

融合再分析数据与观测降水的金沙江上游径流模拟

吴志勇¹, 张子昀¹, 刘杨合², 何海¹, 刘茜元¹, 施怡然¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443000)

摘要:针对金沙江上游观测站点稀疏以及高寒山区复杂水文过程导致的径流模拟难题,提出一种融合 ERA5-Land 再分析数据与观测降水的 VIC 模型模拟方案。基于模拟结果,对比分析了遥感监测与模型输出的积雪覆盖率,并讨论了流域融雪径流变化特征以及气温对融雪径流的影响。结果表明:仅采用观测降水构建的 VIC 模型较难模拟流域真实的径流过程,而采用融合数据可将时段径流模拟的确定性系数在率定期和验证期分别提高至 0.80 和 0.74,相对误差降低至 20% 以内;模型输出的积雪覆盖率与遥感监测呈现良好的一致性,流域融雪径流年际变化稳定,年内差异较大,呈现双峰特征,春季融雪径流与气温有较大的相关性。

关键词:径流模拟;融合降水;ERA5-Land 再分析数据;VIC 模型;能量平衡模式;金沙江上游

中图分类号:P338 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0205-08

Runoff simulation in upper reaches of the Jinsha River based on fusion of reanalysis data and observed precipitation//WU Zhiyong¹, ZHANG Ziyun¹, LIU Yanghe², HE Hai¹, LIU Xiyuan¹, SHI Yiran¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, China)

Abstract: To address the challenges of runoff simulation caused by the sparse observation stations in the upper reaches of the Jinsha River and the complex hydrological processes in the alpine mountainous areas, a VIC model simulation scheme based on fusion of ERA5-Land reanalysis data and observed precipitation was proposed. Based on the simulation results, the snow coverage rate of remote sensing monitoring and model output was compared and analyzed, and the variation characteristics of snowmelt runoff in the basin and the influence of temperature on snowmelt runoff were discussed. The results show that the VIC model constructed only by observed precipitation is difficult to simulate the real runoff process of the basin, while the certainty coefficient of hourly runoff simulation is increased to 0.80 and 0.74 respectively in the calibration period and validation period by using the fusion data, and the relative error is significantly reduced to less than 20%. The output snow coverage rate of the model is in good agreement with remote sensing monitoring. The interannual variation of snowmelt runoff in the basin is stable, and the difference between the years is large, showing bimodal characteristics. There is a large correlation between snowmelt runoff and temperature in spring.

Key words: runoff simulation; fusion precipitation; ERA5-Land reanalysis data; VIC model; energy balance mode; upper reaches of the Jinsha River

青藏高原作为多条重要河流发源地,被认为是全球气候变化的关键调节区和响应区^[1]。金沙江上游位于青藏高原与横断山脉交界地区^[2],该区域不仅气候条件严酷、地形复杂多变,而且基础设施相对滞后,致使观测站点分布稀疏,成为典型的缺资料地区。在高寒山区进行径流模拟时,必须综合考虑积雪与融雪过程,其机理受多种外部环境和内部条件的共同影响。受限于气象观测资料的匮乏以及高寒山区水文过程的特殊性,金沙江上游的水文模拟

与预报研究面临诸多挑战。

在缺资料地区进行水文模拟首先需要解决的问题是如何获取精确可靠的降水数据^[3]。再分析数据可以提供高分辨率、空间覆盖完整的长序列降水数据^[4],对气象观测站点稀疏地区起到很好的补充作用,有效地解决了缺资料地区降水数据来源的问题^[5]。在缺资料地区使用再分析数据代替观测数据作为水文模型输入来进行水文模拟已经成为一种重要的方法^[6-7],近年来被广泛应用^[8-14]。例如:唐

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U2240225);长江电力股份有限公司科技项目(Z242302050);水灾害防御全国重点实验室自主研究项目(524015512)

