均呈不显著上升趋势, 冰川径流增加对出山径流增加的贡献率约为 57.38%, 冰川径流对出山径流的影响呈上升的趋势。

c. 1993—2017 年和田河两支流实测出山径流序列的年际变差系数相较于 1967—1992 年增加了 21%, 同期年内径流分配不均匀系数减少了 6%, 冰川面积萎缩降低了冰川的多年调节作用, 一定程度上缓解了径流年内分配不均的问题。

参考文献:

- [1] 陈忠升. 中国西北干旱区河川径流变化及归因定量辨识 [D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [2] 陈仁升, 张世强, 阳勇, 等. 冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 43-69.
- [3] 徐丽萍, 李鹏辉, 李忠勤, 等. 新疆山地冰川变化及影响研究进展 [J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 946-959. (XU Liping, LI Penghui, LI Zhongqin, et al. Advances in research on changes and effects of glaciers in Xinjiang mountains [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 946-959. (in Chinese))

- [4] 张正勇,何新林,刘琳,等. 中国天山冰川生态服务功能及价值评估 [J]. 地理学报,2018,73 (5): 856-867. (ZHANG Zhengyong, HE Xinlin, LIU Lin, et al. Ecological service functions and value estimation of glaciers in the Tianshan Mountains, China [J]. Journal of Geographical Sciences,2018,73(5):856-867. (in Chinese))
- [5] 张九天,何霄嘉,上官冬辉,等. 冰川加剧消融对我国西北干旱区的影响及其适应对策 [J]. 冰川冻土,2012,34 (4): 848-854. (ZHANG Jiutian, HE Xiaojia, SHANGGUAN Donghui, et al. Impact of intensive glacier ablation on arid regions of Northwest China and its countermeasure [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2012,34(4):848-854. (in Chinese))
- [6] 张音,古丽贤·吐尔逊拜,苏里坦,等. 近 60 a 来新疆不同海拔气候变化的时空特征分析 [J]. 干旱区地理,2019,42 (4): 822-829. (ZHANG Yin, TUERXUNBAI Gulixian, SU Litan, et al. Spatial and temporal characteristics of climate change at different altitudes in Xinjiang in the past 60 years [J]. Arid Land Geography, 2019,42(4):822-829. (in Chinese))
- [7] 冯起,高前兆,司建华,等. 干旱内陆河流域水文水资源 [M]. 北京:科学出版社,2019.
- [8] 阿依努尔·买买提,邱玉宝. 近 20 年和田绿洲水资源变化及其驱动力分析 [J]. 干旱区资源与环境,2013,27(4):117-122. (AYNUR Mamat, QIU Yubao. The water resources change and its driving force analysis in Hotan Oasis during the past 20 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2013,27 (4): 117-122. (in Chinese))
- [9] 廖淑敏,薛联青,陈佳澄,等. 塔里木河生态输水的累积生态响应 [J]. 水资源保护,2019,35 (5): 120-126. (LIAO Shumin, XUE Lianqing, CHEN Jiacheng, et al. Cumulative ecological response of ecological water transmission in Tarim River [J]. Water Resources Protection,2019,35(5):120-126. (in Chinese))
- [10] 薛联青,王晶,魏光辉. 基于 PSR 模型的塔里木河流域生态脆弱性评价 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019,47 (1): 13-19. (XUE Lianqing, WANG Jing, WEI Guanghui. Dynamic evaluation of the ecological vulnerability based on PSR modeling for the Tarim River Basin in Xinjiang [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(1):13-19. (in Chinese))
- [11] 薛联青,符芳兵,祝薄丽,等. 塔里木河流域下游绿洲演变对生态输水的响应 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47 (4): 310-316. (XUE Lianqing, FU Fangbing, ZHU Boli, et al. Response of oasis evolution to ecological water transport in the downstream of Tarim River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(4):310-316. (in Chinese))
