

雅鲁藏布江奴下站以上流域径流模拟与水源组成解析

孙嘉宁¹,王铁铮¹,王天赫¹,吕春汐¹,张会兰^{1,2,3},张志强^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院; 2. 北京林业大学水土保持国家林业和草原局重点实验室;
3. 重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站)

摘要:基于第三极地区长时间序列高分辨率的地面气象要素驱动数据集,采用 VIC-glacier 模型对 1979—1998 年雅鲁藏布江奴下站以上流域多水文站的径流及积雪深度开展多站点率定和验证,并依据模拟结果深入解析了流域水源组成的空间分异特征。结果表明:VIC-glacier 模型对研究区上、中、下游及全流域径流的模拟表现出色,其中奴下站的纳什效率系数达 0.93;模拟结果再现了积雪深度的季节性变化趋势及空间分布格局;水源组成解析表明,降雨径流为主要补给来源(贡献率为 71.7%),其次为融雪径流(贡献率为 18.0%),融冰径流贡献较小(贡献率为 10.3%);空间梯度上,从上游高寒冰区至下游季风影响区,融冰径流占比显著降低,融雪径流贡献增加且峰值发生期提前,揭示了流域冰雪融水补给模式由上游以冰川融水为主,向中下游以积雪融水为主的格局转变。

关键词:径流模拟;VIC-glacier 模型;水源组成;积雪深;雅鲁藏布江

Runoff simulation and water source composition analysis in basin above Nuxia Station of the Yarlung Zangbo River//Sun Jianing¹, Wang Tiezheng¹, Wang Tianhe¹, Lyu Chunxi¹, Zhang Huilan^{1,2,3}, Zhang Zhiqiang^{1,2} (1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University; 3. Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station)

Abstract: Based on the Third Pole Meteorological Forcing Dataset (TPMFD), the VIC-glacier model was used to calibrate and verify the runoff and snow depth of multiple hydrological stations in the basin above Nuxia Station of the Yarlung Zangbo River from 1979 to 1998. Based on the simulation results, the spatial differentiation characteristics of water source composition in the basin were deeply analyzed. The results show that the VIC-glacier model performs well in the simulation of runoff in the upper, middle and lower reaches of the study area and the whole basin, and the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of Nuxia Station is 0.93. The simulation results reproduced the seasonal variation trend and spatial distribution pattern of snow depth. The analysis of water source composition showed that rainfall runoff was the main recharge source (contribution rate is 71.7%), followed by snow-melting runoff (contribution rate is 18.0%), and ice-melting runoff contributed less (contribution rate is 10.3%). On the spatial gradient, from the upstream alpine ice area to the downstream monsoon affected area, the proportion of ice-melting runoff decreased significantly, the contribution of snow-melting runoff increased and the peak period advanced, revealing the supply mode of ice-snow meltwater in the basin has changed from glacier meltwater in the upper reaches to snow meltwater in the middle and lower reaches.

Key words: runoff simulation; VIC-glacier model; water source composition; snow depth; the Yarlung Zangbo River

雅鲁藏布江流域作为世界上海拔最高、地形复杂度最突出的河流系统之一^[1],其水文过程受冰川融水、季节性积雪、降雨补给及冻土活动层的综合影响,具有显著的空间异质性和动态复杂性^[2-3]。该流域横跨湿润至干旱气候区,且水文站点、气象站点主要集中在中下游,导致上游高海拔区域数据稀缺。这种特殊的地理与气候条件使得径流模拟和水源结

构解析面临多重挑战,包括气象输入的空间代表性不足、模型参数的区域适应性差异以及多圈层水文相互作用的机制不明^[4-6]。

近年来,学者们在高精度降水数据重建方面取得了突破性进展。例如:Sun 等^[7]基于 262 个雨量筒逐月降水数据、天气研究与预报模式(WRF)和 ERA5 降水数据,利用随机森林算法重建了雅鲁藏

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF1302900)
作者简介:孙嘉宁(2000—),男,博士研究生,主要从事流域水文研究。E-mail: sjn410@qq.com
通信作者:张会兰(1984—),女,教授,博士,主要从事流域水沙过程研究。E-mail: zhanghl@bjfu.edu.cn

布江流域近 70 年 10 km 分辨率的逐日降水数据,其在高山区降水空间分配特征刻画上提升显著;Shao 等^[8-10]利用高分辨率 WRF 模拟和机器学习算法对 ERA5 降水数据进行降尺度,融合高密度地面站点后,得到第三极地区长时间序列高分辨率地面气象要素驱动数据集(TPMFD),显著提升了降水空间分布的精度。在取得高精度降水数据重建突破的同时,学者们在雅鲁藏布江流域水文模拟方面也取得了重要进展。例如:田富强等^[11]基于 THREW 模型提出了水文分区曲线(HPC)分步率定法,将参数按径流组分控制关系分组校准,实现降雨(66%)、融雪(20%)、融冰(14%)贡献率的量化;杨大文等^[12]基于耦合冰川-冻土模块的 GBEHM 模型,发现上游径流量近 30 年以每 10 a 25.8 mm 的速率显著增加,并量化了降水-径流-蒸散的平衡关系;Wang 等^[4]通过中国科学院青藏高原所构建的多圈层水文监测网,综合主流冰冻圈水文模型的径流组分模拟,明确了径流组分的贡献比例。

随着高精度降水数据重建技术和水文模拟技术的持续进步,流域内降水-径流过程的精细刻画成为可能。然而,以下关键科学挑战仍亟待解决:①在青藏高寒区等气候敏感区域,降水输入的空间异质性与地形效应耦合作用显著,尽管 TPMFD 数据显著提升了降水空间分布的精度,但其在冰川积累区与消融区的适用性仍需进一步验证;②现有研究对模型的率定多依赖径流数据,却未能充分纳入积雪动态过程(如雪水当量、积雪深度时空演变)对融水过程的驱动特征,因此积雪动态变化对径流时空分布的有效性验证仍需强化;③水源组成的空间异质性解析不足,当前研究多以全流域尺度进行组分来源分析,但上游因冰川覆盖率差异、地形梯度变化导致的径流组分空间分异特征,仍缺乏量化解析。

鉴于此,本文拟融合多源数据与先进模型方法,通过在传统 VIC 模型中引入基于度日因子法的冰川消融模块,构建 VIC-glacier 模型,深化冰川区水文过程的刻画,并基于 TPMFD 构建雅鲁藏布江奴下站以上流域多站点协同模拟框架。利用 1979—

1998 年多站点水文数据(涵盖径流、积雪深度等)开展同步率定,系统解析从上游高寒冰川区至下游季风影响区的水源组成梯度演变特征,以期揭示降水-积雪-冰川融水的多圈层水文耦合机制提供方法参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区为雅鲁藏布江奴下站以上流域,位于 27°N ~ 32°N、82°E ~ 95°E,地势起伏大(2 917 ~ 7 168 m),平均海拔高程在 4 000 m 以上,流域面积约 19.1 万 km²。根据雅鲁藏布江干流上设置的 3 座水文站(奴各沙站、羊村站、奴下站)的地理位置对研究区进行划分,由西至东依次为上游、中游、下游(图 1),子流域面积分别约为 10.6 万、4.5 万、4.0 万 km²。研究区气候垂直分异显著^[13-14],降水量由上游至下游总体呈增加趋势(200 ~ 2 000 mm),多年平均气温在空间上差异显著(-2 ~ 2℃),并随高程升高而明显降低。剧烈变化的地形和降水量的差异对植被分布格局产生了显著影响,随着海拔的升高,植被类型从下游低海拔地区的草丛、阔叶林逐渐过渡到针叶林,直至上游高海拔区域的高原草甸以及高寒地带的稀疏植被。在超过 5 000 m 的高海拔地区,广泛分布着冰川,覆盖总面积约为 1.3 万 km²,冰川径流占总径流量的比例超过 10%,表明冰川融化对雅鲁藏布江的径流有显著影响。

