

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0016

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 the Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1285–1298. [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.]

## 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

赵求东<sup>1,2,6</sup>, 赵传成<sup>3</sup>, 秦艳<sup>4</sup>, 苋亚平<sup>1,2</sup>, 王建<sup>5</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 内陆流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州城市学院 地理与环境工程学院, 甘肃 兰州 730070; 4. 新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 5. 盐城师范学院 城市与规划学院, 江苏 盐城 224002; 6. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 木扎提河是天山南坡冰川面积覆盖率最大(48.2%)的河流, 流域径流过程对气候变化极为敏感, 为了合理管理和规划水资源, 确保水资源的可持续利用, 亟需定量评估气候变化对该流域水文过程的影响。以VIC-CAS分布式水文模型为计算平台, 利用实测的径流和两次冰川编目间的冰川面积变化数据开展了模型的多目标参数化校正和验证, 有效提高了模拟结果的“真实性”, 然后通过数值模拟结果结合观测数据定量解析了流域径流的组成、变化特征及对气候变化的响应机理。结果表明: 木扎提河总径流集中在暖季(5–9月), 占全年总径流量的77.9%, 冰川径流、融雪径流和降雨径流分别占总径流量的66.6%、26.4%和7.0%。1971–2010年木扎提河流域气温和降水呈显著增加趋势, 由于降水的增加, 降雨和融雪径流均呈增加趋势, 但冰川径流呈现明显减少趋势, 导致总径流呈现下降趋势。在RCP4.5情景下, 未来该流域气温呈现明显升高趋势, 降水表现为微弱下降趋势; 气候变暖后, 更多降水以降雨形式发生, 未来降雨径流将明显增加, 降雪和融雪径流已于20世纪90年代达到峰值, 随后明显减少; 冰川面积将持续萎缩, 冰川径流于21世纪10年代达到拐点, 随后明显减少, 导致河道总径流量也将明显减少。

**关键词:** 天山南坡; 木扎提河; 冰川变化; 水文过程; 气候变化; 未来预估

**中图分类号:** P333.9    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1285-14

### 0 引言

天山横亘于欧亚大陆腹地, 是全球冰川最为发育的山系之一, 现有10 778条冰川, 冰川面积为 $1.36 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 冰川融水是中亚干旱区河流径流的重要补给, 约占河流径流量的24%<sup>[1-3]</sup>。1960–2010年, 天山山区升温速率为 $0.33 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ , 明显高于全球和中国平均升温速率<sup>[4-5]</sup>。由于气候变暖, 近50年天山山区冰川出现了加速消融及退缩趋势, 冰川退缩了 $(18 \pm 6)\%$ <sup>[6-9]</sup>, 冰川的加速消融短期内可能会

增加流域径流量, 而当冰川面积减少到一定程度, 冰川径流必会趋于减少<sup>[10-13]</sup>。这势必会改变流域的径流组成、水资源量及季节分配, 进而影响新疆及中亚干旱区的生产、生活和生态用水, 加剧绿洲经济和生态系统用水供需矛盾。为了合理管理和规划水资源, 确保社会经济和生态系统可持续发展, 亟需定量评估气候变化背景下, 天山流域冰川变化的未来趋势及其对流域水文过程的影响。

流域水文模型是目前定量解析流域径流组成、变化机理及未来趋势等的重要工具<sup>[14-17]</sup>, 在过去的

收稿日期: 2019-11-14; 修订日期: 2020-04-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19070302); 国家自然科学基金项目(41871059; 41730751; 41771087); 三江源国家公园联合研究专项(LHZX-2020-10)资助

作者简介: 赵求东(1983–), 男, 安徽桐城人, 副研究员, 2011年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 从事寒区水文研究. E-mail: dsllab@163.com

通信作者: 王建, 副教授, 从事寒区水文与环境研究. E-mail: wjshuigong@163.com.

一个世纪内,伴随着水文学和空间技术的发展,涌现出了一大批水文模型。在开展流域水文过程模拟和预估时,选择适合研究流域特征的水文模型是研究的基础<sup>[17]</sup>。一个适合冰川流域径流评估及预估的水文模型,必须包含冰川消融及动态变化方案,目前少数水文模型考虑了冰川水文过程,如仅考虑冰川消融过程的 HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning)<sup>[18]</sup> 和 TAC-d (Tracer Aided Catchment, distributed)<sup>[19]</sup>模型,以及包含冰川消融及动态方案的 SPHY (Spatial Processes in Hydrology)<sup>[20]</sup>、Luo 等<sup>[21]</sup>在 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型基础上发展的 SWAT-RSG 及 Zhao 等<sup>[22]</sup>在 VIC (Variable Infiltration Capacity)模型框架上发展的 VIC-CAS 模型等。总体来看,受数据限制,已发展的包含冰川水文的水文模型大多采用简单、数据易获得的度日因子方法来模拟冰川的消融,以及冰川体积-面积统计关系来模拟冰川面积动态变化过程。

流域水文系统是复杂的巨系统,水文模型是对该复杂系统的高度概化,在水文模拟的实践中,众多参数需要实测数据进行率定,参数取值的适宜性及合理性会直接影响到模拟结果的精度和可靠程度。目前多数研究以观测的径流作为唯一目标开展水文模型参数的优化,使得模拟的径流更接近观测值,这种单一目标的参数优化极易造成“易参同效”问题<sup>[23-24]</sup>。尤其在冰川流域开展径流模拟时,单纯的径流校正可能由于降水的不准确导致冰川消融因子的低估和高估,例如降水的不准确,可能需调整冰川消融因子以高估冰川融水来匹配观测的径流,反之亦然<sup>[22,25-26]</sup>。这会导致模拟、预估结果和径流组分分割结果的不合理,甚至产生相悖的结论,如 Immerzeel 等<sup>[27]</sup>、Su 等<sup>[28]</sup>采用类似的冰川模型对青藏高原几条大河冰川径流未来变化进行了预估,但因参数取值的差异,其结论也存在较大的差异: Immerzeel 等<sup>[27]</sup>认为到 21 世纪中期青藏高原五条大河(长江、雅鲁藏布江、恒河、印度河及黄河)的冰川径流可能减少,而 Su 等<sup>[28]</sup>的研究结果表明到 21 世纪中叶(2041-2070 年)这几条大河的源区冰川径流均继续增加。故有些研究者指出,在冰川流域开展水文模拟时,需在观测径流数据基础上辅以冰川信息数据开展模型相关参数(如度日因子)的优化,以提高模拟结果的“真实性”。目前主要采用的冰川信息数据是观测的冰川物质平衡<sup>[29-34]</sup>,如 Konz 等<sup>[32]</sup>

较早提出了径流结合冰川物质平衡观测数据的模型多目标参数校正; Duethmann 等<sup>[33]</sup>对天山阿克苏河流域进行水文模拟时,详细讨论了冰川物质平衡数据对模型参数校正的必要性。

广袤的天山山区长期观测的冰川只有有限的几条,很多冰川流域内无冰川观测数据,可用于模型校正和验证的数据非常稀少,且鉴于度日因子值极大的空间异质性,采用有限的几条冰川观测的物质平衡率定的度日因子难以代表流域的平均状况。冰川遥感监测是解决该问题的一个重要途径,高分辨光学遥感可在没有地面观测数据情况下,通过多期数字遥感图像可较准确地获得单条冰川的面积变化数据,如中国第一次和第二次冰川编目<sup>[35-36]</sup>数据,这些冰川面积变化数据为冰川流域水文模拟开展多目标参数化校正和验证提供了可能<sup>[22,37]</sup>。

本文选择天山南坡高冰川覆盖率的木扎提河流域为研究对象,采用包含冰川水文过程的 VIC-CAS 水文模型为计算平台,利用观测的径流和两次中国冰川编目的冰川面积变化数据开展模型多目标参数化校正和验证,通过数值模拟和观测数据定量解析流域径流组成、变化特征及对气候变化的响应机理;并采用 IPCC-CMIP5 (the fifth phase of the Coupled Model Inter Comparison Project)气候情景数据探讨该流域未来冰川及径流变化趋势。该研究成果将为当地水资源管理及相关政策制定提供科学依据。

## 1 研究区概况

木扎提河发源于天山南麓汗腾格里峰,是渭干河五条源流中最大的一条,破城子水文站以上集水面积为 2 653 km<sup>2</sup>,海拔为 1 884~6 779 m。流域地势西北高、东南低,水汽主要源自大西洋和北冰洋的暖湿气流,5-9 月的降水量占全年的 70% 左右,降水垂直梯度明显,降水主要集中在高山区。高山区降水量大且气温低,发育有大量的现代冰川,流域内共有 243 条冰川,冰川面积为 1.28×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>,约占流域面积的 48.2%,是新疆主要河流中冰川面积覆盖率最大的河流之一(图 1)。丰富的高山冰川融水是木扎提河的重要补给来源,冰川融水占破城子水文站径流比重高达 81.1%<sup>[38]</sup>。