- [12] 尹振良,冯起,刘时银,等. 水文模型在估算冰川径流研究中的应用现状 [J]. 冰川冻土,2016,38 (1): 248-258. (YIN Zhenliang, FENG Qi, LIU Shiyin, et al. The application progress of hydrological model in quantifying the contribution of glacier runoff to total watershed runoff [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2016,38(1): 248-258. (in Chinese))
- [13] LA FRENIERRE J, MARK B G. A review of methods for estimating the contribution of glacial meltwater to total watershed discharge [J]. Progress in Physical Geography, 2014,38(2):173-200.
- [14] 赵求东,赵传成,秦艳,等. 天山南坡高冰川覆盖率的木扎提河流域水文过程对气候变化的响应 [J]. 冰川冻土,2020,42 (4): 1285-1298. (ZHAO Qiudong, ZHAO Chuancheng, QIN Yan, et al. Response of the hydrological processes to climate change in the Muzati River Basin with high glacierization, southern slope of Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2020,42(4): 1285-1298. (in Chinese))
- [15] 李洪源,赵求东,吴锦奎,等. 疏勒河上游径流组分及其变化特征定量模拟 [J]. 冰川冻土,2019,41 (4): 907-917. (LI Hongyuan, ZHAO Qiudong, WU Jinkui, et al. Quantitative simulation of the runoff components and its variation characteristics in the upstream of the Shule River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2019,41(4): 907-917. (in Chinese))
- [16] ADNAN M, KANG Shichang, ZHANG Guoshuai, et al. Evaluation of SWAT model performance on glaciated and non-glaciated subbasins of Nam Co Lake, Southern Tibetan Plateau, China [J]. Journal of Mountain Science,2019,16 (5): 1075-1097.
- [17] LUO Y, ARNOLD J, LIU S Y, et al. Inclusion of glacier processes for distributed hydrological modeling at basin scale with application to a watershed in Tianshan Mountains, northwest China [J]. Journal of Hydrology, 2013,477:72-85.
- [18] YIN Zhenliang, FENG Qi, LIU Shiyin, et al. The spatial and temporal contribution of glacier runoff to watershed discharge in the Yarkant River Basin, Northwest China [J]. Water,2017,9(3):159.
- [19] 黄领梅,沈冰,宋孝玉,等. 和田河流域地表径流变化分析 [J]. 沈阳农业大学学报,2004 (增刊 1): 513-515. (HUANG Lingmei, SHEN Bing, SONG Xiaoyu, et al. Characteristics of surface water resources in the Hotan River Basin [J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2004 (Sup 1): 513-515. (in Chinese))
- [20] 徐宗学,米艳娇,李占玲,等. 和田河流域气温与降水量长期变化趋势及其持续性分析 [J]. 资源科学,2008 (12): 1833-1838. (XU Zongxue, MI Yanjiao, LI Zhanling, et al. Long-term trends and sustainability analysis of air temperature and precipitation in the Hotan River Basin [J]. Resources Science, 2008 (12): 1833-1838. (in Chinese))
- [21] 叶爱中,夏军,王纲胜,等. 基于数字高程模型的河网提取及子流域生成 [J]. 水利学报,2005,36 (5): 531-537. (YE Aizhong, XIA Jun, WANG Gangsheng, et al. Drainage network extraction and subcatchment delineation