1.2 数据来源

本文所用的数字高程数据(DEM)来源于地理数据空间云(<https://www.gscloud.cn/>);气象数据来源于 TPMFD(<https://doi.org/10.11888/Atmos.tpdc.300398>)中的逐日最高气温、最低气温、降水量、风速数据,时间范围为 1979—2023 年;土壤性质数据来源于寒区旱区科学中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>);植被数据选用马里兰大学公开发布的全球 1 km 分辨率的土地覆盖类型数据;冰川数据采用青藏高原 1976 年冰川数据(TPG1976, V1.0)(<https://doi.org/10.11888/GlaciolGeocryo>。

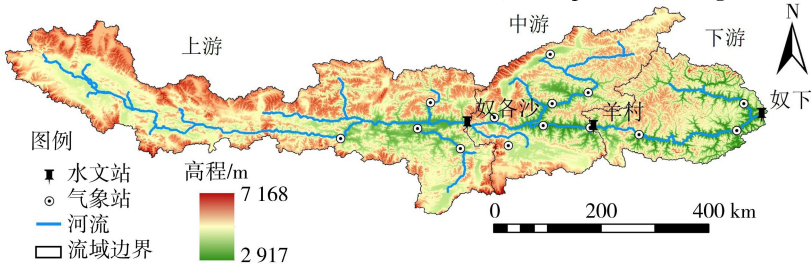


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

tpc.00000047. file)作为度日模型的初始输入数据,并基于青藏高原 2017 年冰川数据 (TPG2017, V1.0) (<https://doi.org/10.11888/Glacio.tpdc.270924>) 利用度日模型单独验证冰川退缩过程;积雪数据采用中国雪深长时间序列数据集 (1979—2024 年) (<https://doi.org/10.11888/Geogra.tpdc.270194>);径流观测数据来源于奴各沙、羊村、奴下水文站的实测月尺度数据。

为确保模型输入数据的空间一致性,对多源异构数据进行了统一的网格化预处理。所有数据集均通过地理信息系统 (GIS) 平台重采样至模型计算单元的基准分辨率。具体如下:DEM、TPMFD 和积雪数据等连续型变量,采用双线性插值法进行空间重采样,以保持其空间连续性与梯度特征;土壤类型和植被覆盖数据则分别重采样至目标网格,并计算每个栅格内各类土壤属性与植被类型的面积占比,生成次网格尺度的分类比例文件,用于模型中地表异质性的参数化表达;冰川数据由栅格格式转换为矢量 (.shp) 文件,随后与模型目标网格进行空间叠加分析,计算各栅格内冰川覆盖面积占比,作为模型中冰川模块的输入参数。经上述处理后,所有数据在空间上实现精确匹配,构成时序连续、空间对齐的分布式水文模拟输入数据集。

2 研究方法

2.1 VIC-glacier 模型

VIC 模型是一种用于模拟大尺度陆地表面和地下水资源动态变化的分布式水文模型。模型综合考虑土地利用、土壤特性、植被覆盖及气象条件等因素对水循环过程的影响,以实现对高寒地区水文过程的精细化模拟。在蒸散发计算中,模型涵盖裸土蒸发,还考虑了植被冠层截留再蒸发和植物蒸腾作用,从而更准确地估算区域总蒸散发量。垂直方向上采用多层土壤结构反映降水入渗过程和土壤含水量的动态变化,通过逐层下渗机制更好地模拟径流形成与地下水补给。同时,模型充分体现了不同地表覆盖类型 (如高山草甸、裸岩地等) 对水文响应的差异性,有效评估植被类型、土壤质地和地形起伏等因素对下渗速率、土壤蓄水能力及基流形成的影响,提升了对复杂地形与典型高寒环境下的水文过程模拟能力。将研究区按 $0.0833^{\circ}\times0.0833^{\circ}$ 划分为 2 772 个网格单元进行独立计算,每个网格拥有独立的地貌高程、土壤属性、植被覆盖和气象数据,确保热通量和水文变量计算的个性化^[15-18],之后利用汇流程序汇集各网格单元的产流结果至流域出口。

雅鲁藏布江流域冰川覆盖比例较高,径流组分

受冰川融水影响较大。鉴于原始 VIC 模型尚未包含冰川消融过程的计算模块,在冰川补给流域的适用性不高,本文引入度日模型描述冰川消融过程,将其与 VIC 模型耦合,构建 VIC-glacier 模型来模拟流域逐日流量过程。该模型在青藏高原地区的径流模拟中有较好的效果,能准确刻画青藏高原东南部等冰川密集区的冰川径流过程^[19-24]。在 VIC-glacier 模型的参数约束方面,为准确解析流域内部水源结构的真实演变,本文针对冰川消融模块与土壤水文模块实施了分层独立的参数约束策略。首先,利用 1976 年和 2017 年的独立冰川面积与体积演变数据,对度日因子的正弦函数参数进行独立率定以施加物理约束,从而准确分离出响应长期气候变化的冰川融水;其次,在此基础上,利用多站点实测径流数据对控制短时间尺度水文过程的参数开展协同率定。总径流和各径流组分的计算公式为:

$$R_{t,i} = f_i R_{g,i} + (1 - f_i) R_{v,i} \tag{1}$$

其中

$$R_{g,i} = P_i + G_i \quad R_{v,i} = R_{p,i} + R_{s,i}$$

$$G_i = \begin{cases} g_i (T_i - T_0) & T_i > T_0 \\ 0 & T_i \leq T_0 \end{cases}$$

$$g_i = \frac{b_{6,i} + b_{12,i}}{2} + \frac{b_{6,i} - b_{12,i}}{2} \sin \left[\frac{2\pi}{365} (n - 81) \right]$$

式中: $R_{t,i}$ 为网格 i 的总径流深; f_i 为网格 i 的冰川覆盖比例; $R_{g,i}$ 为网格 i 的融冰径流深; $R_{v,i}$ 为原始 VIC 模型计算的网格 i 的径流深; P_i 为网格 i 的降水量; G_i 为网格 i 的冰川融水量; T_i 为网格 i 的日平均气温; T_0 为冰川消融的临界温度,本文取 0.5°C ; $R_{p,i}$ 为网格 i 的降雨径流深; $R_{s,i}$ 为原始 VIC 模型计算的网格 i 融雪径流深; g_i 为网格 i 的冰川度日因子,由正弦函数计算以表示其季节变化^[25]; $b_{6,i}$ 为网格 i 的 6 月冰川度日因子值,反映一年中消融最旺盛时期的融化效率; $b_{12,i}$ 为网格 i 的 12 月冰川度日因子值,反映一年中消融最弱或无消融时期的基准值。基于前人对雅鲁藏布江子流域冰川物质平衡观测数据的研究,确定各子流域初始度日因子值:上游取值根据雅拉冰川设定为 $10.97\text{ mm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$ ^[26];中游取值根据扎当冰川设定为 $9.2\text{ mm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$ ^[27];下游取值根据仁龙巴冰川设定为 $6.2\text{ mm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$ ^[28]。以初始值为基础,采用冰川体积-面积法^[23]率定优化各子流域正弦函数参数,最终参数根据 2017 年冰川模拟结果选定,以准确反映季节性变化特征。