木扎提河年平均径流量为 14.5×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,是渭干河水量的主要来源,约占总水量的 1/2。木扎提河径流主要集中在 6-8 月,水量约占年径流量的



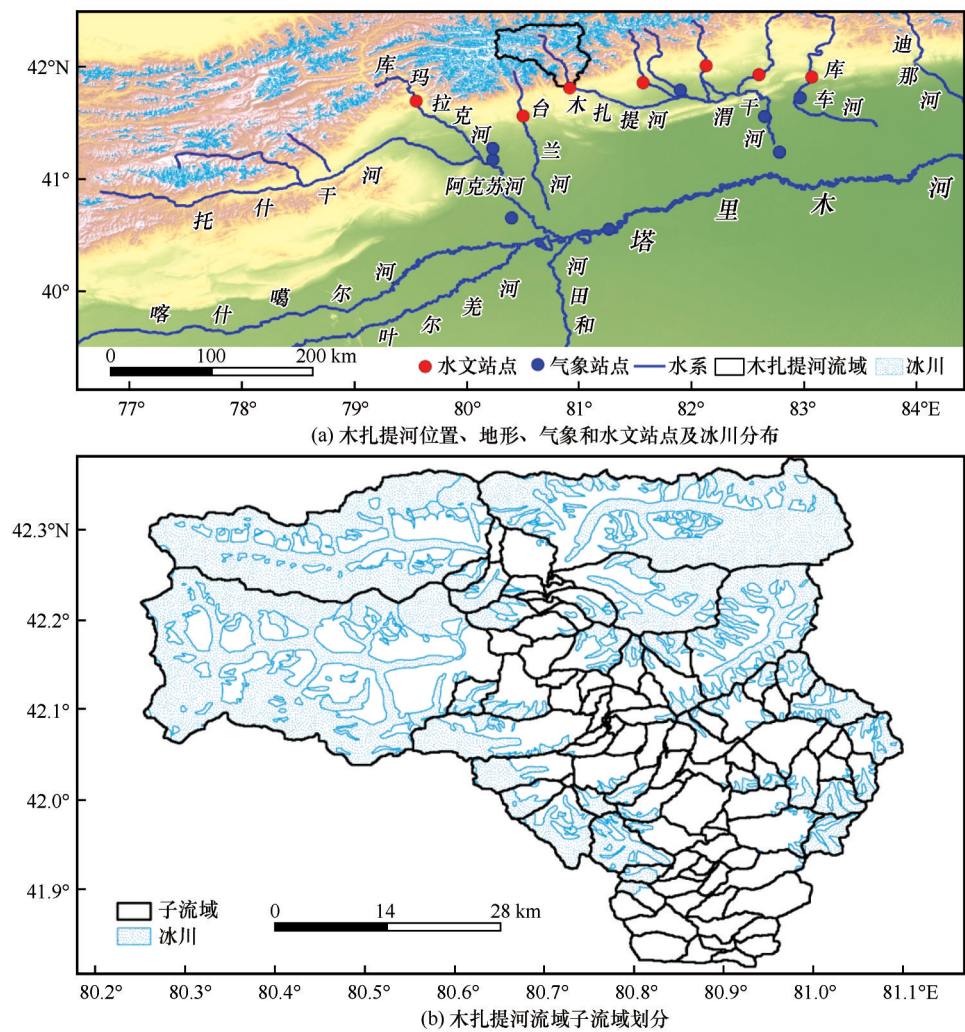


图1 木扎提河流域位置、地形、气象和水文站点、冰川分布(a)以及子流域划分(b)  
Fig. 1 Map showing the Muzat River basin: location, topography, meteorological and hydrological stations, glaciers (a) and sub-basins (b)

69.6%, 主要以冰雪融水为主。木扎提河流域是天山山区冰冻圈最为发育的流域之一, 其径流对气候变暖极为敏感, 亟需定量评估气候变化对该流域水文资源的影响, 以期为下游渭干绿洲水资源可持续利用对策的制定提供科学依据。

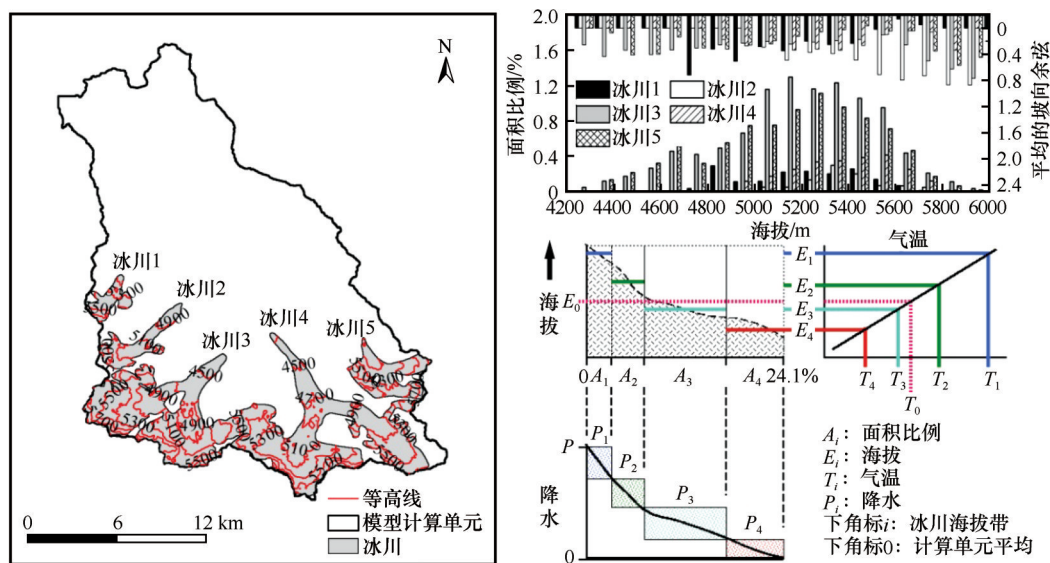
2 数据与方法

2.1 模型简介

VIC 模型是一种基于 SVATS (Soil Vegetation Atmospheric Transfer Scheme) 思想的大尺度分布式水文模型, 由美国华盛顿大学、加利福尼亚大学伯克利分校以及普林斯顿大学共同研制。VIC 是具有物理意义的分布式水文模型, 该模型已经在世界上很多地区得到了广泛应用<sup>[39]</sup>, 其主要特点是: ①考虑陆-气间水分收支和能量收支过程; ②考虑两种

产流机制 (蓄满产流和超渗产流); ③考虑网格内土壤和降水不均匀性对产流的影响; ④包含积雪积消及土壤冻融过程。

鉴于 VIC 不具备冰川水文过程模拟能力, Zhao 等<sup>[22]</sup>结合冰川水文学的理论方法和 VIC 模型的特点, 提出了一套次网格化的冰川水文过程耦合方案, 从而发展出了 VIC-CAS 模型。该方法将模型计算单元设置为子流域, 将子流域中的冰川划分为连续的高程带, 采用梯度方法将子流域计算单元平均的气象驱动数据 (气温、降水) 次网格化到冰川高程带, 然后采用加强的度日因子方法在高程带上计算每条冰川的积累与消融过程, 根据冰川的年物质平衡计算冰川体积变化, 利用冰川面积-体积关系 (V-A scaling law) 计算逐条冰川面积变化。冰川的次网格耦合方案如图 2 所示, 详细计算方法可见文献 [22, 40]。



注：右上角分图中下部柱状图为面积比例，上部柱状图为平均的坡向余弦

图2 VIC-CAS模型子流域计算单元冰川耦合方案

Fig. 2 Coupling scheme of glaciers in the sub-basin calculation unit of VIC-CAS

## 2.2 数据来源

### 2.2.1 气象驱动数据

VIC-CAS模型需要时间序列的气象强迫数据(日降水量,日平均风速,日平均、最高和最低气温)输入。本研究收集了木扎提河流域周边的国家气象及水文站点[图1(a)]1961–2010年的气象观测数据,利用站点观测的气象数据首先分析了研究流域逐月的气温和降水的垂直梯度,然后采用梯度距离平方反比法(Gradient plus Inverse Distance Squared, GIDS)将站点的日气温(日平均、最高和最低气温)和降水观测数据插值到模型计算单元的中心。公式为

$$T_0 = \sum_{i=1}^n \left\{ 1/d_i^2 [T_i + T_{alt,m}(E_0 - E_i)] \right\} / \left( \sum_{i=1}^n 1/d_i^2 \right) \quad (1)$$

$$P_0 = \sum_{i=1}^n \left\{ P_i/d_i^2 [1 + P_{alt,m}(E_0 - E_i)/P_{i,m}] \right\} / \left( \sum_{i=1}^n 1/d_i^2 \right) \quad (2)$$

