

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0143

NI Jingwen, GAO Hongkai, QIN Yanhua, et al. The simulation of hydrological elements and climate change impacts in typical basins of Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(6): 1875-1886. [倪静雯, 高红凯, 秦延华, 等. 天山典型流域水文多要素模拟与气候变化影响预估[J]. 冰川冻土, 2023, 45(6): 1875-1886.]

天山典型流域水文多要素模拟与气候变化影响预估

倪静雯¹, 高红凯¹, 秦延华², 张文鑫³, 何天豪¹, 雍磊磊¹, 冯紫荆¹

(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241; 2. 曲阜师范大学地理与旅游学院, 山东日照 276826;

3. 隆德大学自然地理与生态科学系, 瑞典隆德 SE223 62)

摘 要: 天山区域地形多变, 景观异质性强, 水文过程极其复杂, 全球变化对该地区水安全带来新的挑战 and 更大不确定性。亟需通过流域水文模型系统定量模拟和预估天山典型流域水文过程, 以更好地支撑区域发展。本研究基于改进的 FLEX^G- Δh 模型, 定量模拟了天山 4 个典型流域的历史径流过程, 并预估了流域内 2 282 条冰川物质平衡和面积的未来变化, 进一步通过情景模拟分析了各海拔高程带径流等水文多要素的响应机制。研究发现: (1) FLEX^G- Δh 模型对历史径流过程具有较高模拟精度, 率定期平均 Kling-Gupta 效率系数 (I_{KGE}) 为 0.75, 检验期平均 I_{KGE} 为 0.60。 (2) 随海拔上升, 径流量和蒸发量呈现先增后减趋势, 最大值分别出现在海拔 4 000 m 和 2 000 m, 并分别受冰川覆盖和植被分布影响。 (3) 未来到 2100 年, 低于 4 500 m 海拔的冰川消融明显。在 SSP1-RCP2.6 和 SSP5-RCP8.5 情景下, 研究区内分别有 145 和 222 条冰川完全消融, 冰川总体积分别减少 $1.81 \times 10^4 \text{ km}^3$ (占现有冰川体积的 54%) 和 $2.44 \times 10^4 \text{ km}^3$ (占现有冰川体积的 73%)。在 SSP5-RCP8.5 情景下, 升温导致蒸发量增加, 与冰川变化叠加, 导致径流深在海拔 4 000 m 以下地区减少 0.16~1.40 mm·a⁻¹, 在 4 000 m 以上地区则增加 0.20~0.67 mm·a⁻¹。本研究揭示了天山地区景观垂直地带性 (森林、冰川等) 与气候 (水分和热量) 间很强的时空规律性, 并预估了全球变化对天山地区水资源垂直地带性的影响, 以期为区域水资源合理利用和可持续发展提供支撑。

关键词: FLEX^G- Δh 模型; 水资源模拟预估; 气候变化; 景观垂直地带性

中图分类号: P463; P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)06-1875-12

0 引言

天山作为“中亚水塔”, 是中下游及周边干旱区关键的水源地, 养育了近 1.5 亿人口, 对区域经济、社会和生态可持续发展起到了决定性作用^[1]。此外, 作为亚欧大陆腹地一条巨大的独立纬向山系, 其水文水资源随海拔变化的规律非常典型^[2]。随着全球变暖, 天山区域水循环规律发生显著变化^[3]。但由于观测站点稀疏、资料缺乏, 人们对水文过程的认识仍存在不确定性。因此, 亟需通过模型模拟并预估天山流域各高程带水资源演变, 揭示气候变化背景下水资源及景观随海拔变化的特点及机理, 以支撑未来水资源合理开发和利用以及可持续发展。

冰川和积雪消融在天山地区水文过程中起到重要作用, 冰雪消融模拟目前主要有两类模型: 一类是基于度日因子的概念模型, 在 SRM、HBV、新安江等模型中应用广泛^[4]; 另一类是基于能量平衡的消融物理模型, 在 SWAT^[5-6]、SNThern、VIC^[7] 模型中也有大量应用。已有的模拟结果表明: 全球变暖使得天山地区降水量总体呈上升趋势^[8], 其中天山西段增加最多, 只有天山东段的东南坡降水有所减少^[9], 由此导致天山地区地表水资源增加^[10]; 同时, 温度升高加速了天山区域冰川积雪的消融^[11], 使得冰雪融水补给在近年来持续增加, 到 2050 年左右达到拐点, 而后开始减少^[12-13]。由于植被生长受水分

收稿日期: 2023-03-21; 修订日期: 2023-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42122002; 42071081); 瑞典国家自然科学基金项目 (VR 2020-05338); 瑞典国家空间局基金项目 (SNSA 209/19) 资助

作者简介: 倪静雯, 硕士研究生, 主要从事冰冻圈遥感研究. E-mail: 10193903408@stu.ecnu.edu.cn

通信作者: 高红凯, 教授, 主要从事水文、水资源研究. E-mail: hkgao@geo.ecnu.edu.cn

和热量条件影响,是反映环境变化的综合指标^[14],所以天山地区的植被分布和归一化植被指数均随气候变化而动态演变^[15]。此外,植被分布和变化也是径流量和蒸发量空间分异的主要原因之一,生态水文各要素互馈关系复杂^[16-17]。由此可见,天山地区水循环是气象、水文、冰雪、植被等相互作用的复杂系统^[3]。然而目前研究多以上述某一方面或要素作为对象,对天山流域降水、蒸发、冰雪融水、径流等主要水文过程,及其与气候、景观、地形、植被等地理综合体的偶连效应机理仍缺少详细模拟和讨论^[18-20]。

本研究基于自主研发的冰川水文模型 FLEX^G- Δh ^[21]将水文模型和冰川响应模型耦合,能够根据温度和降水变化,动态模拟各高程带冰川物质平衡、径流深、蒸发量等水文要素。该模型不仅可服务于传统的径流预报与预估等工程水文需求,还通过严格检验水文要素模拟的中间过程,验证模型的可靠性和真实性^[22-24],以模拟为手段,认识并定量揭示流域水文过程。本文以天山4个典型流域为研究区,将 FLEX^G- Δh 模型由单条冰川模拟拓展应用至研究区内2 282条冰川,对其2020—2100年各高程带冰储量变化进行模拟,在此基础上,对流域各高程带水资源状况进行精细预估。最后,总结水文要素垂直地带性规律并定量分析其机理过程,预估全球变暖对该地区水文多要素的影响。

1 研究区及数据

1.1 研究区概况

综合考虑流域特征和数据的可获取性,本文选择博尔塔拉河、塔西河、特克斯河、开都河四个研究基础较好的天山山区典型流域作为研究区(图1)。流域范围在42°11'32"~45°10'18" N, 79°23'19"~86°18'21" E,高程位于885~5 987 m。研究区内的降水集中在春、夏季节,平均年降水量超过200 mm^[25]。降水为河流提供了降雨径流和冰雪融水径流补给,是中下游绿洲区域重要的水资源。研究区内的主要植被类型为:荒漠草原、高山草甸和针叶林^[26]。四个流域分属天山不同区域且具有各自特征。其中,开都河位于天山南坡中段,出山径流由大山口水文站控制,年均径流深为184.5 mm^[27]。该流域径流供给博斯腾湖,成为塔里木盆地的重要水源,覆盖下游115万人口,水安全压力较大^[6,28]。特克斯河位于天山南坡西段,出山径流由卡甫其海水文站控制,年均径流深为272.8 mm^[27]。相较于天山其他流域,特克斯河流域具有较大的面积、降水量和海拔高程差^[29],水文地带性规律强。塔西河位于天山北坡东段,出山径流由石门子水文站控制,年均径流深为129.4 mm^[30]。博尔塔拉河位于天山北坡西段,出山径流由温泉水文站控制,年均径流深为137.1 mm^[31]。该流域位于天山北坡的最西端,是艾比湖重要的水源,占入湖总量的70%^[32]。流域的其他信息见表1。