在水源组成解析中,以奴下站径流表征研究区的特征;奴各沙站径流用于表征上游子流域;中游子流域径流利用羊村站与奴各沙站径流差值表征;下游子流域则利用奴下站与羊村站的径流差值表征。

2.2 模型参数率定与评价指标

本文选取 1979—1998 年为研究时段,将 1979 年作为模型预热期,1980—1990 年作为模型率定期,1991—1998 年作为模型验证期。采用奴各沙站、羊村站、奴下站的月尺度实测径流数据进行多站点模型率定与验证。具体而言,采用一套参数集,同时利用 3 个站点的实测径流数据进行模型的联合率定。在模型参数设置中,气候地理参数、植被参数和土壤参数在构建模型中一般可直接标定,不再更改,但与产流密切相关的水文参数需要根据流域实测水文资料率定。需要率定的参数包括:下渗曲线指数 (B)、最底层土壤发生的最大基流速率 (D_m)、基流非线性增长发生时速率与 D_m 的比值 (D_s)、基流非线性增长时最底层土壤含水量与最大含水量的比值 (W_s)、下渗曲线指数 (c) 以及第 1、2、3 层土层深度 (d_1 、 d_2 、 d_3)。其中, c 、 d_1 一般分别取 2、0.1 m。

选取水文学中常用的纳什效率系数 (NSE) 和 Kling-Gupta 效率系数 (KGE) 评估模拟性能。其中, NSE 是衡量模拟值与实测值吻合程度的核心指标,其值越接近 1,表示模型模拟效果越好。根据部分国内学者基于实际应用^[29-30]进行分级: NSE 为 1 表明模拟值与实测值相等; > 0.9 为极优水平; >0.7~0.9 为良好水平; >0.5~0.7 为可接受水平; ≤0.5 为不可接受水平。最终选择使奴各沙站、羊村站、奴下站 3 个站点 NSE 平均值最高的参数组合作为最优参数集,以确保模型在多个关键断面均表现出良好的模拟表现,能够在反映各区域独特水文过程特性的同时,兼顾整个流域的整体响应特征。

3 结果与分析

3.1 径流率定与验证

采用冰川度日因子法模拟冰川消融过程,并结合冰川体积-面积法对各区域正弦函数参数进行了率定与优化,最终确定上、中、下游 6 月冰川度日因子平均值分别为 15.25、13.52、12.52 mm/(℃·d), 12 月冰川度日因子平均值分别为 6.71、4.88、3.88 mm/(℃·d),并基于该参数集对冰川面积占比的模拟值与实测值进行了对比,结果如图 2 所示。由图 2 可见,冰川面积占比的模拟值与实测值之间表现出高度的一致性,均方根误差 (RMSE) 仅为 2.34%,相对偏差 (BIAS) 为 0.64%,表明模拟结果具有较高的精度和较小的系统误差,表明冰川模块能够有效地捕捉冰川面积的变化特征,为 VIC-glacier 模型的构建提供了可靠的基础数据支持。

利用 VIC-glacier 模型对研究区径流量进行长时间序列模拟,采用手动调参法对关键参数进行协

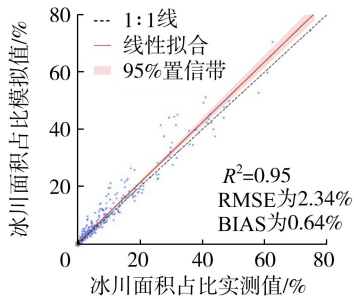


图 2 冰川面积占比模拟值与实测值对比
Fig. 2 Comparison of simulated and measured glacier area proportion

同优化,最终确定 B 为 0.6, D_m 为 10 mm/d, D_s 为 0.6, W_s 为 0.01, d_2 为 0.63 m, d_3 为 1.00 m,该参数集在 3 个站点均取得较高的模拟精度(图 3),表明模型具有良好的整体性能和空间适用性。

由图 3 可见,奴下站为研究区流域的出口站, NSE、 R^2 、KGE 在率定期分别为 0.93、0.95、0.91,在验证期分别为 0.90、0.91、0.92,表明 VIC-glacier 模型对整个流域径流变化的模拟能力达到极优水平。模型成功模拟了丰水期(每年 6—9 月)径流高峰和枯水期(12 月至次年 2 月)径流量的低谷变化,准确捕捉到了季节性波动和极端事件。羊村站为中游和下游的分界站, NSE、 R^2 、KGE 在率定期分别为 0.89、0.95、0.76,验证期分别为 0.85、0.93、0.74,均达到良好水平。位于上游的奴各沙站, NSE、 R^2 、KGE 在率定期分别为 0.92、0.93、0.90,验证期分别为 0.84、0.87、0.86,模拟效果为良好水平。总体而言, VIC-glacier 模型在上游、中游、下游以及全流域均表现出良好的适用性。

图 4 为 3 个水文站月尺度径流量模拟值与实测值的散点图。由图 4 可见,3 个水文站在率定期和验证期内的散点分布趋势基本一致。在低流量区域,散点较为集中,而在高流量区域,散点分布相对离散。由图 4(a)可见,大部分数据点均匀分布在 1:1 拟合线两侧,表明奴下站的模拟值与实测值之间具有较高的吻合度 ($R^2=0.93$)。由图 4(b)(c)可见,低流量区域的数据点多位于 1:1 拟合线左侧,说明模型在这些站点对枯水期径流量存在一定程度的高估;在高流量区域,多数点分布在 1:1 拟合线右侧,表明模型对洪峰流量有所低估。整体来看,散点的分布特征进一步验证了 VIC-glacier 模型在整体趋势上具备良好的稳定性与准确性,但在极端流量条件下仍存在改进空间。