式中:  $T_0$ 和 $P_0$ 分别为模型计算单元非冰川区的日气温( $^{\circ}\text{C}$ )和降水量(mm);  $T_i$ 和 $P_i$ 分别为第 $i$ 个邻近站点观测的日气温( $^{\circ}\text{C}$ )和降水量(mm);  $E_0$ 为模型计算单元的平均海拔(m);  $E_i$ 为第 $i$ 个邻近站点的海拔(m);  $d_i$ 为第 $i$ 个站点与模型计算单元之间的距离(m);  $P_{i,m}$ 为第 $i$ 个邻近站点 $m$ 月的多年平均降水量(mm);  $T_{alt,m}$ 和 $P_{alt,m}$ 分别为研究区 $m$ 月气温的海拔梯度( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ )和降水的海拔梯度( $\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$ );  $n$ 为邻近的站点个数。

模型的日平均风速驱动数据利用站点观测值采用简单的反距离权重插值法(Inverse Distance

Weighted, IDW)获得。

$$v_0 = \sum_{i=1}^n (1/d_i^2 \times v_i) / \left( \sum_{i=1}^n 1/d_i^2 \right) \quad (3)$$

式中:  $v_0$ 为模型计算单元的日均风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $v_i$ 为第 $i$ 个邻近站点观测的日平均风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

### 2.2.2 未来气候情景数据及降尺度

IPCC-CMIP5的全球气候模式(Global Climate Model, GCM)输出数据是进行未来径流预估的气候驱动数据集,目前参与CMIP5计划的GCM多达40个,且不同模式输出的结果差异很大。本文从中选取了数据完整的30个GCM,并提取研究流域1971–2005年和RCP4.5排放情景下的2041–2070年的模拟数据。分析2041–2070年相比基准期(1971–2005年)平均的气温和降水量变化情况,从中选择接近平均水平的5个GCM开展径流的未来变化研究(图3)。GCM的模拟数据由CEDA(Centre for Environmental Data Analysis, <http://www.ceda.ac.uk>)提供,数据包括基准期和RCP4.5排放情景下未来(2006–2100年)的日降水量,日平均风速,日平均、最高和最低气温。

GCM输出结果的空间分辨率一般较低,无法直接用于驱动水文模型,故需要进行降尺度处理。统计降尺度方法是目前水文模拟中常采用的一种降尺度方法,即建立GCM历史模拟的气候要素与区域观测气象要素之间的数学关系,并将这种关系应用到GCM输出的大尺度未来气候情景数据,从

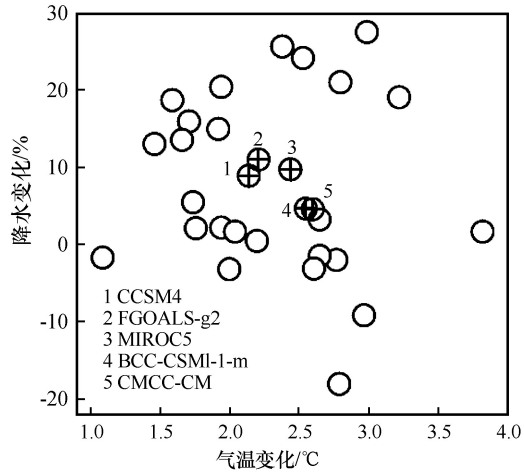


图3 RCP4.5情景下全球气候模式预估的2041–2070年年降水和平均气温相对于1971–2005年的变化(⊕标注的是选出的5个模式)

Fig. 3 Changes of annual precipitation and average air temperature from 2041 to 2070 as compared with that from 1971 to 2005 estimated by GCMs under RCP4.5 scenario (the selected five GCMs were marked by ⊕)

而获得区域未来气候变化情景。本研究采用QDM (bias-correction with quantile delta mapping) 统计降尺度方法<sup>[41–42]</sup>对GCM的输出数据进行降尺度。具体计算方案为

$$\hat{x}_{s,r}(t) = F_{o,r}^{-1} \left\{ F_{s,r} \left[ x_{s,r}(t) \right] \right\} \quad (4)$$

$$\Delta_s(t) = \begin{cases} x_{s,f}(t) / F_{s,f}^{-1} \left\{ F_{s,r} \left[ x_{s,f}(t) \right] \right\} & \text{降水量} \\ x_{s,f}(t) - F_{s,f}^{-1} \left\{ F_{s,r} \left[ x_{s,f}(t) \right] \right\} & \text{其他气象要素} \end{cases} \quad (5)$$

$$\hat{x}_{s,f}(t) = \begin{cases} F_{o,r}^{-1} \left\{ F_{s,r} \left[ x_{s,r}(t) \right] \right\} \Delta_s(t) & \text{降水量} \\ F_{o,r}^{-1} \left\{ F_{s,r} \left[ x_{s,r}(t) \right] \right\} + \Delta_s(t) & \text{其他气象要素} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $F_{o,r}$  和  $F_{s,r}$  分别为基准期(1961–2005年)站点观测和站点所在GCM格网模拟的日气象数据经验累积分布函数;  $F_{s,f}$  为未来两个时段(2011–2055年、2056–2100年)GCM模拟的日气象数据经验累积分布函数;  $x_{s,r}(t)$  和  $x_{s,f}(t)$  分别为GCM模拟的基准期和未来时段的模式输出日气象数据;  $\Delta_s(t)$  为同一分位点基准期和未来时段GCM模拟的气象数据之间的相对差异;  $\hat{x}_{s,r}(t)$  和  $\hat{x}_{s,f}(t)$  为降尺度后基准期和未来时段的日气象数据。算法细节见文献<sup>[41–42]</sup>。

### 2.2.3 其他数据

采用的冰川数据来自于中国第一次和第二次冰川编目。中国第一冰川编目数据以20世纪50–80年代的航摄地形图和航空相片为主要数据源制

作而成,第二次冰川编目以2004–2011年较高分辨率(30 m)的Landsat TM/ETM+遥感卫星数据为主要数据源提取而成。本研究采用第一次冰川编目的冰川数据作为模型的输入,第二次冰川编目的冰川数据作为模型的校正和验证数据。

模型所需土壤数据来自于联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)土壤数据库(5'×5'),该数据库提供了全球土壤特性数据,包括饱和传导度、凋萎含水量、田间持水量、土壤质地等<sup>[43]</sup>。植被分类及参数数据(月平均反照率、叶面积指数等)来自于美国马里兰大学(University of Maryland, UMD)1 km全球地表覆盖数据产品<sup>[44]</sup>,然后统计模型计算单元内各植被类型所占比例。ASTER GDEM V2(30 m×30 m)的高程数据<sup>[45]</sup>用以获取研究流域内冰川的地形分布特征及流域的汇流信息等。

将收集的木扎提河破城子水文站1971–2006年月径流观测数据序列分成两个时段:1971–1990年用于参数率定,1991–2006年用于参数验证。

### 2.3 模型设定及参数校正

根据流域特征及冰川分布,将研究流域分为100个子流域[图1(b)],子流域平均面积为26.5 km<sup>2</sup>。为了准确估算冰川和积雪消融,在每个模型计算单元内,冰川区以100 m间隔分成若干冰川高程带,非冰川区则划分成12个积雪高程带。鉴于无准确的初始状态输入,模型采用1961–1970年作为模型预热期,1971年后的模拟结果才用于模型校正、验证及后期分析,模型的模拟时间步长为天。

为了提高模型的模拟精度,采用第二次冰川编目的冰川数据和观测的月径流数据来校正模型。鉴于VIC-CAS模型的复杂程度和运行时间过长问题,本文根据网站(<https://vic.readthedocs.io/en/master/>)的相关介绍,采用手动参数率定。

整个校正过程分成两步:

第一步,利用模拟值和第二次冰川编目的逐条冰川面积数据进行对比,对冰川模型中的度日因子(DDF<sub>snow/ice</sub>)及坡向消融影响系数( $R_{exp}$ )进行校正。为了更准确地获得冰川水文相关参数,将流域内冰川按照面积分成了<1 km<sup>2</sup>、1~6 km<sup>2</sup>和>6 km<sup>2</sup>三个级别,并且在每级别随机选取一半冰川作为模型校正数据,另一半作为验证数据。采用纳什效率系数 $N_s$ 和相对偏差 $Er$ 来评价模型对各级别冰川