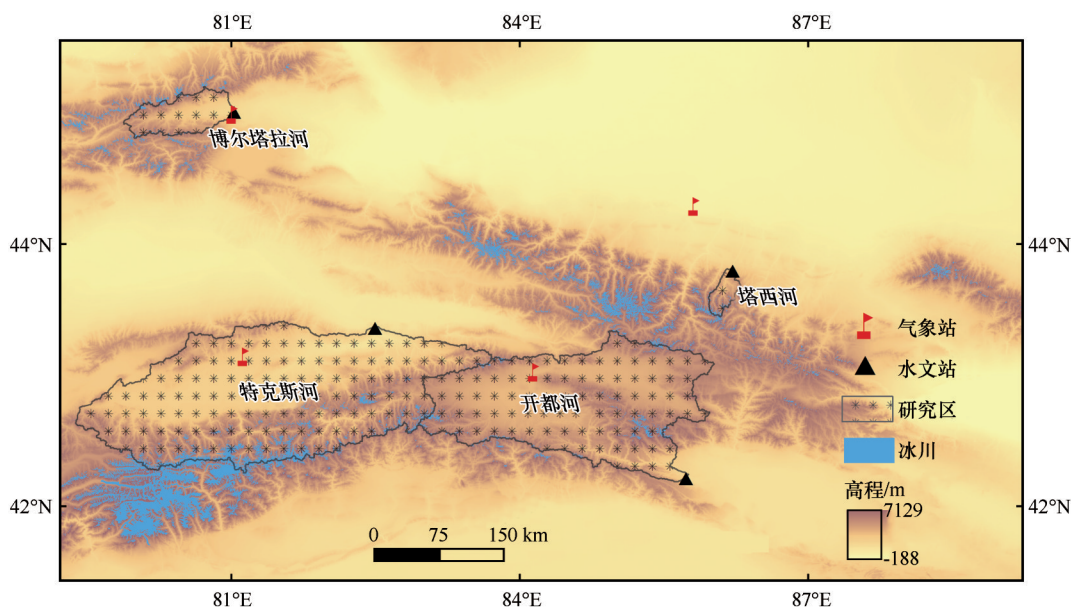


图1 研究区及数据来源概况

Fig. 1 Study area and data sources

表1 各流域基本情况

Table 1 Basic conditions of each river basin

流域	面积/km ²	冰川覆盖率/%	年平均降水量/mm	水文站
开都河	18 843.74	1.6	279.90	大山口
特克斯河	28 080.29	4.6	540.35	卡甫其海
塔西河	594.48	6.7	235.40	石门子
博尔塔拉河	2 298.05	2.7	275.08	温泉

1.2 数据来源

(1)径流数据:来自新疆维吾尔自治区水文统计年鉴,使用各水文站点2006年、2007年的日径流量数据。站点的位置和流域匹配情况见图1、表1。

(2)气象数据:历史的气象数据来自中国地面气候资料日值数据集(V3.0)(<http://data.cma.cn/>)。由于天山地区高海拔、地形复杂、气候寒冷等原因,气象监测站点少。所以选择距离各流域最近的气象站获取2006年、2007年日均温和日降水量(图1、表1)。未来气象数据采用GFDL-ESM4模型在第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中模拟的两种共享社会经济路径下的气候情景(SSP1-RCP2.6和SSP5-RCP8.5)数据(<https://www.isimip.org/gettingstarted/data-access/>)。SSP1-RCP2.6代表可持续发展的社会经济路径,即温室气体排放得到有效控制,温度上升尽可能控制在1.5℃或者2.0℃。SSP5-RCP8.5为化石燃料继续开发和碳排放持续上升的社会经济路径,气候持续变暖严重。为了使未来气候数据更能反映当地气候变化,我们根据Lange^[33]介绍的气象数据校正方法对日降水量和日均温分别进行了乘法调整和加法调整。乘法调整是指通过计算模型的历史时期数据和对应的观测数据间的比例因子来校正未来时期的气候数据。加法调整是指通过计算模型的历史时期数据相对于观测数据的月均值偏移量来校正未来时期的气候数据。由于观测数据年份只有两年,我们用这两年的均值与模型2001—2010年的均值来计算调整函数的比例因子和偏移量。最终得到2020—2100年各气象站日均温和日降水量。

(3)冰川数据:冰川厚度和覆盖范围数据使用第六版伦道夫冰川编目(RGI6.0)^[34]。冰川范围数据为矢量数据、冰川厚度为栅格数据,空间分辨率为25 m。

(4)数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM):使用SRTM数据(<https://www.gscloud.cn/>),

空间分辨率为90 m。

(5)地表植被类型:来源于青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)^[35],该数据为2020年地表覆盖的栅格图层,空间分辨率为500 m。

2 研究方法

FLEX^g- Δh 模型分为FLEX^g冰川水文模型和冰川响应的 Δh 参数化方案两个部分。FLEX^g冰川水文模型将流域分为冰川区与非冰川区两个部分,分别模拟产流过程^[36]。 Δh 参数化方法按冰川的面积分类使用经验曲线模拟不同高度冰川响应变化^[37]。最后利用冰川物质平衡(GMB)将FLEX^g冰川水文模型与 Δh 参数化方案进行结合^[21],在不断更新冰川面积的情况下对各高程带水资源情况进行预估。

2.1 FLEX^g冰川水文模型

本研究中,FLEX^g模型用于模拟冰川水文过程,通过各高程带气温、降水量以及冰川与非冰川区面积比率作为输入,以观测到的径流深作为模型率定和验证数据,确定水文平衡方程中各参数的取值。随后即可通过气温、降水以及冰川面积数据模拟各高程带冰川区及非冰川区径流量、蒸发量及冰川物质平衡。

FLEX^g模型中冰川区和非冰川区的水量平衡方程和本构方程见表2。首先,冰川区和非冰川区具有相似的降水和融雪过程。其中降水根据该高程带气温与阈值温度比较,可进一步分为降雨或降雪[表2,式(1)~(2)]。

积雪可看作一种多孔介质,能保持一部分液态水。而储藏在积雪中的液态水有可能因为温度降低又重冻结变为固态的粒雪。因此使用表2,式(3)~(7)描述融雪消融和重冻结等过程。

对于冰川区,液态水会再次经历与融雪过程类似的冰川融化过程。有所不同的是,冰川的融化不仅需要温度大于阈值同时还要表面无积雪覆盖。不同的参数表达式见表2,式(8)~(10)。

对于非冰川区,液态水可能形成径流也可能被土壤吸收,这主要取决于相对土壤湿度、蒸发量和液态降水量[表2,式(11)~(13)]。形成的径流分为快速径流和慢速径流,分别对应于模型中快速和慢速响应模块[表2,式(14)~(17)]。