作者简介:吴志勇(1979—),男,教授,博士,主要从事水文物理规律及水文预报研究。E-mail:zywu@hhu.edu.cn

豪等^[15]基于 ERA5-Land 再分析数据对西北缺资料地区进行了径流模拟,模拟结果能反映实际的径流变化情况,但对无降水事件存在低估;徐华亭等^[1]利用 ERA5-Land 再分析数据开展了青藏高原典型流域的径流模拟研究,发现 ERA5-Land 再分析数据驱动 VIC(variable infiltration capacity)模型在研究区适用性较好,但是模型对洪峰的模拟精度还有待提高。现有研究大多使用未校正的再分析数据,而再分析数据在采集和处理过程中具有很大的不确定性,降水数据输入的不确定性会进一步加大径流模拟的误差。因此本文通过将再分析数据与观测降水进行融合以提升数据精度^[16-18]。

由于高寒山区水文过程的特殊性,水文模型需要准确刻画寒区水文要素^[19],如积雪、融雪、冰川消融、土壤冻融等^[20]。董宁澎等^[21]构建了考虑融雪产流和土壤冻融的新安江模型,提升了流域冰雪消融期的水文模拟精度。余文君等^[22]的研究表明基于初始的 SWAT(soil and water assessment tool)模型不能很好地反映高寒山区的融雪过程,在其基础上与能量平衡模式的融雪模型耦合后,径流模拟精度有所提高。现有研究表明,传统的水文模型缺少对积雪融雪的刻画过程,需要耦合融雪模块或与能量平衡的融雪模型耦合。VIC 模型不仅能同时考虑能量和水量平衡,还能够精细刻画积雪、融雪、土壤冻融等过程,在高寒山区有良好的适用性^[23-26]。

鉴于此,本文将融合数据输入 VIC 模型,对金沙江上游流域进行径流模拟分析,并探讨气温变化特征与融雪径流的相关关系,以期高寒山区径流模拟研究提供参考。

1 研究区概况

金沙江上游位于青藏高原的东南部,地理位置为 28°N~32°N、97°E~100°E,地势西北高、东南低^[27],南北跨度较大。该区域气温在南北方向上存在差异,气温北低南高,北部地区多年平均气温为 -4.9~7℃,南部地区为 12~15℃。多年平均降水日数为 100~170 天,岗拖以北地区多年平均降水量为 240~550 mm,雨季为 5—10 月,其降水量占全年的 90%以上,降雪是主要的降水形式,绝大部分地区日降水量在 50 mm 以下。本文以金沙江岗拖站以上流域(以下简称“岗拖流域”)为研究区(图 1),研究区内共有 6 个气象站,为典型的缺资料地区,整体呈现北高南低的地形分布特征。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

模型输入数据包括降水量、气温、气压、风速等,

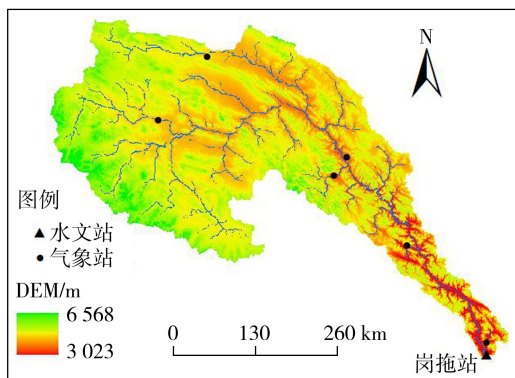


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

降水数据来源于水利部信息中心,其余数据来源于中国气象局国家气象信息中心(<https://data.cma.cn/>)。数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来源于美国航天飞机雷达地形测绘任务所提供的 SRTM1 数据集,精度约 30 m。土壤数据引用 Reynolds 等^[28]发布的全球尺度 10 km 分辨率土壤数据库。植被数据采用美国国家航空航天局的 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 传感器提供的全球陆地覆盖产品 MCD12Q1,该产品的时间分辨率为 1 a,空间分辨率为 500 m。再分析数据使用 ERA5-Land 再分析数据集,该数据集由欧洲中期天气预报中心提供,涵盖了从 1950 年至今的每小时高分辨率地表变量信息,数据集的空间分辨率约为 9 km。积雪面积遥感产品来源于三江源国家公园积雪面积遥感产品数据集(2000—2020 年),分辨率为 500 m。通过一致性分析的方法剔除异常值后,采用线性插值法补齐缺失值,使用反距离加权插值法将上述数据插值到 VIC 模型 5 km 分辨率的网格中。