的模拟效果,再利用面积权重求和的方法获取模型对冰川模拟的总体效果,利用最小化目标函数  $Obj_g$  来优化模型中与冰川相关的参数<sup>[46]</sup>。具体计算公式为

$$Ns_g = \sum_{i=1}^4 \left( A_i / A_t \times Ns_{g,i} \right) \quad (7)$$

$$Er_g = \sum_{i=1}^4 \left( A_i / A_t \times Er_{g,i} \right) \quad (8)$$

$$Obj_g = \left( 1 - Ns_g \right) + 5 \times \left| \ln \left( 1 + Er_g \right) \right|^2 \quad (9)$$

式中:  $Ns_{g,i}$  和  $Er_{g,i}$  分别为模型对第  $i$  级冰川模拟的纳什效率系数和相对偏差;  $A_i$  为第  $i$  级冰川的总面积;  $A_t$  为流域内冰川的总面积;  $Ns_g$  和  $Er_g$  分别为模型对冰川总体模拟的纳什效率系数和相对偏差。

第二步,利用 1971—1990 年观测和模拟的月径流,采用类似于冰川参数优化的方法,对 VIC 模型中关键的土壤参数[土壤可变下渗曲线参数  $b_{infiltr}$ 、三层土壤层厚度( $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ )及影响基流的参数( $Ds$ ,  $Ds_{max}$  和  $Ws$ )]进行校正。

纳什效率系数( $Ns$ )和相对偏差( $Er$ )计算公式为

$$Ns = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (10)$$

$$Er = 100 \times \left( \frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim,i} - \sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \right) \quad (11)$$

式中:  $Q_{obs,i}$  和  $Q_{sim,i}$  分别为第  $i$  个观测和模拟的月径流( $m^3 \cdot s^{-1}$ )或冰川面积( $m^2$ );  $\overline{Q_{obs}}$  为  $n$  个观测数据的平均值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 模型的校正与验证

利用实测径流和两次冰川编目间的冰川面积变化数据开展模型的多目标参数化校正,经过多次重复试验最终完成模型主要参数的校正,结果见表 1。图 4 给出了冰川面积模拟和观测对比,及模拟效果检验情况。结果表明,经过参数优化后,该模型对不同规模校正和验证冰川的面积模拟均取得比较理想的结果,特别是对大冰川的模拟效果更为优良,纳什效率系数( $Ns$ )均达到 0.75 以上,确定系数( $R^2$ )达到 0.80 以上,且相对偏差( $Er$ )也控制在  $\pm 11\%$  以内。图 5 给出了木扎提河校正期和验证期月径流模拟与实测对比结果,通过调整模型参数,模型能够很准确地模拟率定期和验证期的月径流量。在校正期和验证期,月值模拟的纳什效率系数( $Ns$ )和确定系数( $R^2$ )均高于 0.96,且模拟时段的相对偏差( $Er$ )也非常小,小于 2%。综上所述, VIC-CAS 水文模型对研究流域的冰川和径流模拟效果非常理想。

表 1 木扎提河流域主要模型参数取值

Table 1 Main model parameters for the Muzati River basin

参数	定义及单位	取值
$DDF_{snow}$	冰川区雪的度日因子( $mm \cdot ^\circ C^{-1} \cdot d^{-1}$ )	3.02
$DDF_{ice}$	冰川冰的度日因子( $mm \cdot ^\circ C^{-1} \cdot d^{-1}$ )	4.53
$R_{exp}$	坡向对消融的影响系数	0.5
$b$	可变下渗率曲线指数	0.1
$Ds_{max}$	基流最大流速( $mm \cdot h^{-1}$ )	10
$Ds$	非线性基流发生时流速占 $Ds_{max}$ 的比例	0.4
$Ws$	基流非线性增长时第三层土壤含水量占最大土壤含水量的比例	0.5
$d_1$	第一层土壤厚度(m)	0.1
$d_2$	第二层土壤厚度(m)	0.9
$d_3$	第三层土壤厚度(m)	1.9

#### 3.2 径流组成及其对气候变化的响应

运用已率定好的 VIC-CAS 水文模型,模拟了 1971—2010 年的径流过程,统计该时段多年平均的月降水、降雪、径流过程及组成,如图 6 所示。研究流域多年平均降水量为 474.6 mm,降水集中在暖季(5—9 月),占全年降水量的 92.3%,降水峰值出现在 6 月。研究流域海拔高,平均海拔高达

3 962.1 m,常年均有降雪发生,多年平均降雪量为 281.6 mm,占总降水量的 59.3%,也主要集中在暖季。冰雪融水是河道径流量的最主要补给来源,冰雪融水占总径流的比例高达 93%,其中冰川径流所占比例最大,达到了 66.6%。融雪径流主要集中在暖季,融雪开始于 4 月,在 7 月达到峰值,至 10 月底结束,但由于大量的融雪水会渗入土壤,然后缓

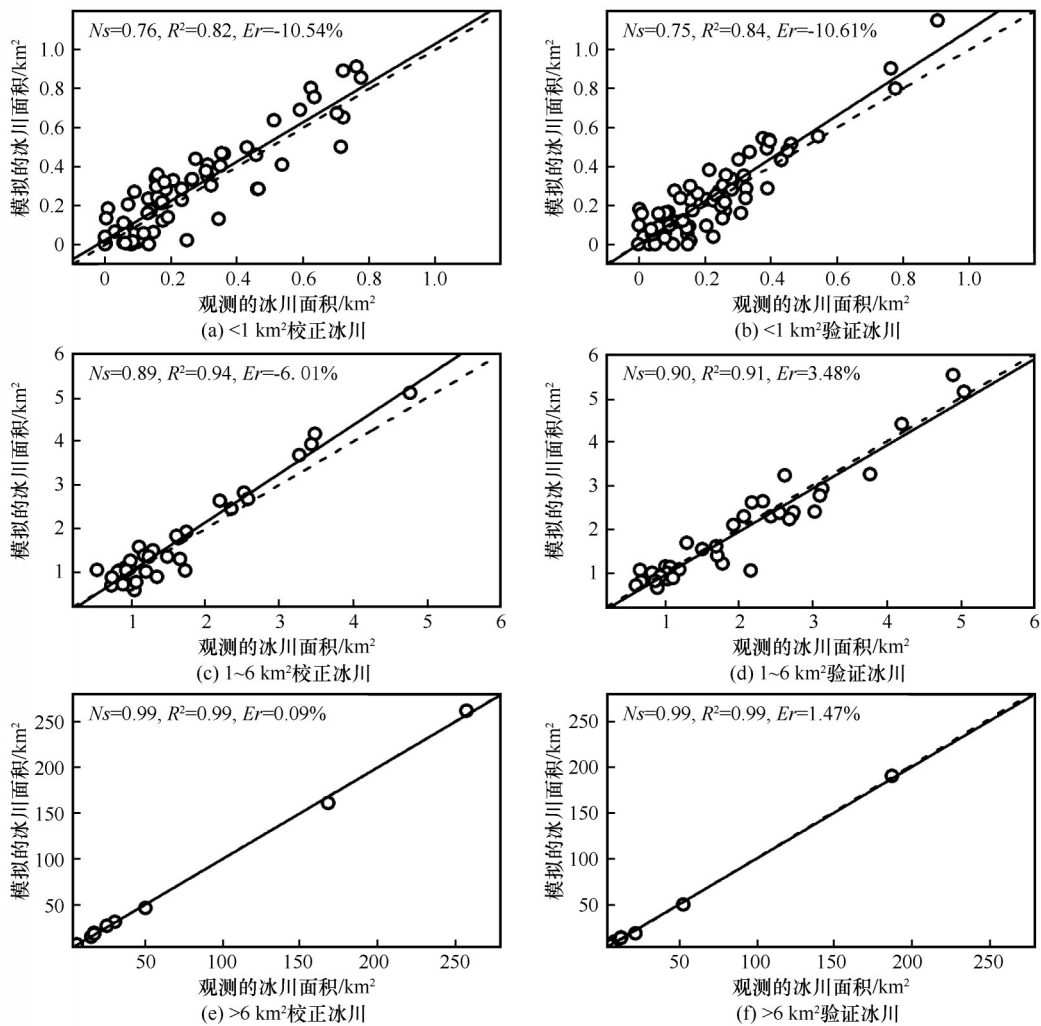


图4 不同级别(<1 km², 1~6 km², >6 km²)校正和验证冰川的面积模拟和观测对比

Fig. 4 Comparisons between simulated and observed glacier areas for calibration and validation sets at <1 km², 1~6 km², and >6 km² classes