2.2 Δh 参数化方案

Huss等^[37]使用瑞士34条具有长期观测记录的

表2 FLEX^G模型公式
Table 2 The equations in FLEX^G model

类别	公式	说明
降水分离	$P_s = \begin{cases} P; & T \leq T_t \\ 0; & T > T_t \end{cases} (1)$ $P_l = \begin{cases} P; & T > T_t \\ 0; & T \leq T_t \end{cases} (2)$	当日平均气温(T)($^{\circ}\text{C}$)大于阈值(T_t),则为降雨(P_l);否则认为降雪(P_s)
积雪消融	$\frac{dS_w}{dt} = P_s + R_{rf} - M_s (3)$ $\frac{dS_{wl}}{dt} = P_l + M_s - R_{rf} - P_e (4)$ $M_s = \begin{cases} F_{dd}C_a(T - T_t); & T > T_t \\ 0; & T \leq T_t \end{cases} (5)$ $P_e = \begin{cases} S_{wl} - C_{wh}S_w; & S_{wl} > C_{wh}S_w \\ 0; & S_{wl} \leq C_{wh}S_w \end{cases} (6)$ $R_{rf} = \begin{cases} F_{dd}C_aF_{rr}(T - T_t); & T > T_t \\ 0; & T \leq T_t \end{cases} (7)$	S_w 表示固态积雪; S_{wl} 表示积雪中的液态水; $R_{rf}(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$ 表示液态水结成固态; $M_s(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$ 表示固态融成液态水; $P_e(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$ 表示形成的径流; $F_{dd}(\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$ 表示度日因子。坡向影响使用参数 C_a :若为南坡则乘以 C_a ;若为北坡则乘以 $1/C_a$;若为东西坡则乘以1。 C_{wh} 表示雪水当量常数;当温度小于阈值时, F_{rr} 用于矫正液态水重结冰量
冰川消融	$M_g = \begin{cases} F_{dd}C_aC_g(T - T_{IM}); & T > T_{IM} \text{ 且 } S_w = 0 \\ 0; & T \leq T_{IM} \text{ 或 } S_w > 0 \end{cases} (8)$ $\frac{dS_{fg}}{dt} = P_l + M_g - Q_{f,g} (9)$ $Q_{f,g} = S_{f,g}/K_{f,g} (10)$	$M_g(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$ 表示冰川消融量。在同一地区,冰川的度日因子往往大于积雪,因此在 F_{dd} 基础上再乘以参数 C_g 。 M_g 与降雨量 P_l 形成汇流量 $S_{f,g}$ 。最终再由系数 $K_{f,g}$ 决定冰川区径流
非冰川区	$\frac{dS_u}{dt} = P_e - E_a - R_u (11)$ $\frac{R_u}{P_e} = 1 - \left(1 - \frac{S_u}{(1 + \beta)S_{u,\max}} \right)^{\beta} (12)$ $E_a = E_0 \frac{S_u}{C_e S_{u,\max}} (13)$ $\frac{dS_f}{dt} = R_f - Q_f (14)$ $\frac{dS_s}{dt} = R_s - Q_s (15)$ $Q_f = S_f/K_f (16)$ $Q_s = S_s/K_s (17)$	P_e 表示有效降水即融水与降雨。 $E_a(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$ 表示实际蒸发,该物理量由潜在蒸发 E_0 、相对根区湿度($\frac{S_u}{S_{u,\max}}$)以及参数 C_e 决定。 β 表示形状参数。 $R_u(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$ 表示超出目前根区储水能力(S_u)的水量,而其又可以分为快速退水水箱(S_f)与慢速退水水箱(S_s),用 R_f 与 R_s 表示。 K_f 表示快速退水参数; K_s 表示慢速退水参数

冰川为基础,提出 Δh 冰川响应参数化方案,并与冰川水文模型中的GMB进行耦合。理论上来说,低海拔相较于高海拔,冰川物质损失对气候变化更为敏感。此外,面积范围较小的冰川,其物质损失面积比例越大,往往不局限于冰川末端。因此,按照冰川面积分三类讨论,即面积大于 20 km^2 、面积小于 5 km^2 以及位于两者之间。冰川厚度的变化 Δh 参数采用无量纲形式,即使用 $(h_{\max} - h)/(h_{\max} - h_{\min})$ 进行标准化。具体厚度变化见式(18)。

$$\Delta h = \begin{cases} (hr - 0.02)^6 + 0.12 \times (hr - 0.02), & S \geq 20 \text{ km}^2 \\ (hr - 0.05)^4 + 0.19 \times (hr - 0.05), & 5 \text{ km}^2 \leq S < 20 \text{ km}^2 \\ (hr - 0.30)^2 + 0.60 \times (hr - 0.30), & S < 5 \text{ km}^2 \end{cases} (18)$$

式中: Δh 为标准化冰川厚度变化; hr 为标准化冰川高程; S 为冰川面积(km^2)。

该方案以各高程带气温、降水量、冰川与非冰

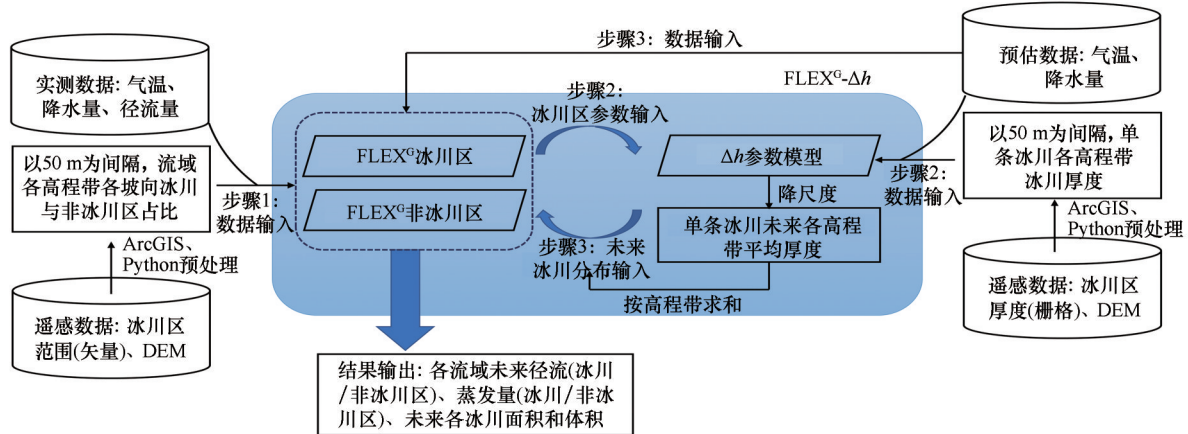
川区面积比率以及该区域率定得到的冰川区参数作为输入,能够模拟得到未来气候环境下各高程带冰川的面积及体积。

2.3 改进的FLEX^G- Δh 模型

本文将FLEX^G- Δh 模型进行改进,使其在保证单条冰川的精度之下能够进行流域尺度的模拟。总体框架分为三步(图2)。第一步,叠加冰川区范围和DEM即可得到以 50 m 为间隔,流域各高程带各坡向冰川与非冰川区占比,以此作为FLEX^G模型冰川数据。此外,由于流域气象站点稀疏,且多分布在低海拔的谷地,并不能代表整个流域的气候状况。因此使用式(19)、(20)进行线性插值,其中气温直减率取 $-0.007 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$,降水增加系数为 $0.042\% \cdot \text{m}^{-1[36]}$ 。

$$T = T_0 + (H - H_0) \times (-0.007) (19)$$

$$P = P_0 \times [(H - H_0) \times 0.042\% + 1] (20)$$

图2 改进的FLEX^G-Δh模型框架图Fig. 2 Structure of the improved FLEX^G-Δh model

式中: T 、 H 、 P 分别表示所求高程带的温度(℃)、中心高程(m)、降水量(mm); T_0 、 H_0 、 P_0 表示站点温度(℃)、高程(m)、降水量(mm)。

将处理后的冰川、气象、地形等数据输入 FLEX^G 模型, 模型内部使用蒙特卡洛方法, 共模拟 10^5 次, 通过 Kling-Gupta 效率系数 (I_{KGE}) 以及实测径流量来评估模拟精度, 见式(21)^[38]。

$$I_{\text{KGE}} = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (21)$$

式中: r 为模拟值与观测值之间的线性相关系数; α 为模拟值与观测值的标准差之比; β 为模拟值与观测值的均值之比。

表2中各流域的13个不确定参数, 使用2006年的径流数据进行率定, 再使用2007年数据进行检验。参数先验范围参考文献[36]。

第二步, 采用 Δh 参数化方案对流域内2282条冰川逐个进行厚度变化模拟, 从而更新流域内冰川的厚度、面积、冰储量。该步骤所需数据有未来气温、降水量和目前单条冰川各高程带平均冰川厚度信息以及第一步得到的流域冰川区参数。然后按照高程带对流域内所有冰川求和得到流域未来冰川分布情况。