- based on digital elevation model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(5): 531-537. (in Chinese))
- [22] 张行南, 叶丽华, 井立阳. 基于 DEM 的流域流水网对比分析 [J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(3): 1-4. (ZHANG Xingnan, YE Lihua, JING Liyang. Comparison analysis of basin water network based on DEM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(3): 1-4. (in Chinese))
- [23] HOCK R. Temperature index melt modelling in mountain areas [J]. Journal of Hydrology, 2003, 282(1-4): 104-115.
- [24] 付军, 丁志宏, 冯平. 新疆降水量与参考作物腾发量的年际变化特性 [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(6): 44-50. (FU Jun, DING Zhihong, FENG Ping. Characteristics of interannual change of precipitation and reference evapotranspiration in Xinjiang area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6): 44-50. (in Chinese))
- [25] 王文川, 刘献, 徐冬梅, 等. 洛河流域 1961—2016 年径流演变趋势特征分析 [J]. 水资源研究, 2020, 9(1): 52-61. (WANG Wenchuan, LIU Xian, XU Dongmei, et al. Analysis of runoff evolution trend of Luohe River Basin from 1961 to 2016 [J]. Journal of Water Resources Research, 2020, 9(1): 52-61. (in Chinese))
- [26] 张修宇, 左其亭. 变化环境下塔里木河流域径流序列变化特征及成因分析 [J]. 水利水电技术, 2013, 44(10): 6-12. (ZHANG Xiuyu, ZUO Qiting. Analysis on changing characteristics and causation of runoff series of Tarim River Basin under varying environment [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(10): 6-12. (in Chinese))
- [27] 袁飞, 章益棋, 刘懿, 等. 基于标准化帕尔默干旱指数的西江流域干旱评估 [J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 46-52. (YUAN Fei, ZHANG Yiqi, LIU Yi, et al. Drought assessment of Xijiang River Basin based on standardized Palmer drought index [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 46-52. (in Chinese))
- [28] 孙栋元, 齐广平, 鄢继选, 等. 疏勒河干流降水变化特征 [J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 291-303. (SUN Dongyuan, QI Guangping, YAN Jixuan, et al. Research on variation characteristics of precipitation in the mainstream of Shule River [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 291-303. (in Chinese))
- [29] 杨林山. 气候变化与人类活动对洮河流域水文过程的影响 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [30] 赵杰, 徐长春, 高沈瞳, 等. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河流域径流模拟 [J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 666-674. (ZHAO Jie, XU Changchun, GAO Shentong, et al. Hydrological modeling in the Urumqi River Basin based on SWAT [J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 666-674. (in Chinese))
- [31] 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径流模拟研究 [J]. 中国农村水利水电, 2018(12): 94-100. (WAN Hao, DONG Xiaohua, PENG Tao, et al. Application of the SWAT model into the runoff simulation based on SUFI-2 algorithm in the east branch of Huangbai River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(12): 94-100. (in Chinese))
- [32] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展 [J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304. (CHEN Yaning, LI Zhi, FAN Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 69(9): 1295-1304. (in Chinese))
- [33] 杨针娘. 中国冰川水资源 [M]. 兰州: 甘肃科技出版社, 1991: 1-158.
- [34] 赵求东, 叶柏生, 丁永建, 等. 典型寒区流域水文过程模拟及分析 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 595-605. (ZHAO Qiudong, YE Baisheng, DING Yongjian, et al. Hydrological process of a typical catchment in cold region: simulation and analysis [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 595-605. (in Chinese))
- [35] 丁永建, 张世强, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文过程变化研究新进展 [J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 690-702. (DING Yongjian, ZHANG Shiqiang, WU Jinkui, et al. Recent progress on studies on cryospheric hydrological processes changes in China [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 690-702. (in Chinese))
- [36] 王珊珊, 王金林, 周可法, 等. 塔里木河下游土地利用/覆被变化对生态输水的响应 [J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 69-74. (WANG Shanshan, WANG Jinglin, ZHOU Kefa, et al. Response of land-use/land cover change to ecological water conveyance in the lower reach of Tarim River [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 69-74. (in Chinese))
- [37] 吴青松, 马军霞, 左其亭, 等. 塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度量化分析 [J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 55-62. (WU Qingsong, MA Junxia, ZUO Qiting, et al. Quantitative analysis on harmony degree of water resources-economic society-ecological environment coupling system in the Tarim River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 55-62. (in Chinese))
- [38] 黄霄, 雷晓云, 高凡, 等. 奎屯河流域健康评价 [J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 97-104. (HUANG Xiao, LEI Xiaoyun, GAO Fan, et al. Watershed health assessment of Kuitun River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 97-104. (in Chinese))
- [39] 左其亭, 李佳伟, 马军霞, 等. 新疆水资源时空变化特征及适应性利用战略研究 [J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 21-27. (ZUO Qiting, LI Jiawei, MA Junxia, et al. Study on spatio-temporal variation characteristics and adaptive utilization strategy of water resources in Xinjiang [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 21-27. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-01-04 编辑: 施业)