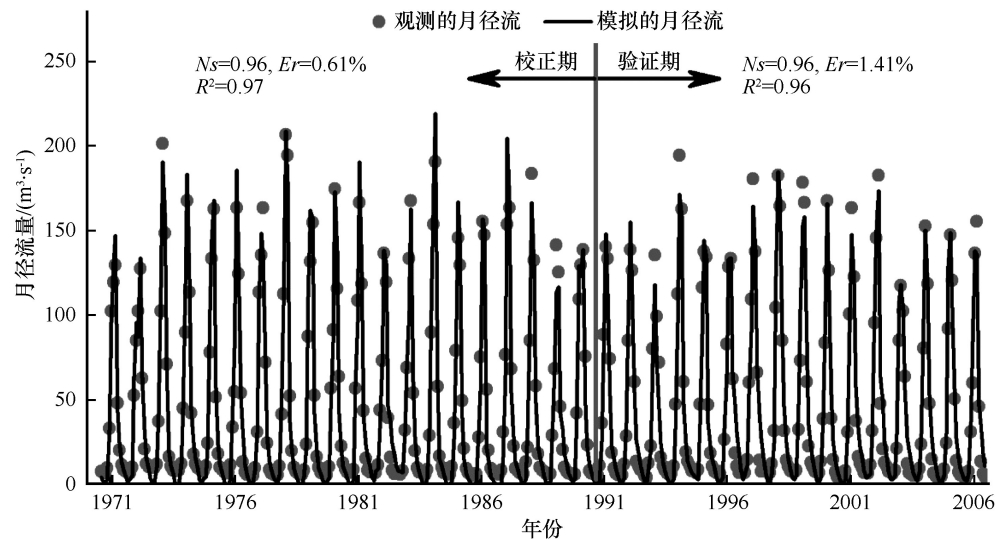


图5 1971—2006年模拟和观测的月径流对比

Fig. 5 Variations of the simulated and observed monthly runoffs during 1971—2006, calibration period and validation period can be divided

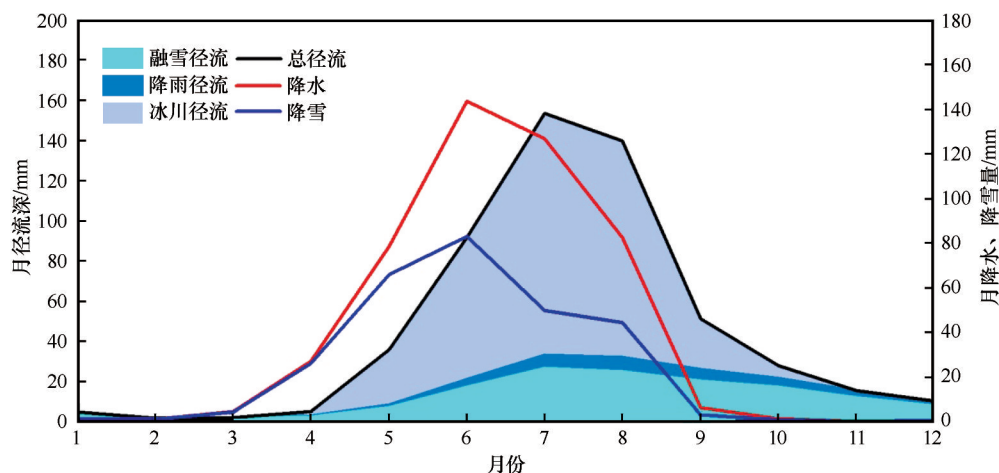


图6 木扎提河流域降水、降雪、融雪径流、降雨径流、冰川径流及总径流的年内变化

Fig. 6 Monthly variations of precipitation, snowfall, snowmelt runoff, rainfall runoff, glacier runoff and total runoff in the Muzati River basin

慢释放,所以全年都有融雪径流的发生;冰川径流于4月开始产生,于7月达到峰值,至10月结束;鉴于冰川径流在总径流中的高贡献,总径流的年内变化与冰川径流变化极为一致,也集中在暖季,暖季总径流占年总径流量的77.9%,7月达到峰值,9月之后急剧下降。

在过去40年,木扎提河流域年平均气温呈显著上升趋势,变化率为 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ,年降水总量呈显著增加趋势,变化率为 $32.0\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ,其中降雨增加趋势显著 $[31.3\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ ,而降雪的变化趋势不显著 $[0.7\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ [图7(a)]。降水径流的变化与降水变化趋势一致,降雨径流呈显著增加趋势,融雪径流表现为不显著增加。但由于冰川径流呈现明显的下降趋势,以至于观测和模拟的总径流均呈现不显著的下降趋势,变化率为 $-0.02\times 10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ [图7(b)]。在气候暖湿背景下,该流域的冰川径流并没有表现出天山其他冰川流域类似的增加趋势<sup>[47-50]</sup>,为解释这一变化原因,本文分析了流域平均的冰川物质平衡变化情况,如图7(c)所示。从模拟的冰川物质平衡来看,冰川整体处于亏损状态,40年累积冰川物质平衡为 $-9.69\text{ m}$ ,但是年冰川物质平衡的变化趋势却呈现出不显著的增加趋势,即冰川未加速亏损。在过去40年,气温上升使得冰面消融强度有所增加,但由于降水的增加又会抑制冰川消融,导致冰川物质平衡表现为不明显的上升趋势。考虑到冰川面积减少(1971–2010年冰川面积减少了约15.0%)的影响,故冰川径流表现出较为明显的下降趋势。

### 3.3 流域冰川及径流未来变化预估

利用降尺度后的气候情景数据驱动率定好的VIC-CAS水文模型,对木扎提河流域未来的冰川和径流变化进行了系统预估。图8(a)给出降尺度后气候情景预估的未来流域平均气温和降水的变化情况,在RCP4.5排放情景下,未来气温呈现出明显增加的趋势,相对于参考期(1971–2010年),21世纪中期(2041–2060年)和21世纪末(2081–2100年)的气温分别升高 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;未来降水表现出微弱的减少趋势,21世纪中期和末期的降水相比参考期减少4.1%和3.6%;由于气温升高导致更多降水以降雨形式发生,年降雪量于2000年前后达到峰值,随后明显下降,21世纪中期和末期的降雪量相比参考期减少42.9%和47.7%。

图8(b)和8(c)给出预估的流域冰川及径流未来变化状况。由于气温升高,冰川加速消融退缩,到2060年,流域冰川面积相比2010年将减少17.9%,到21世纪末,冰川面积将减少23.2%[图8(b)]。气温升高加速了消融,但由于冰川的退缩,该流域的冰川径流于21世纪10年代达到拐点,随后开始下降,21世纪中期和末期的冰川径流相比参考期分别减少26.4%和40.6%。由于降雪量的减少,融雪径流明显减少,21世纪中期和末期的融雪径流相比参考期分别减少10.0%和14.8%;降雨径流呈现增加趋势,21世纪中期和末期的降雨径流相比参考期分别增加85.9%和98.7%。由于高贡献率的冰川径流减少,河道径流也呈现减少趋势,21世纪中期和末期的总径流相比参考期将分别减少14.1%和24.0%[图8(c)]。