第三步, 再根据未来气象数据、第二步模拟的冰川分布情况使用 FLEX^G 模型模拟流域未来冰川区与非冰川区各自的径流量、蒸发量、冰川物质平衡变化等。

3 结果与讨论

3.1 模型检验

模型的检验使用各流域水文站的实测数据。图3对比了率定期(2006年)和检验期(2007年)每

日实测与模拟的径流深。从图中可以看出, 四个流域的模拟径流量在率定期和检验期都能较好地与实测数据匹配。率定期的平均 I_{KGE} 系数为0.75; 检验期的平均 I_{KGE} 系数为0.60。说明该模型能够较好地重现历史水文过程, 具有可信度。

然而, 研究区内包含多处水库, 开都河1处; 特克斯河9处^[39]。由于缺乏水库调度的实际运行资料, 模型无法模拟人为控制的径流突变, 例如开都河2007年5月21日、特克斯2006年10月3日。但水库主要影响径流的季节分配, 对水资源总量影响不大。

表3为率定得到的冰川物质平衡和冰川区径流占比。通过对比以往研究中使用遥感^[40]及实地观测^[41]方法得到的天山地区冰川物质平衡数据, 数量级相同、结果相似。此外, 已有研究表明, 全天山地区冰川融水占总径流约为25%^[19,42], 其中开都河冰川融水贡献率为19.14%^[43], 特克斯河所属的伊犁河流域冰川融水贡献率为19.2%^[44]。这与本研究结果近似, 由此说明冰川消融方面模拟结果合理可信。

3.2 冰川变化

目前研究区内共有2282条冰川, 总面积为817.71 km², 总体积为3.32×10⁴ km³。到21世纪末, SSP1-RCP2.6情景下研究区内将有145条冰川完全消融, 冰川面积共减少276.47 km² (占现有冰川面积的33.81%), 体积共减少1.81×10⁴ km³ (占现有冰川体积的54.37%)。由于SSP5-RCP8.5情景下温度升高更多, 冰川消融更为显著。研究区内将有222条冰川消失, 面积共减少414.42 km² (占现有冰川面积的50.68%), 体积减少约2.44×10⁴ km³ (占现有冰川体积的73.47%)。各流域具体情况见表4。

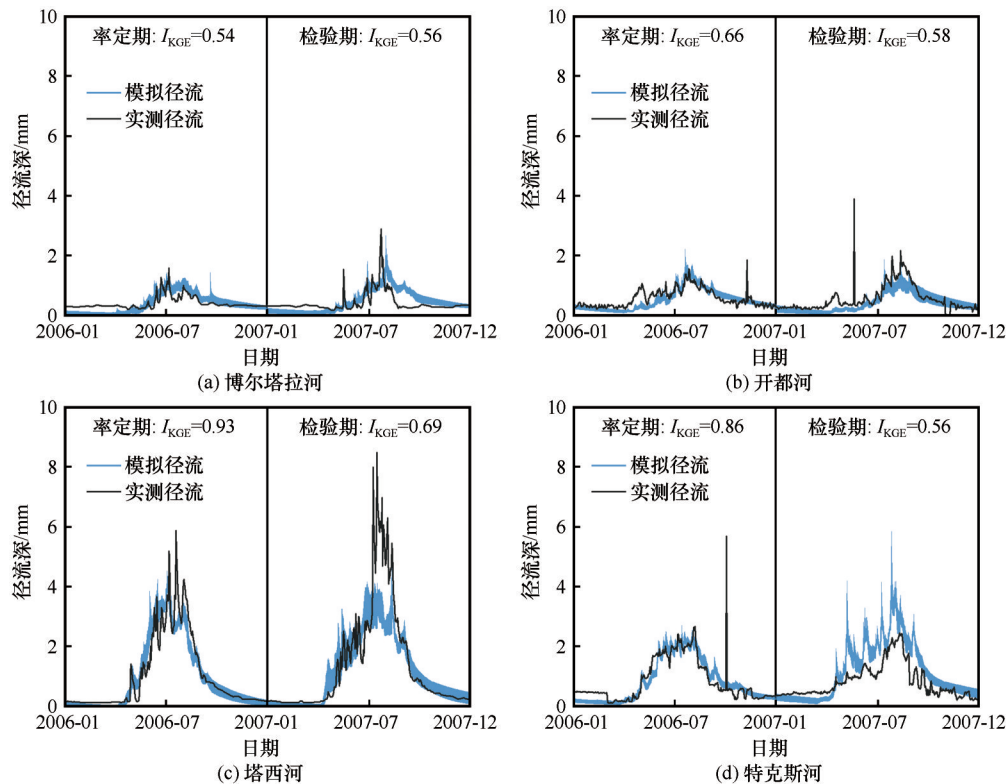


图3 各流域率定期(2006年)与检验期(2007年) I_{KGE} 系数、模拟径流与实测径流对比
Fig. 3 I_{KGE} coefficient and comparison between simulated and observed runoff of each river basin in calibration (2006) and validation (2007) period; Bortala River (a), Kaidu River (b), Taxi River (c), Tekes River (d)

表3 各流域2006年冰川物质平衡与冰川区径流占比
Table 3 Glacier mass balance and contribution of glacial meltwater in 2006

项目	博尔塔拉河	开都河	塔西河	特克斯河
GMB/($\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)	-0.531	-0.770	-0.546	-0.265
冰川区径流占比/%	16.43	24.27	23.53	16.05

从冰川的高程分布来看(图4),冰川分布于海拔3 000 m以上,且冰川面积于海拔4 000 m左右达

到最大。对比2020年与21世纪末的冰川分布,低海拔地区,冰川面积变化显著;高海拔地区消融相对较小。其中,海拔4 000 m以下的消融量占总消融量的87.2%。这与以往遥感观测和冰川物质平衡的实地观测结果一致^[45-46]。处于最低海拔的冰川(范围跨度在400 m左右)往往面积较小且消融较快,至21世纪末便完全消融。而在4 500 m以上高程带,由于温度低,冰川较少出现物质亏损现象。

表4 各流域21世纪末(SSP1-RCP2.5、SSP5-RCP8.5情景下)冰川消融情况
Table 4 Glacier melting in 2100 (under SSP1-RCP2.5 and SSP5-RCP8.5 scenarios)

冰川消融情况	博尔塔拉河		开都河		塔西河		特克斯河	
	SSP1-RCP2.6	SSP5-RCP8.5	SSP1-RCP2.6	SSP5-RCP8.5	SSP1-RCP2.6	SSP5-RCP8.5	SSP1-RCP2.6	SSP5-RCP8.5
条数消失比例/%	16.54	19.55	3.92	6.31	13.79	19.54	5.96	9.62
面积消失比例/%	50.58	74.46	43.20	59.21	64.82	81.38	21.75	38.22
体积消失比例/%	72.69	87.66	69.32	85.18	83.16	92.14	37.33	60.53

从冰川区产流来看(图5),平均年径流量为 $0.25\times10^8\sim30\times10^8\text{ m}^3$,由于特克斯河和开都河流域面积大,因此冰川区径流量较大。模拟结果表明,到21世纪末,除特克斯河外,其余流域冰川区径流均有不同程度减少。其中,塔西河由于冰川消融量最大(表4),因此21世纪末径流量相较2020年下降约

66.3%,博尔塔拉河和开都河下降分别约53.9%和23.2%。从2020年至2100年,冰川区径流量总体呈现出3类情况:第一,冰川区径流持续减少,如博尔塔拉河、开都河以及SSP5-RCP8.5情景下的塔西河。第二,冰川区径流未来即将出现拐点或峰值,如SSP1-RCP2.6情景下的塔西河将在2030年左右