2.2 研究方法

2.2.1 降水数据融合

由于研究区观测站点稀疏且空间分布不均,本文使用 ERA5-Land 再分析数据作为气象驱动输入。考虑到再分析数据存在系统误差和随机误差,因此在使用前需要以观测降水作为依据,将再分析数据与观测降水进行融合,对再分析数据的系统误差和随机误差进行修正,构建融合降水空间场。

在修正随机误差前,选取研究区内 6 个气象站作为观测站点订正再分析数据的系统误差。气象站与再分析数据网格的空间对应关系如图 2 所示。每月的系统误差订正系数为每个网格在该月的观测降水与再分析数据的比值。通过匹配观测站点与再分析数据的月降水量来修正再分析数据的系统误差,计算公式为

$$P'_{E,h} = P_{E,h} P_{S,m} / P_{E,m} \quad (1)$$

式中: $P'_{E,h}$ 为修正后时段降水量; $P_{E,h}$ 为再分析数据时段降水量; $P_{S,m}$ 为观测站点月降水量; $P_{E,m}$ 为再分析数据月降水量。

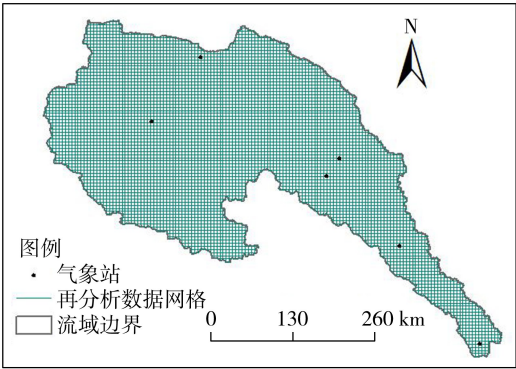


图 2 再分析数据网格及气象站位置

Fig. 2 Reanalysis data grid and meteorological station location

使用逐步订正法将系统误差订正后的再分析数据再进行随机误差订正,该方法的基本思想是在确定了观测数据和背景数据后,对给定影响半径内的观测数据与背景数据之间的误差进行加权处理,从而修正该区域分析场的误差。将再分析数据作为背景数据,观测降水作为观测数据,计算公式为

$$P_i = E_i + \sum_{j=1}^n w_j (S_j - E_j) / \sum_{j=1}^n w_j \tag{2}$$

其中 $w_j = (R^2 - r_j^2) / (R^2 + r_j^2)$
 式中: P_i 为网格 i 的融合数据; E_i 为网格 i 的背景数据; S_j 为测站 j 的观测数据; E_j 为测站 j 的背景数据; n 为给定影响半径内的站点数量; w_j 为测站 j 的误差权重,采用 Gressman 圆形函数计算; R 为影响半径,为保证每个待分析网格在影响半径内至少包含 1 个观测站点,将其设定为 2.25° ; r_j 为测站 j 到待分析网格 i 之间的距离。

2.2.2 VIC 模型

VIC 模型能够同时对水量和能量平衡进行模拟,填补了传统水文模型对能量过程描述的空白,模型的能量平衡计算主要考虑潜热通量、感热通量以及地表热通量。潜热通量反映裸土、植被蒸散发所产生的能量变化;感热通量反映地表与大气之间的温差所引发的热量传递过程;地表热通量反映土壤各层温度与地表之间的差异,这种温差驱动了能量的垂直传递。潜热通量、感热通量以及地表热通量由地表温度确定。可以看出,地表温度作为核心变量,在 3 个能量参数中起到了至关重要的桥梁作用。在理想状态下,地表覆盖的能量平衡表达式为式(3),净辐射由式(4)计算。

$$R_n = H + \rho_w L_e E + G \tag{3}$$

$$R_n = (1 - \alpha) R_s + \varepsilon (R_L - \sigma T_s^4) \tag{4}$$

式中: R_n 为净辐射; H 为感热通量; ρ_w 为水的密度; L_e 为蒸发潜热; E 为植被蒸腾和裸土蒸发, $\rho_w L_e E$ 表示潜热通量; G 为地表热通量; α 为植被覆盖的地表反射率; R_s 、 R_L 分别为向下的短波辐射和长波辐射; ε 为比辐射率; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数^[24]; T_s 为地表温度。