3.2 积雪模拟验证

为了评估 VIC-glacier 模型在积雪模拟方面的准确性,采用中国雪深长时间序列数据集作为实测

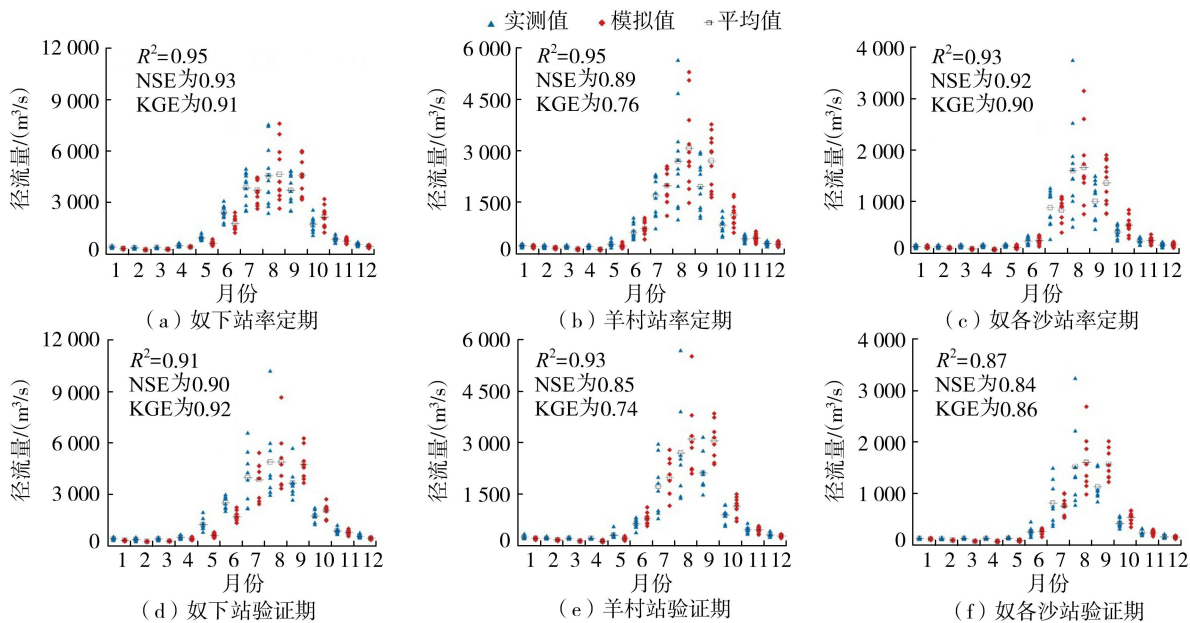


图 3 3 个水文站率定期和验证期 VIC-glacier 模型径流模拟结果

Fig. 3 Runoff simulation results of VIC-glacier model in calibration and validation periods of three hydrological stations

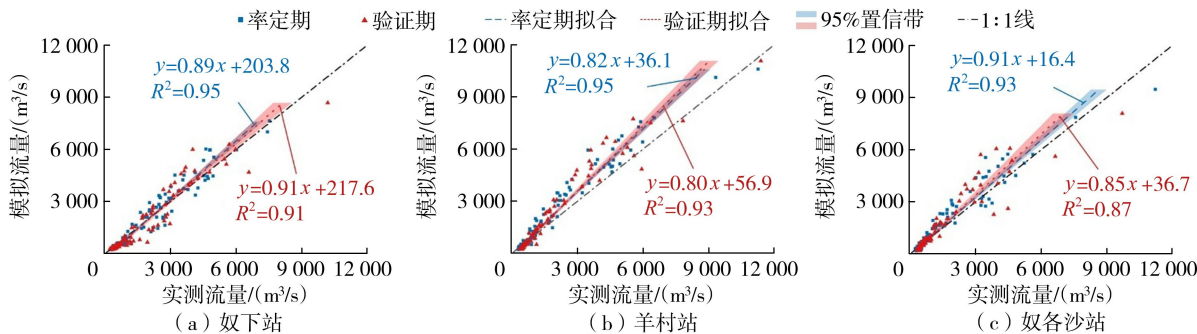


图 4 3 个水文站月尺度径流量模拟值与实测值的散点图

Fig. 4 Scatter plots of monthly runoff simulation versus measured values for three hydrological stations

值进行积雪模拟验证,结果如图 5 所示。由图 5 可见,VIC-glacier 模型能够较好地捕捉到雪深的季节性变化趋势。在冬季(12 月至次年 2 月),随着降雪量的增加,实测雪深逐渐上升至约 4.2 cm,模型模拟值呈现出相似的增长趋势,最大值亦趋近 4.1 cm,表明模型在描述冬季积雪累积过程方面具有较高的精度。进入春季(3—6 月),随着气温升高和融雪作用

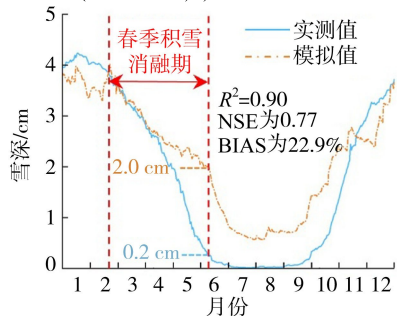


图 5 积雪模拟验证结果

Fig. 5 Snow simulation verification results

的增强,实测雪深迅速下降至接近 0.2 cm,模拟值同样呈现出快速减少的趋势,但模拟的最低雪深值为 2.0 cm,这一现象表明,模型虽可有效模拟春季融雪的整体趋势,但在雪深消融的最终阶段存在一定的低估现象。

图 6 为研究区多年平均雪深模拟值与实测值的空间分布。由图 6 可见,VIC-glacier 模型总体上能够准确捕捉到研究区雪深的主要空间分布特征。在高值区,如东北部和西部部分地区,模型再现了由于海拔较高、降雪量较大而导致的高雪深值;在低值区,如中部和西部的部分低海拔地区,模型显示出了接近 0 的积雪深,这表明模型在识别无雪或浅雪覆盖区域方面表现良好。同时,模型对于无雪或浅雪覆盖范围存在一定的偏差,例如在中部地区,模型模拟的无雪或浅雪覆盖范围比实际观测要广,表现为模拟的积雪量偏少,这意味着模型可能未能充分考虑局地气候条件、微地形以及植被覆盖等因素对积

雪消融的具体影响,高估了该区域内融雪速度。图7为1980—1998年研究区及各子流域年均雪深变化。由图7可见,模型能够再现多年雪深的变化特征,特别是在捕捉雪深峰值的发生时间上表现较好,这体现了其对积雪累积和消融过程的良好模拟能力,需要注意的是在长期趋势变化的模拟上仍有一定的改进空间。

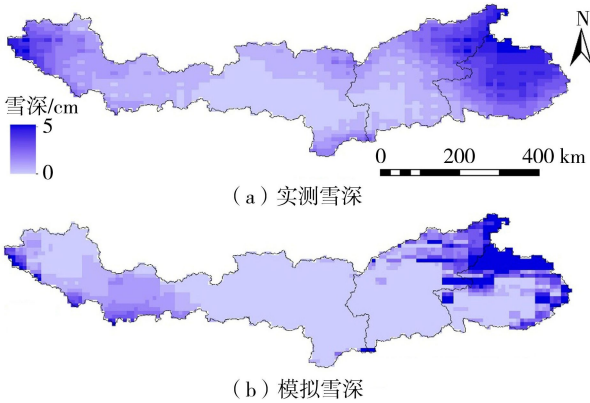


图6 研究区多年平均雪深模拟值与实测值的空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of simulated and measured average snow depth over years in study area

综上所述,VIC-glacier模型对研究区雪深的模拟表现出较高的准确性和可靠性,可有效捕捉积雪的季节性变化趋势和主要的空间分布特征,在冬季积雪累积和识别低海拔地区的无雪覆盖方面表现突

出,但同时需注意在春季末期雪深消融时出现低估现象、在中部地区浅雪或无雪覆盖区出现高估现象,在雪深长期变化趋势方面仍有改进空间。

3.3 水源组成解析

图8为研究区及各子流域的月尺度径流组成,图9为研究区及各子流域的月尺度径流组分贡献率。由图8、图9可见,不同子流域的径流过程呈现显著的“季节协同”与“错峰”特征。总径流量的季节分布呈单峰型,各径流组分(降雨径流、融冰径流、融雪径流)亦呈现相似形状,在季节分布上趋势一致;从贡献率来看,降雨径流占据主导地位(贡献率为71.7%),融雪径流次之(18.0%),而融冰径流相对贡献较小(10.3%)。在年内分配上,总径流与各组分呈现出“错峰”现象。具体而言,降雨径流在季风推进期(6月初)呈现突变响应特征,在7—10月保持较高水平(贡献率为68.0%~71.8%),形成了主汛期;融雪径流过程表现出双驱动机制:3—5月积雪消融主要受春季气温回升控制^[31-32](平均贡献率31.4%),而8—10月(平均贡献率19.9%)与气温和日照时长的变化紧密相关^[33];2—4月融冰径流较低,而同期融雪径流较高,显示出融雪先于融冰发生的现象;随着高山冰川进入消融期(6—9月),融冰径流维持在一个较高水平(平均贡献率16.5%),这与高山地区的温度上升及冰川消融规律