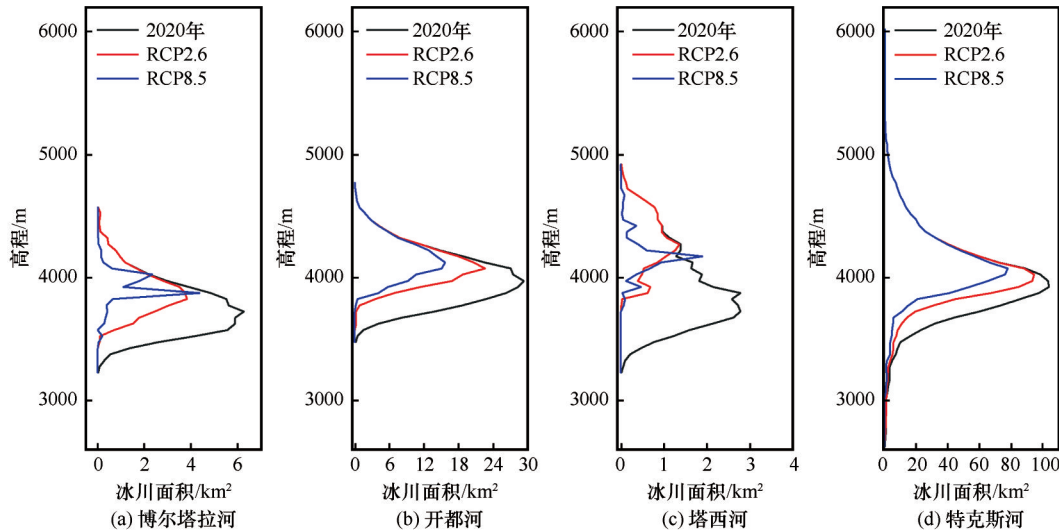


图4 各流域2020年及21世纪末(SSP1-RCP2.5、SSP5-RCP8.5情景下)冰川面积的垂直分布

Fig. 4 Distribution of glacier area along with elevation in 2020 and 2100 (under SSP1-RCP2.5 and SSP5-RCP8.5 scenarios): Bortala River (a), Kaidu River (b), Taxi River (c), Tekes River (d)

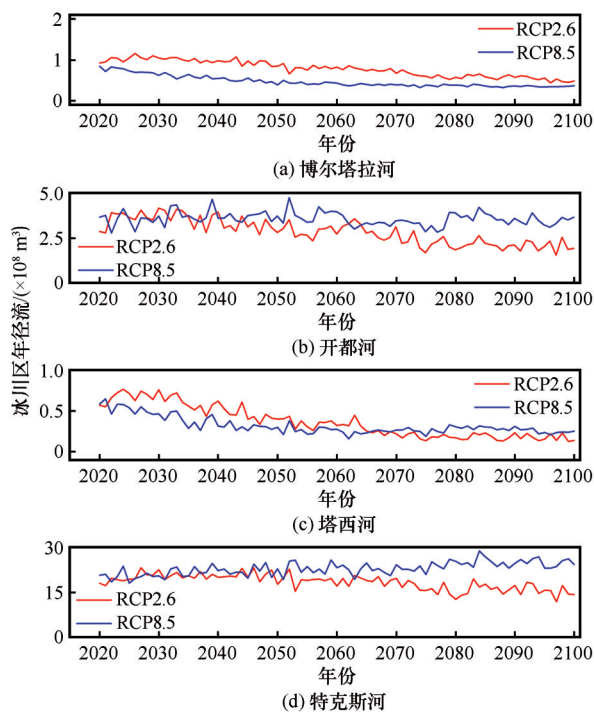


图5 各流域2020至2100年(SSP1-RCP2.5、SSP5-RCP8.5情景下)冰川区年径流量

Fig. 5 Annual runoff in glacier area from 2020 to 2100 (under SSP1-RCP2.5 and SSP5-RCP8.5 scenarios): Bortala River (a), Kaidu River (b), Taxi River (c), Tekes River (d)

达到峰值。第三,冰川区径流不发生明显变化,如特克斯河。

3.3 水文与景观垂直地带性

3.3.1 水文要素垂直变化及机理分析

通过模型计算出各高程带目前水资源情况

(图6)。径流量随海拔升高先升高后降低,径流的最大值普遍在4000 m左右。这主要是由于在4000 m以下地区,随着海拔的升高,降水量增加,从而使得径流量逐渐增加。而4000 m以上区域虽然降水量大,但温度降低使得降水多以积雪等固态的形式保存,4500 m以上高程带冰川和积雪没有明显的消融现象(图4)。

蒸发量同样呈现先升高后降低,拐点普遍出现在2000 m左右。这是因为蒸发量受水分条件和热力因素的影响。在2000 m以下地区,随着海拔升高降水增加,为蒸发提供水分条件,因此蒸发量增加。而2000 m以上地区,虽然降水增加,但温度也越来越低,使得蒸发的热力条件减小,因此蒸发量随海拔升高而减小。总的来说,蒸发量在2000 m以下区域受降水限制;而在2000 m以上区域则受能量限制。这与其他学者得到的结果相一致^[47]。

3.3.2 水文要素与景观在不同高程带上的相互作用关系

根据地表植被类型和DEM对各类植被的高程分布进行统计分析(图6)。植被主要分布于海拔4000 m以下的地区。其中草地和稀树草原的占比和跨度较大,从900~4500 m均有分布;而森林地带则主要分布于1500~3000 m。4000 m以上的区域主要是裸地和冰雪区。

可以发现,植被随海拔的分布模式与气象、水文有较强的关联性。海拔低于1500 m时,由于降水量小,径流量小,水分条件限制了植被的生长,因

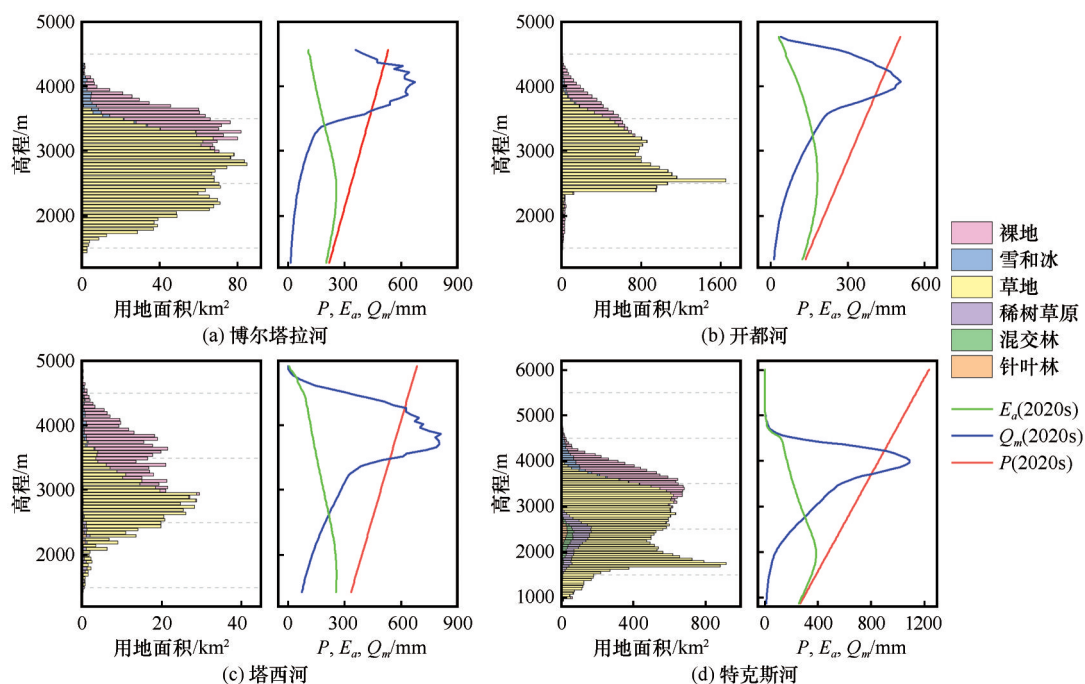


图6 各流域用地面积及2020年水文要素垂直分布(其中: E_a 表示蒸发量、 Q_m 表示径流深、 P 表示降水量)

Fig. 6 Land use area and hydrological elements along with elevation in 2020 (where E_a represents evaporation, Q_m represents runoff depth, and P represents precipitation): Bortala River (a), Kaidu River (b), Taxi River (c), Tekes River (d)