VIC 模型能够考虑地形对径流过程的影响,基于 DEM 将每个网格按照不同的高程划分为若干个高程带。这种划分允许模型更细致地模拟积雪的积累和消融过程,尤其是在山区或高纬度地区,这些地区的积雪覆盖和消融与高程密切相关。通过设置 VIC 模型高程带的数量以及每个高程带的面积比例、平均高程和降水比例,模型会计算每个高程带的平均气温,通过将网格温度分配到每个高程带来实现,对不同高程带的积雪融化过程更准确地模拟。

研究区内地形复杂多变,海拔差异显著。因此,在径流模拟中必须充分考虑地形对水文过程的影响。若用 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 网格进行计算,会导致流域下垫面的特征过于均一化。为了更好地反映地形特征,尤其是山区地形变化对融雪过程的影响,需根据高程将网格进一步细分^[29]。本文将每个网格细分成 4 个高程带,用于 VIC 模型积雪模块的运行。

2.2.3 VIC 模型参数

VIC 模型中有 8 个主要参数,其含义及取值范围见表 1。其中, c 和 d_0 一般分别取固定值 2 和 0.1 m ,其余 6 个水文参数根据研究区所处的位置、气候条件等特性进行初步确定,最后通过 Rosenbrock 参数优选算法^[30]得到最优的参数值。

表 1 VIC 模型主要参数及取值范围

参数	参数含义	取值范围
b	饱和容量曲线形状参数	0~0.4
D_m	底层土壤 24 h 内产生基流的最大值	0~30 mm/d
D_s	基流在非线性增长发生时占最大基流的比例	0.001~1
c	基流非线性增长指数	1.5~2.5
W_s	基流在非线性增长发生时底层土壤含水量与最大土壤含水量的比值	0~1
d_0	第一层土壤厚度	0.01~0.5 m
d_1	第二层土壤厚度	0.1~1.5 m
d_2	第三层土壤厚度	0.1~1.5 m

2.2.4 VIC 模型检验

利用相对误差和确定性系数对模型模拟结果进行检验。相对误差反映了模拟结果的总体精度,绝对值越小意味着模拟精度越高。确定性系数用于评估径流过程模拟的效果,确定性系数越大,表明过程拟合得越好,模拟的精度也就越高^[25]。

3 结果与分析

3.1 融合降水

选择 2016—2020 年为率定期, 2021—2023 年为验证期。分别从率定期和验证期选取两场典型洪水场次, 率定期选取 2017 年 6 月 30 日至 7 月 25 日(过程 1)和 2020 年 8 月 4 日至 8 月 16 日(过程 2), 验证期选取 2021 年 6 月 22 日至 7 月 9 日(过程 1)和 2023 年 6 月 30 至 7 月 25 日(过程 2), 对不同降水数据源的空间分布特征进行分析。图 3 为率定期再分析数据、观测降水以及融合数据的降水量空间分布, 图 4 为验证期不同数据源的降水量空间分布。由图 3 和图 4 可见, 再分析数据的降水量空间分布总体呈从北往南逐渐递增趋势; 观测降水在流域内空间的分布均匀, 没有明显的暴雨中心, 降水量集中在 30~60 mm; 融合数据的降水量空间分布总体趋势与再分析数据一致, 融合数据的降水量空间分布更加合理。统计率定期和验证期不同数据源的流域面平均降水量 P_{AS} , 再分析数据的面平均降水量偏大, 而观测降水的面平均降水量偏小, 融合数据修正了再分析数据高估的问题。综上所述, 融合数据能够结合再分析数据的空间分布特征, 并且能够通过观测降水修正再分析数据降水偏大的问题, 从而提升模型输入数据的精度, 减少模型输入不确定性。