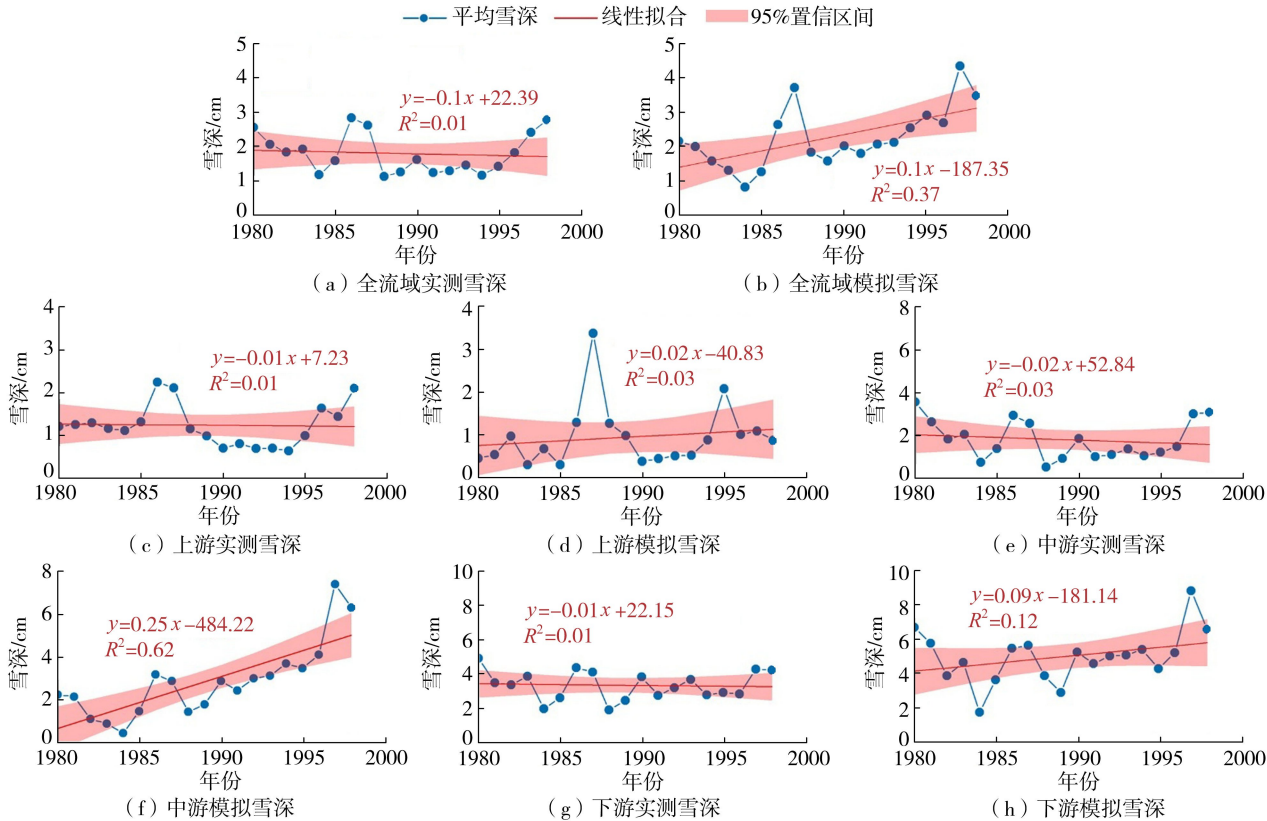


图7 1980—1998年研究区及各子流域年均雪深变化

Fig. 7 Change of annual average snow depth in study area and each sub-basin from 1980 to 1998