此以草原为主。而从1 500~3 000 m,随着海拔的升高水分逐渐充沛,从草原带逐步过渡到森林带。由于森林强大的蒸腾作用耗水多,又使得该区间内的蒸发量最大,这与本研究的模拟结果完全一致。从3 000~4 000 m,由于温度降低,热量减小,植被受热量条件影响再次向草甸、苔原过渡。4 500 m以上的地区,由3.2节的结果和径流量可得,降水以降雪为主,雪冰物质累积,产流量少。因此,呈现积雪冰川带,少有植被存在。经查阅,该地区植被垂直地带性为:荒漠草原带(<1 200 m)、山地草原带(1 000~1 500 m)、山地森林带(1 500~2 400 m)、亚高山草甸带(2 400~3 000 m)、高山流石坡植被带(3 000~4 000 m)^[2,48-49],这与我们的分析结果吻合。可见,天山完整的垂直地带景观是水文、气象、植被、地形的综合作用结果。

3.3.3 未来不同气候情景下水文、植被要素的高程分布变化

对比图7中三个阶段的变化可以发现:在SSP1-RCP2.6情况下,温室气体排放较低,气温波动并不显著。降水量呈现无显著规律的震荡变化,而由于温度没有变化,所以蒸发量只受降水量的影响,与降水量变动趋势一致。径流量除了塔西流域以外,其他均无明显变化。

然而在SSP5-RCP8.5即无任何减排政策干预的情景下,温室气体排放持续增加。据IPCC第六

次评估报告^[50],到21世纪末全球将大概率上升2℃,且中国上升的速率更快^[51]。虽然降水没有很强的规律性变化,但潜在蒸发随温度上升而增加,进而实际蒸发量也不断增加。相较之下,开都河与特克斯河在海拔2 000 m以下没有很大变化,2 000 m以上蒸发量增加,且蒸发最大值高度均上升约500 m,可能伴随景观分布的改变。博尔塔拉河各高程带的蒸发量则同步上升,无明显区别。而塔西河各高程带蒸发量略有增加。

从图4可以看出21世纪末,海拔4 000 m以下的地区,由于温度升高冰川基本完全消融。因此,低海拔地区随冰储量的减少,总径流深将减小0.16~1.40 mm·a⁻¹。而随着温度升高,冰川退缩。在高海拔地区,原来的冰川物质积累区变为冰川物质损失区。因此,高海拔地区对总径流深将增加0.20~0.67 mm·a⁻¹。最终,使得四个流域的最大产流高度带平均上升500 m。其中塔西河上升高度最多,约850 m,这主要是由于塔西河冰川消融量最大,消失的冰川体积占现有体积的92.14%。此外,丁永建等^[12]认为冰川融水的拐点与升温速率和冰川面积大小有关,冰川规模较小的流域在21世纪初即出现冰川融水拐点。博尔塔拉河、开都河、塔西河由于面积大于5 km²的冰川占总条数的1.5%以下,冰川急剧退缩导致21世纪末具有冰川融水的最

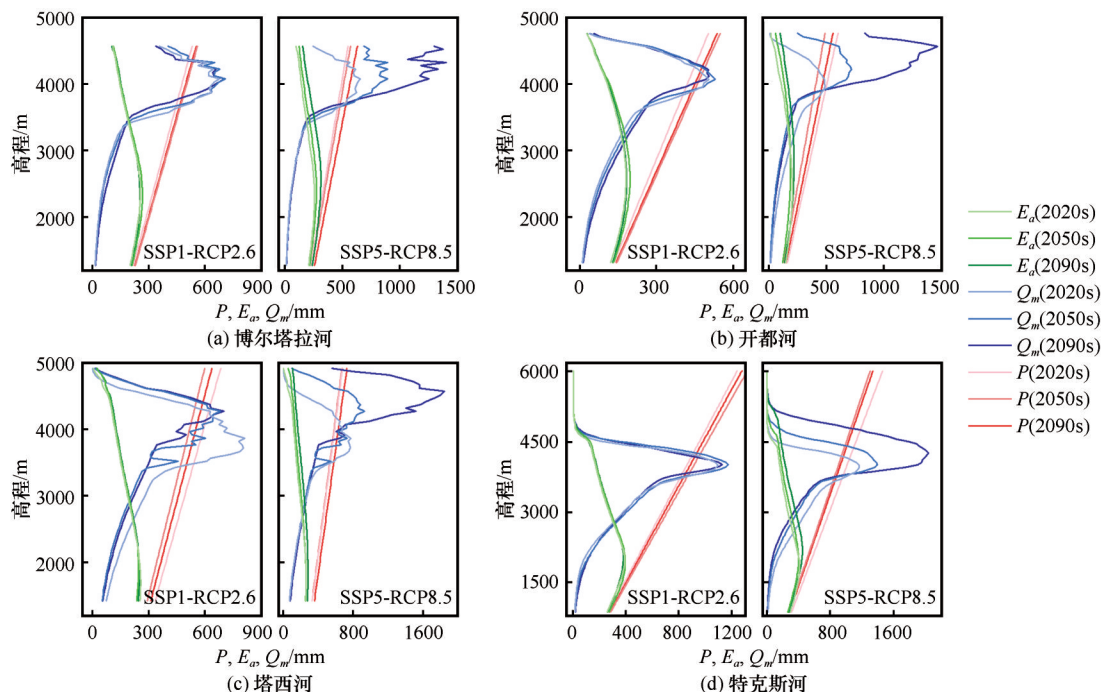


图7 SSP1-RCP2.6、SSP5-RCP8.5情景下各流域水文要素垂直分布图(其中: E_a 表示蒸发量、 Q_m 表示径流深、 P 表示降水量)

Fig. 7 Hydrological elements along with elevation under SSP1-RCP2.6 and SSP5-RCP8.5 scenario (where E_a represents evaporation, Q_m represents runoff depth, and P represents precipitation): Bortala River (a), Kaidu River (b), Taxi River (c), Tekes River (d)

低高程上移。而特克斯河面积大于 5 km^2 的冰川占总条数的 3.2%, 且冰川总消融量小。所以, 在 4 000 m 以下的低海拔地区总径流深较小幅度减小, 且具有冰川融水的最低高程上移不明显。

研究表明, 低海拔地区植被的生长主要受水分控制; 高海拔地区植被主要受热量限制^[52-53]。在 SSP5-RCP8.5 情景下, 低海拔地区在 21 世纪末径流减少导致土壤水分减少, 将限制植被的生长^[26]。而高海拔地区, 到 21 世纪末随着温度升高不仅能够为植被提供能量所需, 还导致积雪融化增加土壤水分^[54-55]。根据最大产流高程带的上移, 未来研究区内植被分布的海拔范围可能更广, 高海拔的裸地可能实现植被的覆盖, 整体景观的海拔梯度上移。但这些结论仍有很大不确定性, 需要未来更多观测数据检验。

3.3.4 研究结果对比

本节中的水文多要素随高程变化规律与 Gao 等^[52]在黑河上游发现的结果类似。均呈现出降水随高度增加, 蒸发先增加后减少的趋势。但由于天山地带性完整, 本研究区还涉及大量冰川积雪覆盖, 具有更为典型的冰冻圈水文特征。本研究丰富了垂直地带性水热耦合及其与地形植被等景观要素同水文过程紧密结合的研究内容。相比于 Xu

等^[47]使用线性拟合, 水文模型的综合视角对自然过程的模拟更为定量和全面, 机理性更强。本文在现有观测的基础上进行水文要素模拟, 同时还在 SSP1-RCP2.6、SSP5-RCP8.5 情景下, 讨论未来变化。此外, 本文将改进的 FLEX^g- Δh 模型应用到流域尺度, 模拟了 2 282 条冰川的未来变化及其对水资源影响, 在大尺度冰川水文耦合模拟的技术方法上也具有创新性。总之, 本研究通过综合模拟水热等气候水文各要素, 并系统预估了未来水热变化对冰川、植被、地形等景观时空异质性和水资源的影响, 有望为天山地区水资源利用综合管理和优化提供更加可靠的科技支撑。