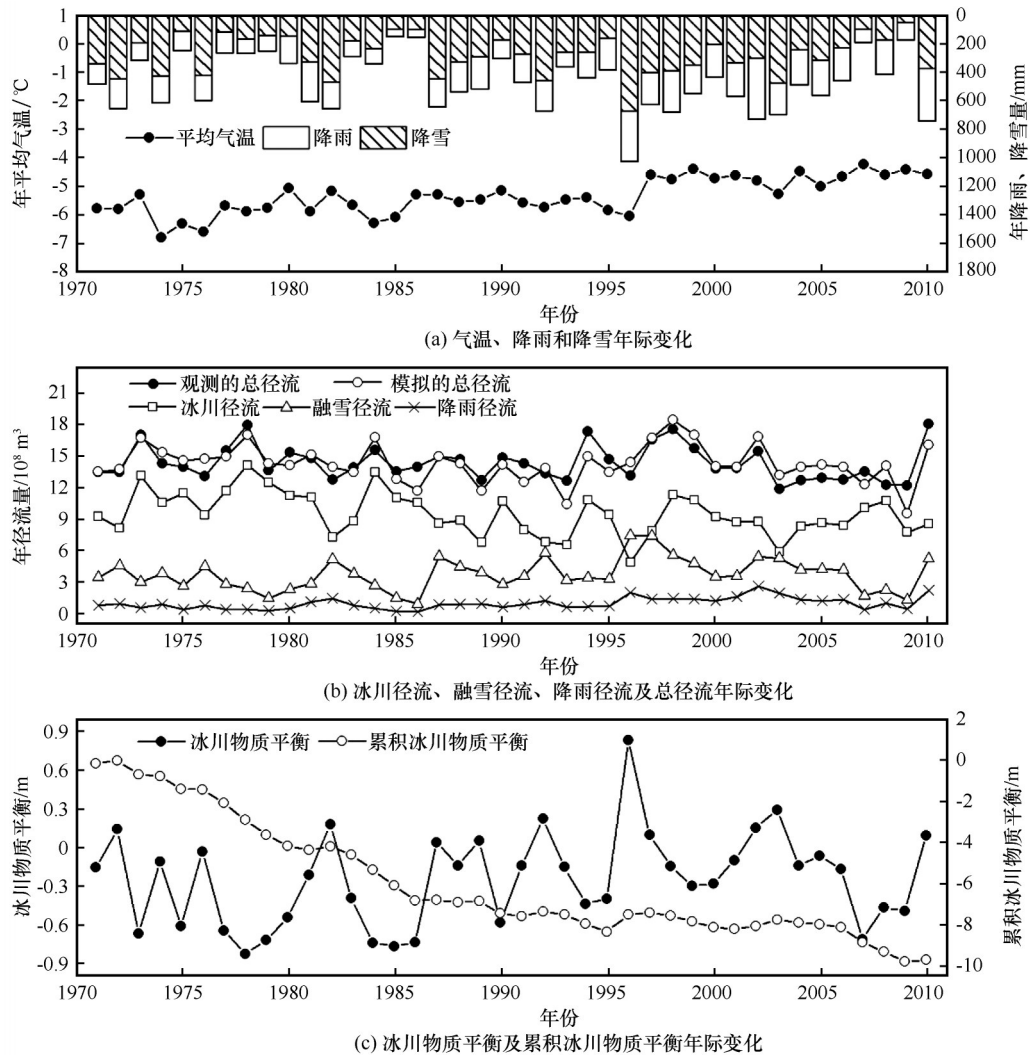


图7 1971—2010年木扎提河流域气温、降雨、降雪(a)、冰川径流、融雪径流、降雨径流、总径流(b)、冰川物质平衡及累积冰川物质平衡(c)的年际变化

Fig. 7 Annual variations of air temperature, rainfall, snowfall (a), glacier runoff, snowmelt runoff, rainfall runoff, total runoff (b), glacier mass balance and accumulative mass balance (c) during 1971—2010 in the Muzati River basin

本文也分析了未来径流年内分配情况,如图9所示。从图6和图9看出,未来总径流年内分配形式未发生明显变化。未来总径流会减少,但冷季总径流却有微弱增加,暖季总径流减少非常明显;研究区海拔高,高山区暖季仍有降雪,由于气温升高,更多的降水将以降雨发生,故暖季的降雨径流增加非常明显;由于气候变暖,冰川消融有所提前,以至于在总冰川径流减少情况下,4月的冰川径流仍有所有增加。

#### 4 讨论

在过去半个多世纪,天山山区气温升高是个不争的事实,一些研究表明气温升高导致冰川消融加剧,天山大部分流域冰川径流量呈现出明显增加的

趋势<sup>[47]</sup>,如天山南坡的台兰河<sup>[48]</sup>及库玛拉克河<sup>[33,49-50]</sup>。而本文对木扎提的径流模拟结果却表明,在过去40年,冰川径流总体呈现下降趋势,为了验证该研究结果的合理性,选择研究流域周边三条天山南坡不同冰川覆盖率的河流(库车河0.7%、台兰河32.6%、库玛拉克河24.1%,见图1)1971—2010年径流观测数据进行对比分析[图10(a)]。从图中可以看出,在过去40年,低冰川覆盖率的库车河(冰川融水补给率为7.4%)年径流表现为显著上升趋势 $[19.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}]$ ,该流域的年径流变化趋势基本可反映天山南坡的降水径流变化特征,即年降水径流呈现出显著增加趋势。三条高冰川覆盖率流域的年径流波动特征存在一定差异,台兰河年径流波动特征与其他两条河流有较大差异,这可能由

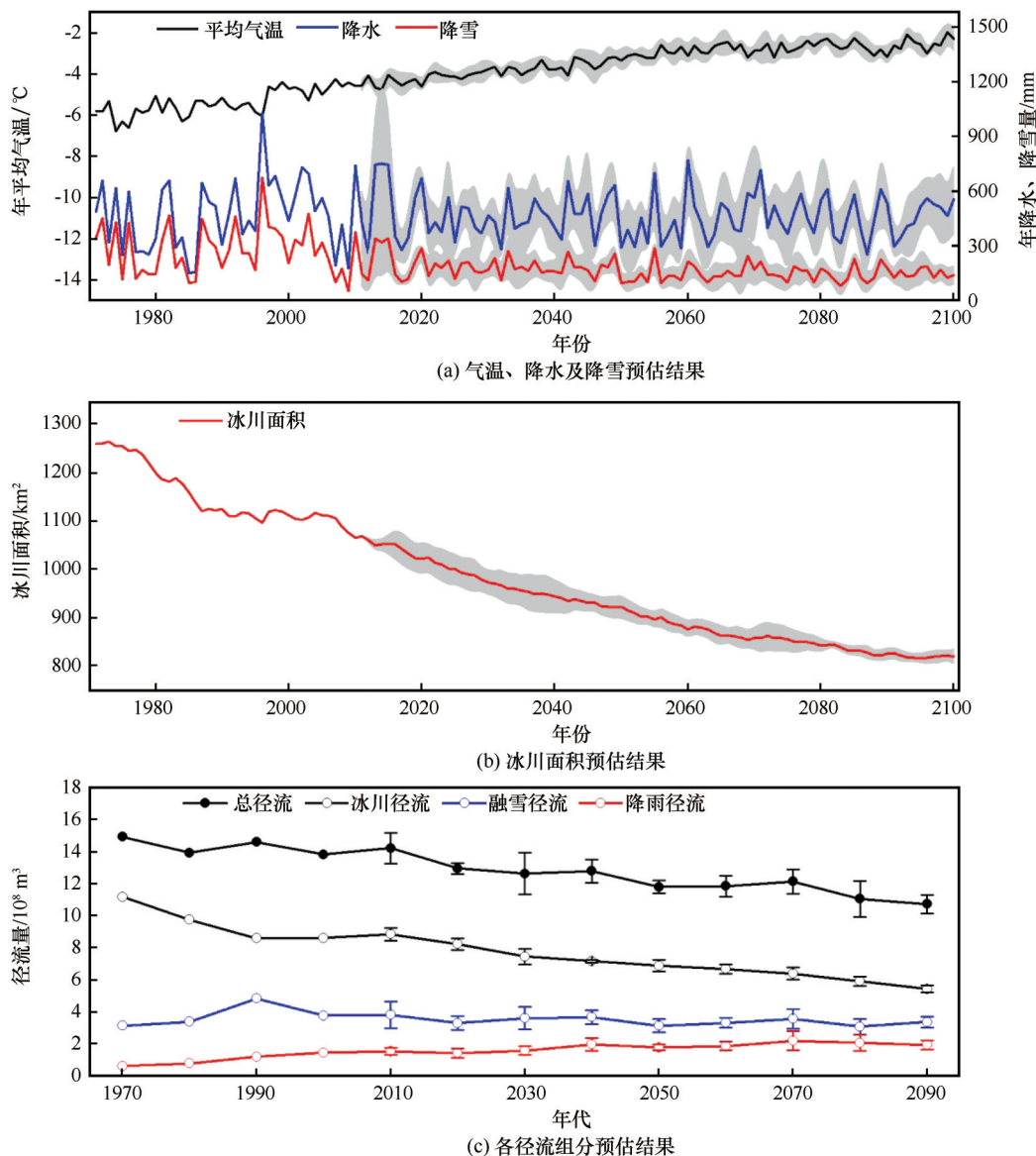


图8 RCP4.5情景下木扎提河流域气温、降水、降雪(a),冰川面积(b)及各径流组分(c)的未来变化预估结果  
(灰色阴影表示利用5个GCM数据模拟的结果范围)

Fig. 8 Projection of future changes of air temperature, precipitation, snowfall (a), glacierized area (b), and runoff components (c) under RCP4.5 scenario in the Muzati River basin

于流域的冰川覆盖率及地形差异所导致。在过去40年,台兰河和库玛拉克河的年径流均呈现明显增加趋势,分别为  $20.0 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$  和  $19.0 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,但冰川覆盖率最大(48.2%)的木扎提河总径流却表现为不明显减少趋势[ $-6.85 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ]。从天山南坡不同冰川覆盖率流域观测径流的变化特征对比来看,在降水径流明显增加的趋势下[约  $19.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ],台兰河和库玛拉克河的冰川径流即便增加,其增加趋势也是有限的,而总径流呈现下降趋势的木扎提河冰川径流极可能表现为下降的趋势特征,这与本研究中冰川径流模拟值的变