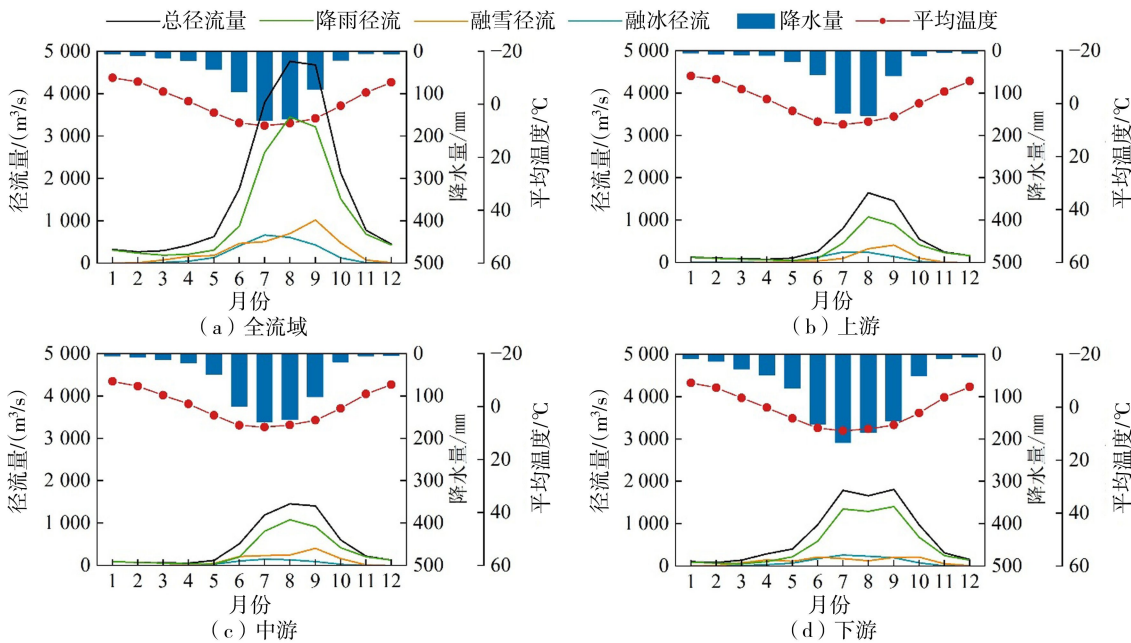


图 8 研究区及各子流域月尺度径流组成

Fig. 8 Runoff composition at monthly scale in study area and each sub-basin

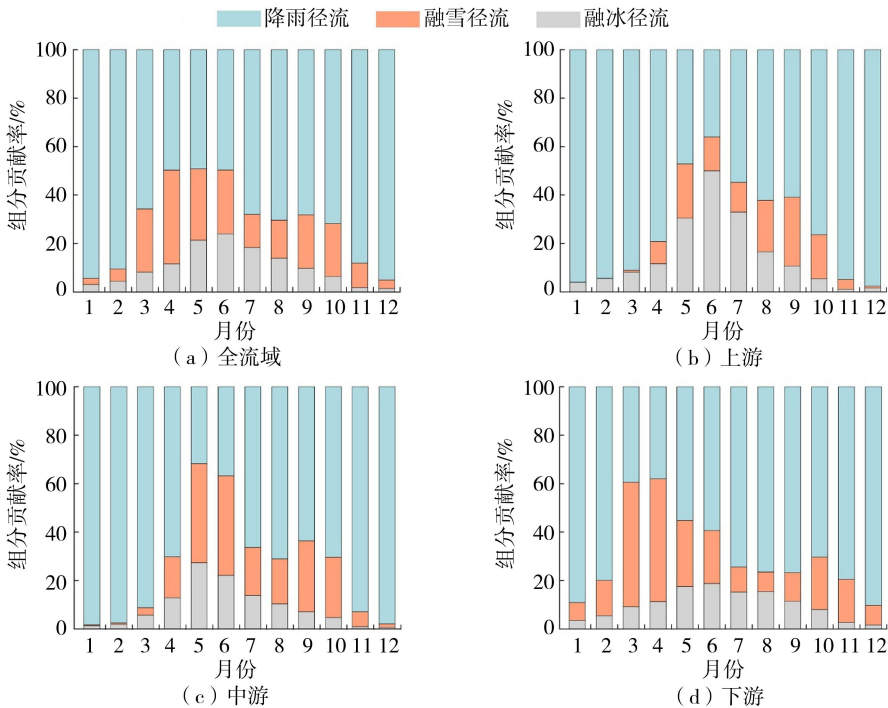


图 9 研究区及各子流域月尺度径流组分贡献率

Fig. 9 Contribution rate of runoff composition at monthly scale in study area and each sub-basin

相吻合。这种多水源的异步补给机制,对流域极端水文事件发生频率具有明显的减缓作用。

在上游子流域,径流的季节性变化与全流域趋势相似,但融冰径流的贡献更为显著(贡献率为14.9%)。在年内分配上,降雨径流在6月初因季风推进略有增强,在整个径流组成中占比相对较低(36.1%),7—10月的增幅有限;融冰径流在6—9月的贡献率为27.6%,高于全流域平均水平,反映

了高山冰川对径流的重要影响;此外,春季3—5月未见显著的融雪径流增加,表明此期间积雪消融不明显或积累量不足以引发大规模融雪径流。相反,8—10月由于气温升高和日照时间延长,融雪径流达到峰值,这说明夏季末至初秋才是上游的主要融雪期,此时温度条件更利于积雪快速融化,形成较大融雪径流(贡献率为22.6%)。

在中游子流域,降雨径流仍主导径流构成(贡

献率为 74.0%),并在 7—10 月维持较高水平。融雪径流在 4—6 月及 9—10 月表现明显,贡献率分别为 33.0%、27.1%。与上游子流域相比,融雪过程更受局地气候条件调控,且对径流的贡献有所增强,体现出中游地形过渡带积雪融化对径流补给的重要性。融冰径流相对较小,在 6—9 月贡献率为 13.4%,说明中游仍有少量高山冰川或冻土区参与水文循环。

在下游子流域,具有明显的雨源型河流特征。全年降雨径流占比最高(贡献率为 69.0%),尤其在 6—10 月随季风降水显著增长,形成主汛期。融雪径流则相对较弱,仅在 3—5 月降水不足时有贡献率有一定体现(贡献率为 43.1%),反映出上游来水的影响逐渐减弱。融冰径流仍保持一定比例(贡献率为 10.1%),表明高山冰川融水对下游径流仍具有一定补给作用,尤其是在夏季高温时段(贡献率为 16.8%)。然而,相较于降雨径流的主导地位,融冰径流的贡献相对有限,水源组成仍以降水驱动为主,多水源调节能力较弱,下游子流域呈现出水源补给类型相对单一、季节波动明显的特征。

总体而言,全流域尺度上降雨径流占据主导地位,融冰和融雪径流则通过错峰补给,形成了多水源协同调节的水文格局,有效缓解了极端水文事件的发生频率。上游子流域融冰径流贡献率大,体现出高山冰川对径流稳定性的关键作用;融雪径流主要集中在 8—10 月,反映温度驱动下积雪集中消融的特点。中游子流域表现为多水源共同补给的过渡型结构,融雪在春秋季节贡献增强,表明局地气候和地形对水文过程的重要调控。下游子流域则具有明显的雨源型河流特征,降雨仍为主要水源,夏季高温期间冰川融水亦发挥一定补给作用,说明高山融水对整个流域水资源供给具有持续影响。

表 1 为研究区及各子流域径流组分的平均贡献率。由表 1 可见,由上游至下游,降雨径流在各区域均占主导地位,但冰雪融水的内部结构发生明显转变,融冰径流占比显著下降,而融雪径流贡献增加且其发生期提前。该空间格局表明,流域内冰雪融水补给模式由上游高寒区以冰川融水贡献较高为特

表 1 研究区及各子流域径流组分的平均贡献率

Table 1 Average contribution rate of runoff components in study area and each sub-basin			
区域	降雨径流/%	融雪径流/%	融冰径流/%
全流域	71.7	18.0	10.3
上游子流域	74.2	10.9	14.9
中游子流域	74.0	16.9	9.1
下游子流域	69.0	20.9	10.1

征,逐渐过渡到中下游以季节性积雪融水贡献为主导的格局。高山冰川与积雪在全流域水文过程中仍发挥着不可忽视的水源补给作用,尤其在干旱或少雨时期展现出重要的调节功能。

4 讨 论

针对高寒区水文模拟中普遍存在的空间代表性不足和过程验证薄弱等挑战,本文构建的适用于冰川覆盖流域的 VIC-glacier 模型显著增强了对冰川消融过程的物理刻画能力,并在此基础上构建了“多站点径流协同率定+积雪过程独立验证”的综合验证框架。与以往研究多依赖单一出口断面径流数据进行率定不同,本文同步利用上、中、下游的实测径流数据进行联合率定,有效约束了模型参数,显著提升了模型在流域内部不同区域的适用性^[34]。同时,利用中国雪深长时间序列数据集对模型的积雪深度模拟结果进行了独立验证。这种双重验证策略在整体上提升了模拟结果的可靠性。此外,成功应用并验证了 TPMFD 在雅鲁藏布江复杂地形区的适用性,为高寒区水文模拟提供了高质量的输入保障。

表 2 为雅鲁藏布江流域相关研究结果。可见,本文对雅鲁藏布江流域径流组分的解析结果与既有研究存在双重一致性,一方面印证了“降雨径流占主导地位”的核心结论,另一方面支持了“融雪径流贡献普遍大于冰川融水”的普遍规律。然而,受空间范围界定差异、水文模型结构异质性及数据源选择性偏差的影响,不同研究在融雪径流(7.8%~23.8%)与融冰径流(1.8%~30.5%)在贡献率上呈现显著变幅。本文研究结果(融雪贡献率 18.0%,融冰贡献率 10.3%)处于该区间的中值范围,具有较好的可比性和合理性。然而,本文模拟结果仍存在一定程度的不确定性,主要源于高寒地区观测数据的匮乏以及模型结构与遥感产品的固有限^[35]。由于高海拔地区地面气象观测站点极为稀疏,再分析数据集在强降水事件的强度、时空分布及降水相态(雨/雪)判定方面存在一定偏差,尤其在冰川积累区等数据空白区域,降水输入的可靠性受到严重制约^[36]。此类输入误差将直接传导至水文模拟过程,进而影响降雨径流和早期融雪径流的估算精度,再分析数据对洪峰模拟精度仍需提高;积雪过程模拟与验证存在双重不确定性,一方面所采用的遥感雪深数据受云污染、森林遮蔽及地表异质性影响,存在系统性偏差,另一方面模型基于温度指数法模拟消融,未充分考虑辐射、风速等能量项,物理表征简化。另外, VIC-glacier 模型在春季普遍存在消融过慢或模拟偏差,该结果是模型结构局限与观测不确