4 结论

本文改进了 FLEX^g- Δh 模型, 首先通过多源数据严格检验了模型对径流、冰川变化、冰川融水、水热与垂直景观紧密耦合等多要素模拟的可靠性, 然后预估了天山典型流域 2020—2100 年间冰川面积以及各水文要素随高程的变化情况, 并分析了其变化机理及其与景观的相互作用, 得到以下主要结论:

(1) Kling-Gupta 效率系数检验表明 FLEX^g- Δh 模型对各流域径流模拟效果精度较高。

(2)天山典型流域冰川主要分布于3 000~5 000 m,到21世纪末,在SSP1-RCP2.6和SSP5-RCP8.5情景下,冰川体积分别减少 $1.81 \times 10^4 \text{ km}^3$ (占现有冰川体积的54%) and $2.44 \times 10^4 \text{ km}^3$ (占现有冰川体积的73%)。

(3)随海拔上升,降水增加,蒸发量在2 000 m以下受降水影响而不断增加,1 500~3 000 m处受森林蒸腾耗水达到最值,2 000 m以上受温度影响不断减少;径流量在4 000 m以下因降水、冰雪融水,随海拔升高而不断增加,4 000 m以上降水多以固态形式保存,因此径流随海拔不断减少。

(4)模拟显示,到21世纪末,在SSP1-RCP2.6情景下,水文和景观要素未见明显变化;而在SSP5-RCP8.5情景下,随着温度上升,实际蒸发不断变大,冰川退缩,景观垂直地带性上移。导致总径流深在海拔4 000 m以下地区由于冰储量萎缩而减少 $0.16 \sim 1.40 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,4 000 m以上地区总径流深随冰川消融而增加 $0.20 \sim 0.67 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,径流最大值平均海拔上升500 m。

总之,天山作为“中亚水塔”,水资源是制约当地社会安全、产业及经济发展的主要因素。模拟气候变化背景下,流域各高程带冰川面积及水资源变化情况,有利于揭示水文垂直地带性变化规律及机理,有望为区域水资源合理利用和可持续发展提供有力支撑。

参考文献(References):

- [1] Zhang Zhengyong, Liu Lin, He Xinlin, et al. Evaluation on glaciers ecological services value in the Tianshan Mountains, Northwest China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(1): 101-114.
- [2] Xie Jin, Chang Shunli, Zhang Yutao, et al. Plant and soil ecological stoichiometry with vertical zonality on the northern slope of the middle Tianshan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(14): 4363-4372. [谢锦, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性[J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4363-4372.]
- [3] Chen Yaning, Li Baofu, Li Zhi, et al. Water resource formation and conversion and water security in arid region of Northwest China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(7): 939-952.
- [4] Peng D Z, Xu Z X. Simulating the Impact of climate change on streamflow in the Tarim River Basin by using a modified semi-distributed monthly water balance model[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(2): 209-216.
- [5] Fang Gonghuan, Yang Jing, Chen Yaning, et al. Contribution of meteorological input in calibrating a distributed hydrologic model in a watershed in the Tianshan Mountains, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3): 2413-2424.
- [6] Fang Gonghuan, Yang Jing, Chen Yaning, et al. Climate change impact on the hydrology of a typical watershed in the Tianshan Mountains [J]. Advances in Meteorology, 2015, 2015: 1-10.
- [7] Liu Zhaofei, Xu Zongxue, Huang Junxiong, et al. Impacts of climate change on hydrological processes in the headwater catchment of the Tarim River Basin, China[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(2): 196-208.
- [8] Fan Mengtian, Xu Jianhua, Chen Yaning, et al. Simulating the precipitation in the data-scarce Tianshan Mountains, Northwest China based on the Earth system data products[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(14): 1-15.
- [9] Liu Youcun, Jiao Keqin, Zhao Kui, et al. The response of precipitation to global climate change in the Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 748-759. [刘友存, 焦克勤, 赵奎, 等. 中国天山地区降水对全球气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 748-759.]
- [10] Xiang Yanyun, Wang Zhicheng, Zhang Hui, et al. Study of snowmelt runoff simulation in arid regions: Progress and prospect [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 892-901. [向燕芸, 王志成, 张辉, 等. 干旱区融雪径流模拟的研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 892-901.]
- [11] Wang Puyu, Li Zhongqin, Li Huilin, et al. Changes of ice-thickness and volume for representative glaciers in Tianshan Mountains in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7): 929-940. [王璞玉, 李忠勤, 李慧林, 等. 近50年来天山地区典型冰川厚度及储量变化[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 929-940.]
- [12] Ding Yongjian, Zhao Qiudong, Wu Jinkui, et al. The future changes of Chinese cryospheric hydrology and their impacts on water security in arid areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 23-32. [丁永建, 赵求东, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文未来变化及其对于干旱区水安全的影响[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 23-32.]
- [13] 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. [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.]
- [14] Peng Zhongtong, Zhang Yuandong, Zhu Liangjun, et al. Divergent tree growth and the response to climate warming and humidification in the Tianshan Mountains, China [J]. Forests, 2022, 13(6): 886.
- [15] Sun Qinming, Liu Tong, Han Zhiqian, et al. Response of climate changes on vegetation cover in north of Tianshan Mountains evaluated using multiple time scales[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 248-255. [孙钦明, 刘彤, 韩志全, 等. 遥感分析天山北部植被覆盖对气候变化的多时间尺度响应[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 248-255.]
- [16] Liu Wenfei, Wei Xiaohua, Liu Shirong, et al. How do climate and forest changes affect long-term streamflow dynamics? A case study in the upper reach of Poyang River Basin[J]. Ecohydrology, 2015, 8(1): 46-57.
- [17] Deng Xingyao, Yao Junqiang, Liu Zhihui, et al. Spatiotemporal dynamic change characteristics of evapotranspiration in Tianshan Mountains from 2000 to 2014 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 266-273. [邓兴耀, 姚俊强, 刘志辉, 等. 2000—2014年天山山区蒸散发时空动态特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 266-273.]
- [18] Chen Yaning, Li Weihong, Fang Gonghuan, et al. Review article: Hydrological modeling in glacierized catchments of cen-