化趋势一致。

在过去半个世纪,天山南坡冰川面积减少量超过了10%<sup>[47]</sup>,但目前估算流域冰川融水研究多未考虑冰川面积退缩的影响<sup>[33,48-50]</sup>,这势必会高估冰川融水量和变化趋势。图10(b)给出了不考虑冰川面积变化情况下的木扎提河径流模拟结果,从图中可以看出,不考虑冰川面积变化情况下模拟的总径流和冰川径流均呈现显著增加趋势,这与观测的径流变化趋势不一致,说明在开展长时间的冰川径流模拟时,考虑冰川面积退缩的影响势在必行。

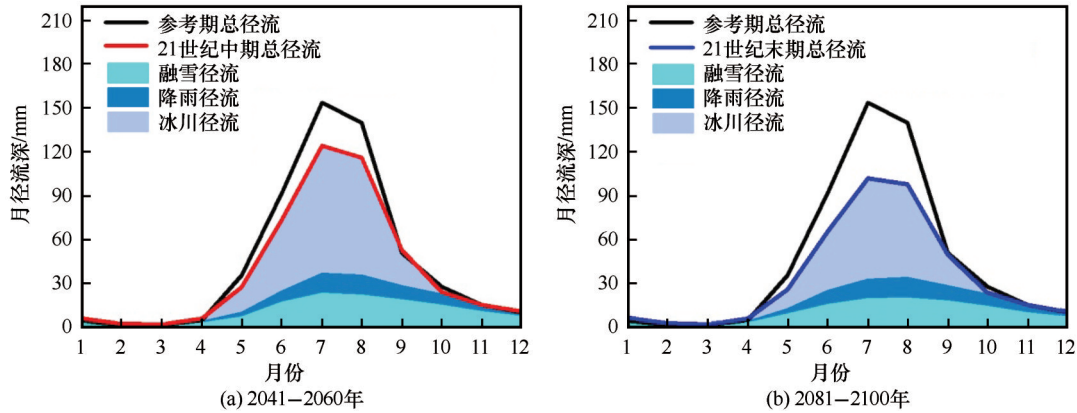


图9 RCP4.5情景下木扎提河流域21世纪中期(a)和末期(b)各径流组分年内分配变化

Fig. 9 Monthly variations of snowmelt runoff, rainfall runoff, glacier runoff and total runoff during 2041 – 2060 (a) and 2081 – 2100 (b) under RCP4.5 scenario in the Muzati River basin

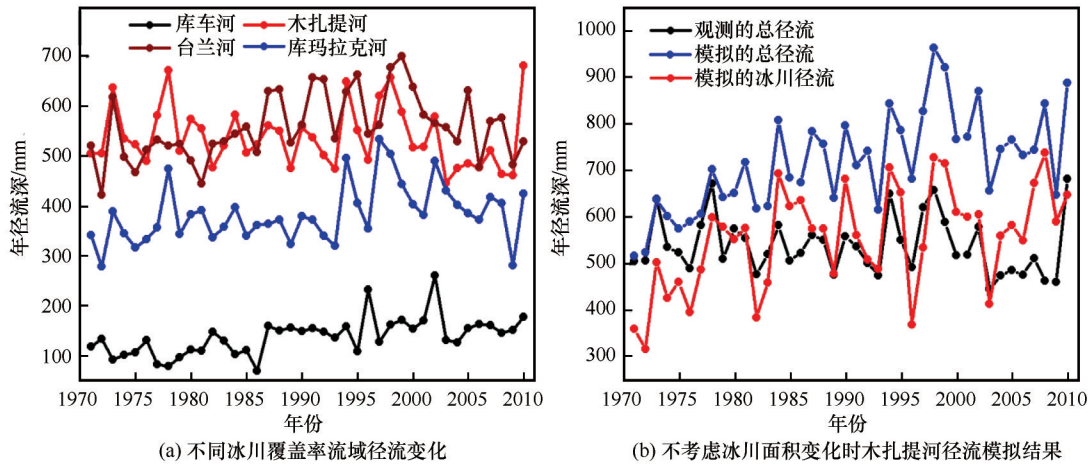


图10 天山南坡四个不同冰川覆盖率流域年径流深变化(a)以及不考虑冰川面积变化时模拟的木扎提河年径流深变化(b)  
Fig. 10 Annual variations of runoff depth of the four glacierized catchments on the southern slope of the Tianshan Mountains (a) and annual variations of simulated runoff depth without considering glacierized area evolution in the Muzati River basin (b)

## 5 结论

本文利用增加了冰川消融及动态方案的VIC-CAS分布式水文模型,通过数值模拟,定量解析木扎提河流域径流组成特征,分析各径流组分的年内和年际变化特征和机理,并对冰川和径流的未来变化进行预估,研究可为水资源管理提供重要依据。结论如下:

(1) 本文利用观测的径流和两次冰川编目的冰川数据,采用两步校正的方法开展模型参数的优化工作,从而获得良好的冰川面积及径流模拟效果,表明该模型在木扎提河流域具有较好的适用性,能够进一步分析径流组成及变化特征。

(2) 木扎提河流域径流主要集中于暖季(5–9月),占全年77.9%,7月达到峰值。冰雪融水是河道径流量的主要补给来源,对总径流的贡献高达

93%,其中冰川径流所占比例最大,达到了66.6%。

(3) 通过数值模拟结合观测数据,对过去40年径流变化进行分析表明,木扎提河流域降水和气温呈现显著增加趋势。由于降水的增加,融雪径流和降雨径流均呈增加趋势;尽管气温升高,但降水的增加一定程度上抑制了冰川消融,以至于该流域冰川径流表现出明显的下降趋势;在降雨、融雪、融冰的共同作用下,总径流表现出不显著的下降趋势。

(4) 利用IPCC-CMIP5中5个GCM在RCP4.5排放情景下的气候预估数据,通过降尺度后驱动VIC-CAS水文模型,预估了21世纪气候变化对木扎提河流域冰川年径流量及径流季节性分配的影响。结果表明:该流域平均气温呈显著上升趋势,降水总体呈微弱的减少趋势;气温升高导致更多降



水以降雨形式发生,以至于融雪径流明显减少,降雨径流呈现增加趋势;由于气温升高,冰川加速消融萎缩,到21世纪末,冰川面积将减少23.2%;流域的冰川径流于21世纪10年代达到拐点,随后开始下降,冰川径流的明显减少使得总径流呈现明显减少趋势,到21世纪末,相比参考期,总径流减少24.0%;未来总径流年分配形式未发生明显改变,暖季总径流减少趋势相比更为明显。