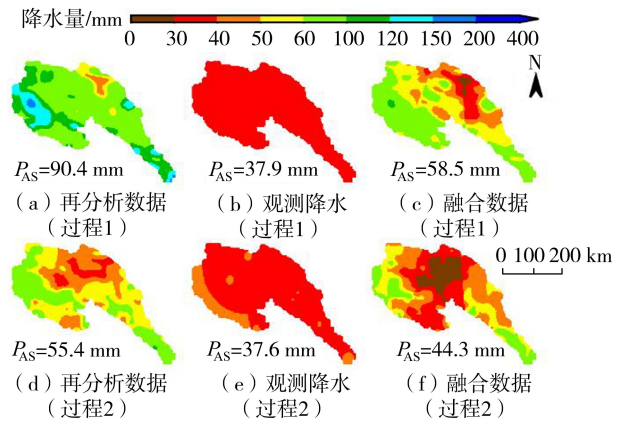


图 3 率定期不同数据源的降水量空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of precipitation from different data sources in calibration period

对比 3 种数据源 2016—2023 年流域面平均降水量年均值(图 5)发现, 3 种数据源在岗拖流域的年均降水量差异显著, 年均降水量最高的为再分析数据, 最低的为观测降水, 3 种数据源年际变化较为平稳。由不同数据源的流域面平均降水量季节分布(图 6)可以看出, 再分析数据在每个季节都存在降水高估, 观测降水则存在降水低估。综上所述, 再分析数据在年尺度和季节尺度上都存在降水高估, 而

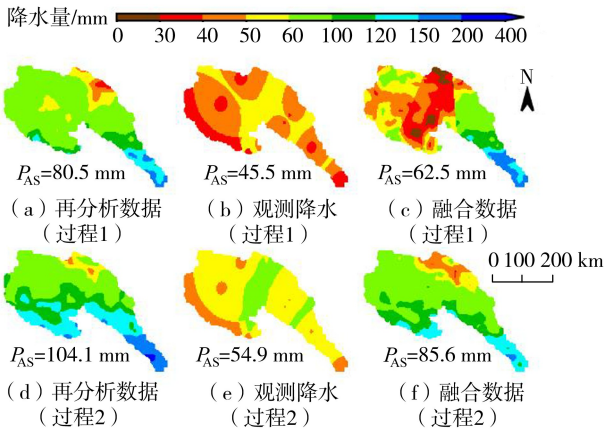


图 4 验证期不同数据源的降水量空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of precipitation from different data sources in validation period

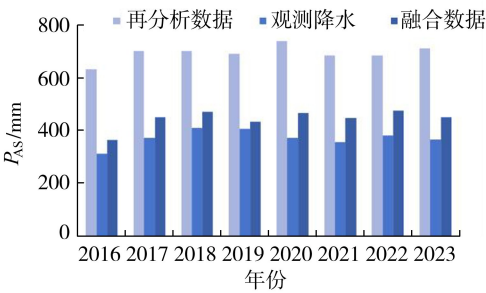


图 5 不同数据源的流域面平均降水量年均值
Fig. 5 Annual average values of basin surface mean precipitation from different data sources

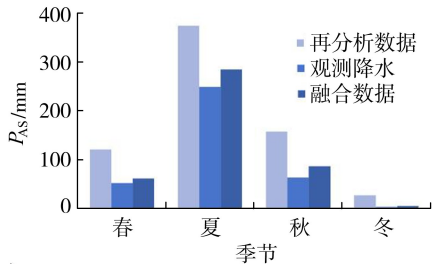


图 6 不同数据源的流域面平均降水量季节分布
Fig. 6 Seasonal distribution of basin surface mean precipitation from different data sources

观测降水都存在降水低估, 融合数据能够结合二者降水特征, 提升降水数据精度。

3.2 径流模拟

表 2 为再分析数据、观测降水和融合数据驱动的 VIC 模型在岗拖流域径流模拟的评价指标。由表 2 可见, 以观测降水和再分析数据驱动的 VIC 模型在岗拖流域的径流模拟表现并不理想。具体而言, 以这两种数据源为气象驱动构建的模型在时段径流模拟中的确定性系数低于 0.3, 同时径流相对误差的绝对值超过了 50%, 这表明模型输出与实际观测值之间存在显著偏差, 难以模拟流域真实的径流过程。相较之下, 采用融合数据作为气象输入的