- tral Asia-status and challenges[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(2): 669-684.
- [19] Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan. Changes of key hydrological elements and research progress of water cycle in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(1): 1-8. [陈亚宁, 李稚, 方功焕. 中亚天山地区关键水文要素变化与水循环研究进展[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(1): 1-8.]
- [20] 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.
- [21] Gao Hongkai, Li Hong, Duan Zheng, et al. Modelling glacier variation and its impact on water resource in the Urumqi Glacier No. 1 in Central Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 1160-1170.
- [22] Gao Hongkai, Feng Zijing, Zhang Tong, et al. Assessing glacier retreat and its impact on water resources in a headwater of Yangtze River based on CMIP6 projections[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 765: 142774.
- [23] Wang Jingjing, Gao Hongkai, Liu Min, et al. Parameter regionalization of the FLEX-global hydrological model[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(4): 571-588.
- [24] Gao Hongkai, Sabo J L, Chen Xiaohong, et al. Landscape heterogeneity and hydrological processes: A review of landscape-based hydrological models[J]. *Landscape Ecology*, 2018, 33(9): 1461-1480.
- [25] Guan Xuefeng, Yao Junqiang, Schneider C. Variability of the precipitation over the Tianshan Mountains, Central Asia. Part I: Linear and nonlinear trends of the annual and seasonal precipitation[J]. *International Journal of Climatology*, 2022, 42(1): 118-138.
- [26] Li Yupeng, Chen Yaning, Sun Fan, et al. Recent vegetation browning and its drivers on Tianshan Mountain, Central Asia [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107912.
- [27] Zhang Y N, Xu C C, Li W H, et al. Climate change characteristics and impacts on surface runoff in the Kaidu River Basin [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(1): 81-89.
- [28] Shen Yanjun, Shen Yanjun, Fink M, et al. Trends and variability in streamflow and snowmelt runoff timing in the southern Tianshan Mountains [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 173-181.
- [29] Xu Baorong, Lu Zhixiang, Liu Shiyin, et al. Glacier changes and their impacts on the discharge in the past half-century in Tekes watershed, Central Asia[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, 89: 96-103.
- [30] Li Weihong, Wang Lin. Preservation and utilization of water and soil environment in Taxihe River catchment, Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 1997, 20(2): 54-60. [李卫红, 王琳. 新疆塔西河流域水土环境分析及保护利用[J]. *干旱区地理*, 1997, 20(2): 54-60.]
- [31] Yu D, Yimithi H. Runoff characteristics and responses to precipitation in the ebinur lake basin: a case study of Boertala River [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21: 94-99.
- [32] Tian Haowei, Chen Fulong, Long Aihua, et al. Response and prediction of runoff to climate change in the headwaters of the Bortala River[J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(9): 1432-1442. [田昊玮, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 博尔塔拉河源区径流对气候变化的响应及预测[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(9): 1432-1442.]
- [33] Lange S. Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(7): 3055-3070.
- [34] Arendt A, Bliss A, Bolch T, et al. Randolph Glacier inventory - a dataset of global glacier outlines: Version 6.0: Technical report, global land ice measurements from space[R]. GLIMS Technical Report, RGI Consortium, 2017.
- [35] Lesi Muchu, Nie Yong, Shugar D H, et al. Landsat- and Sentinel-derived glacial lake dataset in the China-Pakistan Economic Corridor from 1990 to 2020 [J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(12): 5489-5512.
- [36] Gao Hongkai, Ding Yongjian, Zhao Qiudong, et al. The importance of aspect for modelling the hydrological response in a glacier catchment in Central Asia[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(16): 2842-2859.
- [37] Huss M, Juvet G, Farinotti D, et al. Future high-mountain hydrology: A new parameterization of glacier retreat [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(5): 815-829.
- [38] Gupta H V, Kling H, Yilmaz K K, et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(1/2): 80-91.
- [39] Whittemore A, Ross M R V, Dolan W, et al. A participatory science approach to expanding instream infrastructure inventories[J]. *Earth's Future*, 2020, 8(11): e2020EF001558.
- [40] Brun F, Berthier E, Wagnon P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(9): 668-673.
- [41] 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.]
- [42] Wang Puyu, Li Zhongqin, Huai Baojuan, et al. Spatial variability of glacial changes and their effects on water resources in the Chinese Tianshan Mountains during the last five decades [J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(6): 717-727.
- [43] Wang Anqian, Su Buda, Huang Jinlong, et al. Runoff components and the contributions of precipitation and temperature in a highly glacierized river basin in Central Asia [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2023, 17(2): 361-377.
- [44] Kang Shichang, Guo Wanqin, Wu Tonghua, et al. Cryospheric changes and their impacts on water resources in the Belt and Road regions[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(1): 1-17. [康世昌, 郭万钦, 吴通华, 等. “一带一路”区域冰冻圈变化及其对水资源的影响[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(1): 1-17.]
- [45] Kozhikkodan Veetil B, de Souza S F. Study of 40-year glacier retreat in the northern region of the Cordillera Vilcanota, Peru, using satellite images: preliminary results[J]. *Remote Sensing Letters*, 2017, 8(1): 78-85.
- [46] Xu Chunhai, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al. Spatio-temporal changes of mass balance in the ablation area of the muz taw glacier, sawir mountains, from multi-temporal terrestrial geodetic surveys[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(8): 1465.
- [47] Xu Fei, Jia Yangwen, Peng Hui, et al. Vertical zonality of the water cycle and the impact of land-use change on runoff in the Qingshui River Basin of Wutai Mountain, China [J]. *Hydrolog-*

- ical Sciences Journal, 2019, 64(16): 2080-2092.
- [48] Yang Zhenjing, Zhang Yun, Bi Zhiwei, et al. Surface pollen distribution in the southern slope of Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(6): 880-889. [杨振京, 张芸, 毕志伟, 等. 新疆天山南坡表土花粉的初步研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34(6): 880-889.]
- [49] Yang Zhenjing, Zhang Yun, Ren Haibao, et al. Altitudinal changes of surface pollen and vegetation on the north slope of the Middle Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(5): 799-810.
- [50] Symonds M E. Faculty opinions recommendation of IPCC, 2021: Summary for policymakers[R]//Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.
- [51] Sun Ying, Zhang Xuebin, Ding Yihui, et al. Understanding human influence on climate change in China[J]. National Science Review, 2022, 9(3): nwab113.
- [52] Gao Bing, Qin Yue, Wang Yuhua, et al. Modeling ecohydrological processes and spatial patterns in the upper Heihe Basin in China[J]. Forests, 2015, 7(12): 10.
- [53] Huo Yuxia, Gou Xiaohua, Liu Wenhua, et al. Climate-growth relationships of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) along an altitudinal gradient in the western Tianshan Mountains, northwest China[J]. Trees, 2017, 31(2): 429-439.
- [54] Liu Qun, Yang Zhaoping, Han Fang, et al. NDVI-based vegetation dynamics and their response to recent climate change: A case study in the Tianshan Mountains, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(16): 1-15.
- [55] Zhang Rong, Ouyang Zutao, Xie Xiao, et al. Impact of climate change on vegetation growth in arid northwest of China from 1982 to 2011[J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 364.

The simulation of hydrological elements and climate change impacts in typical basins of Tianshan Mountains

NI Jingwen¹, GAO Hongkai¹, QIN Yanhua², ZHANG Wenxin³, HE Tianhao¹,
YONG Leilei¹, FENG Zijiang¹

(1. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276826, Shandong, China; 3. Department of Physical Geography and Ecological Science, Lund University, Lund SE223 62, Sweden)

Abstract: Because of varied topography and landscape heterogeneity, Tianshan Mountain has extremely complex hydrological processes. Considering that the climate change poses a great threat to the water security, it's necessary to simulate the change of water elements quantitatively and systematically along with elevation. In this study, we applied the modified FLEX^G- Δh model to four classic river basins in Tianshan Mountain in consideration of glacier area changes. The results suggested that: (1) FLEX^G- Δh model has high simulation accuracy for the historical runoff process because the average Kling-Gupta coefficient (I_{KGE}) in calibration is 0.75 and I_{KGE} in validation is 0.60. (2) Precipitation increases along with elevation while runoff and evaporation increase first but then decreased, with the maximum values at 4 000 m and 2 000 m respectively. The height zone with the greatest runoff is mainly affected by the glacier cover, while it is the distribution of forest for the greatest evaporation. (3) By 2100, the glaciers at low altitudes will melt significantly, while there will be a little melting above 4 500 m. Under SSP1-RCP2.6 and SSP5-RCP8.5 scenarios, 145 and 222 glaciers will completely melt and the volume of glaciers will decrease $1.81 \times 10^4 \text{ km}^3$ (54% of the existing glaciers) and $2.44 \times 10^4 \text{ km}^3$ (73% of the existing glaciers), respectively. In the SSP5-RCP8.5 scenario, the rise of temperature will increase the evaporation but lead to the fact that the runoff depth will decrease $0.16 \sim 1.40 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ below 4 000 m and increase $0.20 \sim 0.67 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ above 4 000 m, causing the height of peak value will go up by about 500 m. Under SSP1-RCP2.6 scenario, there will be few obvious changes. This study presented the vertical zonal law of hydrology and vegetation, and predicted the impact of global changes on the Tianshan Mountains, which provided theoretical support for water utilization and sustainable development.

Key words: FLEX^G- Δh model; simulation and prediction of water resources; climate change; landscape; vertical zonality

(责任编辑: 许民)