### 参考文献(References):

- [1] Chen Yaning, Li Weihong, Deng Haijun, et al. Changes in Central Asia's water tower: past, present and future[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6 [2019-12-24]. <https://www.nature.com/articles/srep39364>.
- [2] Shi Yafeng. *Glaciers and related environments in China*[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [3] Singh M P, Singh P, Haritashya U. *Encyclopedia of snow, ice and glaciers*[M]. London: Springer, 2011.
- [4] Zhang Zhengyong, Liu Lin, Tang Xiangling. The regional difference and abrupt events of climatic change in Tianshan Mountains during 1960–2010[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(11): 1475–1484. [张正勇, 刘琳, 唐湘玲. 1960–2010年中国天山山区气候变化区域差异及突变特征[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(11): 1475–1484.]
- [5] Xu Min, Kang Shichang, Wu Hao, et al. Detection of spatio-temporal variability of air temperature and precipitation based on long-term meteorological station observations over Tianshan Mountains, Central Asia[J]. *Atmospheric Research*, 2018, 203: 141–163.
- [6] Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Evaluation of the impacts of climate change and human activities on the hydrological environment in Central Asia[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 222–230. [姚俊强, 杨青, 毛炜峰, 等. 气候变化和人类活动对中亚地区水文环境的影响评估[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 222–230.]
- [7] Liang Pengbin, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. Temporal and spatial variation characteristics of mass balance of global reference glaciers from 1984 through 2016[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(3): 415–425. [梁鹏斌, 李忠勤, 张慧, 等. 1984–2016年全球参照冰川物质平衡时空变化特征[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(3): 415–425.]
- [8] Aizen V B, Kuzmichenok V A, Surazakov A B, et al. Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 202–213.
- [9] Mu Jianxin, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. The global glacierized area: current situation and recent change, based on the Randolph Glacier Inventory (RGI 6.0) published in 2017[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 238–248. [牟建新, 李忠勤, 张慧, 等. 全球冰川面积现状及近期变化: 基于2017年发布的第6版Randolph冰川编目[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(2): 238–248.]
- [10] Farinotti D. Asia's glacier changes[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(9): 621–622.
- [11] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia)[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(10): 725–731.
- [12] Gan Rong, Luo Yi, Zuo Qiting, et al. Effects of projected climate change on the glacier and runoff generation in the Naryn River basin, Central Asia[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 240–251.
- [13] Hu Ruji, Chen Xi, Ge Yongxiao, et al. Evaluation on the impacts of cryospheric processes on the hydrological environment in arid land of China[J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32(1): 1–6. [胡汝骥, 陈曦, 葛拥晓, 等. 冰冻圈过程对中国干旱区水文环境的影响评估[J]. *干旱区研究*, 2015, 32(1): 1–6.]
- [14] 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]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295–1304. [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.]
- [15] Wang Xiaolei, Sun Lin, Zhang Yiqing, et al. Runoff generation in the headwater of Amu Darya, Central Asia[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(3): 364–372. [王晓蕾, 孙林, 张宜清, 等. 中亚阿姆河上游产流过程特征研究[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(3): 364–372.]
- [16] Feng Chang, Mao Dehua, Zhou Hui, et al. Impacts of climate and land use changes on runoff in the Lianshui basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(2): 395–406. [冯畅, 毛德华, 周慧, 等. 气候与土地利用变化对涟水流域径流的影响[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(2): 395–406.]
- [17] Zhao Yi, Nan Zhuotong, Li Xiangfei, et al. On applicability of a fully distributed hydrological model in the cold and alpine watershed of Northwest China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(1): 147–157. [赵奕, 南卓铜, 李祥飞, 等. 分布式水文模型DHSVM在西北高寒山区流域的适用性研究[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(1): 147–157.]
- [18] Andréassian V, Hall A, Chahinian N, et al. Large sample basin experiments for hydrological model parameterization: results of the model parameter experiment: MOPEX[M]. Wallingford, UK: IAHS Press, 2006.
- [19] Uhlenbrook S, Leibundgut C. Process-oriented catchment modelling and multiple-response validation[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(2): 423–440.
- [20] Lutz A F, Immerzeel W W, Shrestha A B, et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 587–592.
- [21] Luo Yi, Arnold J, Liu Shiyin, 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.
- [22] Zhao Qiudong, Ding Yongjian, Wang Jian, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 60–81.
- [23] Shrestha M, Wang L, Koike T, et al. Correcting basin-scale snowfall in a mountainous basin using a distributed snowmelt model and remote-sensing data[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(2): 747–761.
- [24] Zhou Jianzhong, Lu Weiwei, Sun Na, et al. Study on multi-objective calibration of hydrological model and optimization method of optimal pareto solutions[J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(2): 1–7. [周建中, 卢伟伟, 孙娜, 等. 水文模型参数多目标率定及最优非劣解优选[J]. *水文*, 2017, 37(2): 1–7.]
- [25] Duethmann D, Peters J, Blume T, et al. The value of satellite-

- derived snow cover images for calibrating a hydrological model in snow-dominated catchments in Central Asia[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(3): 2002–2021.
- [26] Chen Xi, Long Di, Hong Yang, et al. Improved modeling of snow and glacier melting by a progressive two-stage calibration strategy with GRACE and multisource data: how snow and glacier meltwater contributes to the runoff of the Upper Brahmaputra River basin?[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(3): 2431–2466.
- [27] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers[J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382–1385.
- [28] Su F, Zhang L, Ou T, et al. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 136: 82–95.
- [29] Chen Yaning, Li Weihong, Fang Gonghuan, et al. Hydrological modeling in glacierized catchments of Central Asia: status and challenges[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(2): 669–684.
- [30] Schaeffli B, Huss M. Integrating point glacier mass balance observations into hydrologic model identification[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(4): 1227–1241.
- [31] Huss M, Farinotti D, Bauder A, et al. Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(19): 3888–3902.
- [32] Konz M, Seibert J. On the value of glacier mass balances for hydrological model calibration[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 385(1/2/3/4): 238–246.
- [33] Duethmann D, Bolch T, Farinotti D, et al. Attribution of streamflow trends in snow and glacier melt-dominated catchments of the Tarim River, Central Asia[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 4727–4750.
- [34] Immerzeel W W, van Beek L P H, Konz M, et al. Hydrological response to climate change in a glacierized catchment in the Himalayas[J]. *Climatic Change*, 2012, 110: 721–736.
- [35] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, et al. The second Chinese glacier inventory: data, methods and results[J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 357–372.
- [36] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the second Chinese glacier inventory[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3–16. [刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. *地理学报*, 2015, 70(1): 3–16.]
- [37] Zhang Shiqiang, Ye Baisheng, Liu Shiyin, et al. A modified monthly degree-day model for evaluating glacier runoff changes in China: Part I: model development[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(11): 1686–1696.
- [38] Yang Zhenniang. Glacier water resources in China[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991. [杨针娘. 中国冰川水资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991.]
- [39] Hao Zhenchun, Li Li, Wang Jiahu. Theory and methods of distributed hydrological model[M]. Beijing: Science Press, 2010. [郝振纯, 李丽, 王加虎. 分布式水文模型理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [40] Zhao Qiudong, Zhang Shiqiang, Ding Yongjian, et al. Modeling hydrologic response to climate change and shrinking glaciers in the highly glacierized Kunma Like River catchment, Central Tian Shan[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(6): 2383–2402.
- [41] Cannon A J, Sobie S R, Murdock T Q. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(17): 6938–6959.
- [42] Eum H I, Cannon A J. Intercomparison of projected changes in climate extremes for South Korea: application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(8): 3381–3397.
- [43] Global Soil Data Task Group. Global gridded surfaces of selected soil characteristics (IGBP-DIS)[DB/CD]. Oak Ridge, TN, USA: ORNL Distributed Active Archive Center, 2000.
- [44] Hansen M C, Defries R S, Townshend J R G, et al. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(6/7): 1331–1364.
- [45] Tachikawa T, Hato M, Kaku M, et al. Characteristics of ASTER GDEM version 2[C/OL]// 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 3657–3660 [2020-12-09]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6050017>.
- [46] Liu Wenfeng, Xu Zongxue, Li Fapeng, et al. Impacts of climate change on hydrological processes in the Tibetan Plateau: a case study in the Lhasa River basin[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(7): 1809–1822.
- [47] Li Zhongqin, Li Kaiming, Wang Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, Northwestern China[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 96–106. [李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(1): 96–106.]
- [48] Shen Yongping, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Glacier mass balance change in Tailanhe River watersheds on the south slope of the Tianshan Mountains and its impact on water resources[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 124–129. [沈永平, 刘时银, 丁永建, 等. 天山南坡台兰河流域冰川物质平衡变化及其对径流的影响[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 124–129.]
- [49] 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. [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.]
- [50] Zhao Qiudong, Ye Baisheng, Ding Yongjian, et al. Coupling a glacier melt model to the variable infiltration capacity (VIC) model for hydrological modeling in north-western China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(1): 87–101.

## Response of the hydrological processes to climate change in the Muzati River basin with high glacierization , southern slope of the Tianshan Mountains

ZHAO Qiudong<sup>1,2,6</sup>, ZHAO Chuancheng<sup>3</sup>, QIN Yan<sup>4</sup>, CHANG Yaping<sup>1,2</sup>, WANG Jian<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. College of Geography and Environmental Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China; 4. College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 5. College of Urban and Plans, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002, Jiangsu, China; 6. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Muzati River is the most glacierized catchment on the southern slope of the Tianshan Mountains. As the high sensitivity of hydrological processes of the catchment to climate change, it is essential to quantify the impacts of climate change on hydrological processes for the scientific water resources planning, management and sustainable utilization. The VIC-CAS model was adopted as computing platform. The glacier inventory data and observed runoff were accounted for multi-objective calibration and validation to improve the “truth” of simulations. Then the runoff components, runoff variation characteristics and response mechanism of runoff to climate change were quantitatively analyzed using the simulations and observations. The following major conclusions are drawn: The runoff is concentrated in warm season (May to September), accounting for 77.9% to the annual runoff. The contribution of glacier runoff, snowmelt runoff and rainfall runoff to the total runoff was 66.6%, 26.4% and 7.0%, respectively. Over the past 40 years (1971 – 2010), the annual average air temperature and precipitation had shown a significant increasing trend. Due to increasing precipitation, the snowmelt runoff and rainfall runoff had shown increasing trends. But the annual runoff had shown a slight decreasing trend because of decreasing glacier runoff. Air temperature was projected to rise, while precipitation was projected to slightly decrease under RCP4.5 scenario. As air temperature rise, more precipitation will be in the form of rain. The rainfall runoff is predicted to obviously increase, while the snowfall and snowmelt runoff had been reached peak in 1990s, and significantly decline later. The glaciers are projected to retreat steadily, so the glacier runoff had reached a tipping point in 2010s. Annual runoff was projected to decrease significantly as a result of decreasing glacier runoff.

**Key words:** southern slope of the Tianshan Mountains; Muzati River; glacier change; hydrological processes; climate change; the future projections

(责任编辑: 周成林; 编辑: 武俊杰)