表 2 雅鲁藏布江流域相关研究结果

Table 2 Relevant research results of the Yarlung Zangbo River Basin

文献	研究时段	研究区	融雪径流/%	融冰径流/%
[11]	2001—2015 年	雅鲁藏布江流域	20.0	14.0
[27]	1980—2000 年	雅鲁藏布江奴下站以上流域	23.8	13.9
[37]	1961—1991 年	雅鲁藏布江奴下站以上流域	23.0	11.6
[38]	1998—2007 年	雅鲁藏布江流域	8.9	15.9
[39]	2007—2014 年	雅鲁藏布江流域	10.6	9.9
[40]	2003—2014 年	雅鲁藏布江奴下站以上流域	7.8	30.5
[41]	1985—2014 年	雅鲁藏布江流域	13.2	1.8
[42]	1998—2019 年	雅鲁藏布江流域	17.2	5.5
[43]	2002—2018 年	雅鲁藏布江奴下站以上流域	11.4	14.2
本文	1979—1998 年	雅鲁藏布江奴下站以上流域	18.0	10.3

定性共同所致,制约了融雪径流的精确反演;采用度日因子法参数化冰川消融,虽应用广泛,但属于经验简化模型,结果高度依赖度日因子等关键参数。由于缺乏上游冰川物质平衡和消融实测数据,参数主要通过径流间接率定,存在较大主观性与不确定性。此外,采用差值法估算区间径流会因观测误差累积等引入一定不确定性,但该方法学误差主要影响绝对水量的精细估算,并未改变本文关于各水源组分相对贡献及空间梯度的解析结果,不影响核心结论的可靠性。未来亟须加强地面观测网络建设,并发展融合能量平衡机制的高分辨率冰冻圈-水文耦合模型,以降低不确定性,提升对气候变化下径流动态的预测能力。

5 结 论

- a. 基于 TPMFD 数据集构建的 VIC-glacier 模型在雅鲁藏布江的上游、中游、下游以及全流域均表现出较强适用性,尤其在奴下站模拟效果达到了极优水平 (NSE 大于 0.9),充分验证了 TPMFD 数据集和 VIC-glacier 模型在高寒地区水文模拟中的适用性与可靠性。
- b. 通过构建“多站点径流协同率定+积雪过程独立验证”的综合评估框架,结果表明模型在准确模拟径流的同时,也能合理再现积雪的时空变化特征,进一步增强了 VIC-glacier 模型模拟结果的物理可信度。
- c. 径流来源解析结果表明,降雨径流占主导 (贡献率为 71.7%),融雪次之 (贡献率为 18.0%),融冰贡献较小 (贡献率为 10.3%);径流组分季节分布呈错峰补给,这种多水源异步结构能有效缓解极端水文事件的发生频率。
- d. 径流组分呈显著空间分异,降雨径流在各区域均占主导,但冰雪融水作为全流域关键补给源仍不可忽视,从上游至下游,融冰径流占比显著下降,融雪径流贡献增加且发生期提前,流域冰雪融水补

给模式由上游以冰川融水为主,向中下游以积雪融水为主的格局转变。

参考文献:

[1] 刘浏,王宣宣,牛乾坤,等. 雅鲁藏布江流域陆地水储量变化特征及归因[J]. 农业工程学报, 2021, 37 (14): 135-144. (Liu Liu, Wang Xuanxuan, Niu Qiankun, et al. Evolution characteristic of terrestrial water storage change and its attribution analysis over the Yarlung Zangbo River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37 (14): 135-144. (in Chinese))

[2] Xuan Weidong, Xu Yueping, Fu Qiang, et al. Hydrological responses to climate change in Yarlung Zangbo River basin, Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 597:125761.

[3] 左德鹏,韩煜娜,徐宗学,等. 气候变化对雅鲁藏布江流域植被动态的影响机制[J]. 水资源保护, 2022, 38 (6): 1-8. (Zuo Depeng, Han Yuna, Xu Zongxue, et al. Impact mechanism of climate change on vegetation dynamics in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (6): 1-8. (in Chinese))

[4] Wang Lei, Cuo Lan, Luo Dongliang, et al. Observing multisphere hydrological changes in the Largest River Basin of the Tibetan Plateau[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103 (6): E1595-E1620.

[5] Zheng Hui, Yang Zongliang, Lin Peirong, et al. On the sensitivity of the precipitation partitioning into evapotranspiration and runoff in land surface parameterizations[J]. Water Resources Research, 2019, 55 (1): 95-111.

[6] Wang Lei, Yao Tandong, Chai Chenhao, et al. TP-river: monitoring and quantifying total river runoff from the Third Pole[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, 102 (5): E948-E965.

[7] Sun He, Yao Tandong, Su Fengge, et al. Corrected ERA5 precipitation by machine learning significantly improved flow simulations for the Third Pole basins[J]. Journal of

- Hydrometeorology, 2022, 23(10): 1663-1679.
- [8] Shao Changkun, Yang Kun, Tang Wenjun, et al. Convolutional neural network-based homogenization for constructing a long-term global surface solar radiation dataset[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 169: 112952.
- [9] Jiang Yaozhi, Tang Wenjun, Yang Kun, et al. Development of a high-resolution near-surface meteorological forcing dataset for the Third Pole region[J]. Science China Earth Sciences, 2025, 68(4): 1274-1290.
- [10] Jiang Yaozhi, Yang Kun, Qi Youcun, et al. TPHiPr: a long-term (1979-2020) high-accuracy precipitation dataset (130°, daily) for the Third Pole region based on high-resolution atmospheric modeling and dense observations [J]. Earth System Science Data, 2023, 15(2): 621-638.
- [11] 田富强, 徐冉, 南熠, 等. 基于分布式水文模型的雅鲁藏布江径流水源组成解析[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 324-336. (Tian Fuqiang, Xu Ran, Nan Yi, et al. Quantification of runoff components in the Yarlung Tsangpo River using a distributed hydrological model[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 324-336. (in Chinese))
- [12] 杨大文, 王宇涵, 唐莉华, 等. 雅鲁藏布江上游径流变化及影响因素分析[J]. 水力发电学报, 2023, 42(3): 41-49. (Yang Dawen, Wang Yuhuan, Tang Lihua, et al. Analysis of runoff changes and their causes under climate changes in upper Yarlung Zangbo River basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(3): 41-49. (in Chinese))
- [13] 杜军, 高佳佳, 陈涛, 等. 1981—2024 年雅鲁藏布江流域降水集中度与特征量季节性变化[J]. 干旱区研究, 2025, 42(7): 1159-1172. (Du Jun, Gao Jiajia, Chen Tao, et al. Spatiotemporal variations of the precipitation concentration index and seasonal precipitation characteristics in the Yalung Zangbo River Basin from 1981 to 2024 [J]. Arid Zone Research, 2025, 42(7): 1159-1172. (in Chinese))
- [14] 张仪辉, 刘昌明, 梁康, 等. 雅鲁藏布江流域降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 603-618. (Zhang Yihui, Liu Changming, Liang Kang, et al. Spatio-temporal variation of precipitation in the Yarlung Zangbo river basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 603-618. (in Chinese))
- [15] Pei Yanyan, Dong Jinwei, Zhang Yao, et al. Evolution of light use efficiency models: improvement, uncertainties, and implications[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 317: 108905.
- [16] 柳宏才, 张会兰, 孙嘉宁, 等. 基于 VIC 模型的金沙江流域水文要素分析和径流预测研究[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 272-284. (Liu Hongcai, Zhang Huilan, Sun Jianing, et al. Research on hydrological element analysis and runoff prediction in the Jinsha River Basin based on the VIC model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 272-284. (in Chinese))
- [17] 薛宝林, 周璇, 王国强, 等. 雅鲁藏布江生态系统水源涵养功能变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2025, 45(7): 3157-3168. (Xue Baolin, Zhou Xuan, Wang Guoqiang, et al. Changes in water retention function of the Yarlung Zangbo River ecosystem and identification of its leading influencing factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3157-3168. (in Chinese))
- [18] 谢灵枫, 杨肖丽, 吴凡, 等. 黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 10-17. (Xie Lingfeng, Yang Xiaoli, Wu Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 10-17. (in Chinese))
- [19] 王一冰, 谢先红, 施建成, 等. 多源降水数据驱动下青藏高原径流集合模拟[J]. 科学通报, 2021, 66(32): 4169-4186. (Wang Yibing, Xie Xianhong, Shi Jiancheng, et al. Ensemble runoff modeling driven by multi-source precipitation products over the Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(32): 4169-4186. (in Chinese))
- [20] 李辰龙, 李大洋, 王强, 等. 未来气候变化下帕隆藏布江流域不同重现期洪水量级的预估[J]. 水科学进展, 2025, 36(2): 332-344. (Li Chenlong, Li Dayang, Wang Qiang, et al. Future design flood projections in the Parlun Zangbo River basin under climate change[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(2): 332-344. (in Chinese))
- [21] Wang Yibing, Xie Xianhong, Shi Jiancheng, et al. Accelerated hydrological cycle on the Tibetan Plateau evidenced by ensemble modeling of Long-term water budgets[J]. Journal of Hydrology, 2022, 615: 128710.
- [22] Su Ting, Miao Chiyuan, Duan Qingyun, et al. Hydrological response to climate change and human activities in the Three-River Source Region [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27(7): 1477-1492.
- [23] Ji Haoyu, Peng Dingzhi, Gu Yu, et al. Snowmelt runoff in the Yarlung Zangbo River Basin and runoff change in the future[J]. Remote Sensing, 2023, 15(1): 55.
- [24] 谷黄河, 刘宇清, 王晓燕, 等. 基于 VIC-glacier 模型的拉萨河水文模拟及冰川径流研究[J]. 水文, 2024, 44(1): 90-95. (Gu Huanghe, Liu Yuqing, Wang Xiaoyan, et al. Hydrology simulation and glacier runoff study in Lhasa River Basin based on VIC_glacier model [J]. Journal of China Hydrology, 2024, 44(1): 90-95. (in Chinese))
- [25] Braun L N, Grabs W, Rana B. Application of a conceptual precipitation-runoff model in the Langtang Kfola Basin, Nepal Himalaya [J]. Snow and Glacier Hydrology, 1993 (218): 221-237.

- [26] Sun He, Su Fengge. Precipitation correction and reconstruction for streamflow simulation based on 262 rain gauges in the upper Brahmaputra of southern Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125484.
- [27] 吴倩如, 康世昌, 高坛光, 等. 青藏高原纳木错流域扎当冰川度日因子特征及其应用[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 891-897. (Wu Qianru, Kang Shichang, Gao Tanguang, et al. The characteristics of the positive degree-day factors of the Zhadang glacier on the Nyainqêntanglha range of Tibetan Plateau, and its application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 891-897. (in Chinese))
- [28] 刘金平, 张万昌. 雅鲁藏布江流域度日因子空间变化[J]. 中国科学院大学学报, 2018, 35(5): 704-711. (Liu Jinping, Zhang Wanchang. Spatial variability in degree-day factors in Yarlung Zangbo River Basin in China[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(5): 704-711. (in Chinese))
- [29] 曾晓岚, 王涛涛, 罗万申, 等. 设施农业生产区降雨径流和氮磷输出特征及模拟: 以滇池东岸花卉大棚种植区为例[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1061-1069. (Zeng Xiaolan, Wang Taotao, Luo Wanshen, et al. Characteristics and simulation of rainfall runoff and nitrogen & phosphorus outputs in facility agricultural area: a case study of flower greenhouse region in the East Coast of Lake Dianchi[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(5): 1061-1069. (in Chinese))
- [30] 周鹏, 许月萍, 周欣磊, 等. 基于多模型融合的椒江流域季节性径流集合预报[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(3): 62-69. (Zhou Peng, Xu Yueping, Zhou Xinlei, et al. Ensemble forecasting of seasonal streamflow in the Jiaojiang River Basin based on multi-model fusion[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(3): 62-69. (in Chinese))
- [31] 徐小蓉, 田园诗, 孙其诚, 等. 1979—2021 年雅鲁藏布江流域雪深时空特征研究[J]. 水力发电学报, 2023, 42(9): 58-69. (Xu Xiaorong, Tian Yuanshi, Sun Qicheng, et al. Study on spatiotemporal characteristics of snow cover depth in Yarlung Zangbo River basin in 1979-2021[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(9): 58-69. (in Chinese))
- [32] 班春广, 徐宗学, 左德鹏, 等. 高寒流域水文模拟与径流水源解析: 以雅鲁藏布江帕隆藏布上游流域为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(1): 85-93. (Ban Chunguang, Xu Zongxue, Zuo Depeng, et al. Hydrological simulation and runoff components analysis in the high cold alpine region: case study in the upper reaches of the Parlung Zangbo watershed of the Yarlung Zangbo River basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2023, 59(1): 85-93. (in Chinese))
- [33] 余舒含, 张新军. 雅鲁藏布江流域气温变化特征及趋势分析[J]. 农业灾害研究, 2020, 10(4): 50-51. (Yu Shuhan, Zhang Xinjun. Analysis on the characteristics and trend of temperature change in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2020, 10(4): 50-51. (in Chinese))
- [34] Ashu A B, Lee S I. Multi-site calibration of hydrological model and spatio-temporal assessment of water balance in a monsoon watershed[J]. Water, 2023, 15(2): 360.
- [35] Lei Xiangyong, Lin Peirong, Zheng Hui, et al. Systematic analyses of the meteorological forcing and process parameterization uncertainties in modeling runoff with Noah-MP for the Upper Brahmaputra river basin[J]. Journal of Hydrology, 2025, 653: 132686.
- [36] Yan Shirui, Chen Yang, Hou Yaliang, et al. Which global reanalysis dataset has better representativeness in snow cover on the Tibetan Plateau? [J]. The Cryosphere, 2024, 18(9): 4089-4109.
- [37] Zhang Leilei, Su Fengge, Yang Daqing, et al. Discharge regime and simulation for the upstream of major rivers over Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(15): 8500-8518.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 江科. 雅鲁藏布江流域径流组成及其对气候变化的响应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [41] Khanal S, Lutz A F, Kraaijenbrink P D A, et al. Variable 21st Century climate change response for rivers in high mountain Asia at seasonal to decadal time scales [J]. Water Resources Research, 2021, 57(5): e2020WR029266.
- [42] Wang Yuanwei, Wang Lei, Zhou Jing, et al. Vanishing glaciers at southeast Tibetan Plateau have not offset the declining runoff at Yarlung Zangbo [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(21): e2021GL094651.
- [43] 成嘉美. 2002—2018 年雅鲁藏布江流域冰雪融水变化及其对径流的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2024.

(收稿日期: 2025-09-18 编辑: 王芳)