VIC 模型具有显著优势。在模拟精度方面,径流模拟结果在率定期和验证期的确定性系数分别提升至 0.80 和 0.74,相对误差的绝对值控制在 20% 以内,模拟精度较高。这一结果表明在“岗拖流域”采用融合数据作为模型输入具有较高的可行性,同时也验证了所构建的 VIC 模型在该流域具有良好的适用性。另外,采用融合数据和观测降水驱动的 VIC 模型模拟结果呈现负偏差,即模拟流量低于实测流量,而采用再分析数据的模拟结果呈现正偏差,这与卫星同化算法对极端降水的处理差异有关。

表 2 不同数据驱动的 VIC 模型径流模拟评价指标

Table 2 Evaluation indexes of runoff simulation of VIC model driven by different data			
驱动数据	时段	相对误差/%	确定性系数
再分析数据	率定期	117.05	-1.54
	验证期	104.12	-1.49
观测降水	率定期	-52.26	0.30
	验证期	-61.31	0.04
融合数据	率定期	-10.64	0.80
	验证期	-6.03	0.74

图 7 为不同数据驱动的 VIC 模型径流模拟结果。由图 7 可见,融合数据驱动的 VIC 模型模拟效果最好,而再分析数据和观测降水驱动的 VIC 模型模拟流量与实测流量偏差较大。以 2019 年 7 月 15 日 18 时的径流过程为例,对 3 种数据驱动的 VIC

模型模拟的径流量空间分布进行比较(图 8),可以看出融合数据的径流量空间分布在量级上更为合理,进一步验证了融合数据的优势。

3.3 积雪覆盖模拟

积雪覆盖率变化曲线描述了在积累和融化期间雪盖面积逐渐变化的过程。为了评估模拟效果,将遥感技术监测到的积雪覆盖率与模型模拟的结果进行对比分析,结果如图 9 所示。由图 9(a)可见,2019 年遥感监测积雪年内变化明显,积雪过程主要集中在 1—5 月、10—12 月。其中,高原积雪覆盖率在 3—5 月、11 月到次年 1 月期间达到最大,积雪峰值出现在 4 月初。模型模拟的结果从时间上看与遥感监测的趋势一致,积雪过程主要集中在 1—6 月、9—12 月。遥感监测积雪覆盖率年均值为 0.16,模型模拟积雪覆盖率年均值为 0.17,相对误差为 5.12%。由图 9(b)可见,2020 年遥感监测积雪过程与模型模拟结果一致,主要集中在 1—6 月,7 月到次年 1 月为积雪消融时期。遥感监测积雪覆盖率年均值为 0.15,模型模拟积雪覆盖率年均值为 0.13,相对误差为 14.18%。对比分析可知,VIC 模型模拟的积雪覆盖率与遥感监测数据相比显示出较好的一致性,VIC 模型在积雪模拟方面表现出良好的效果,这主要得益于其在地形因素和能量平衡方面的精细处理。

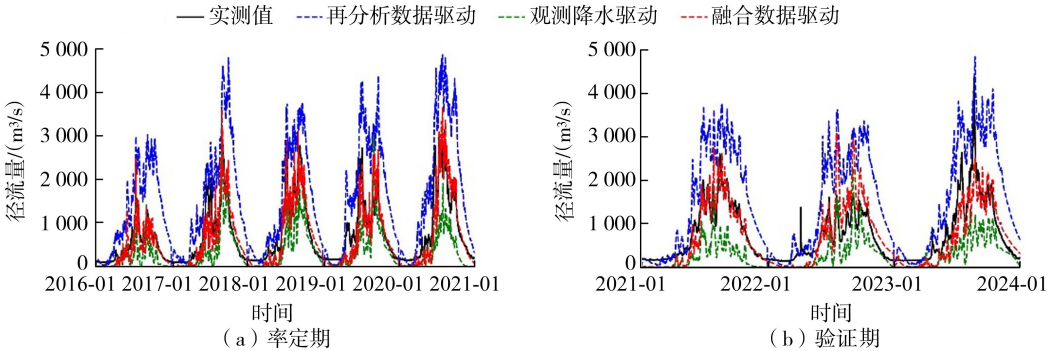


图 7 不同数据驱动的 VIC 模型径流模拟结果
Fig. 7 Runoff simulation results of VIC model driven by different data

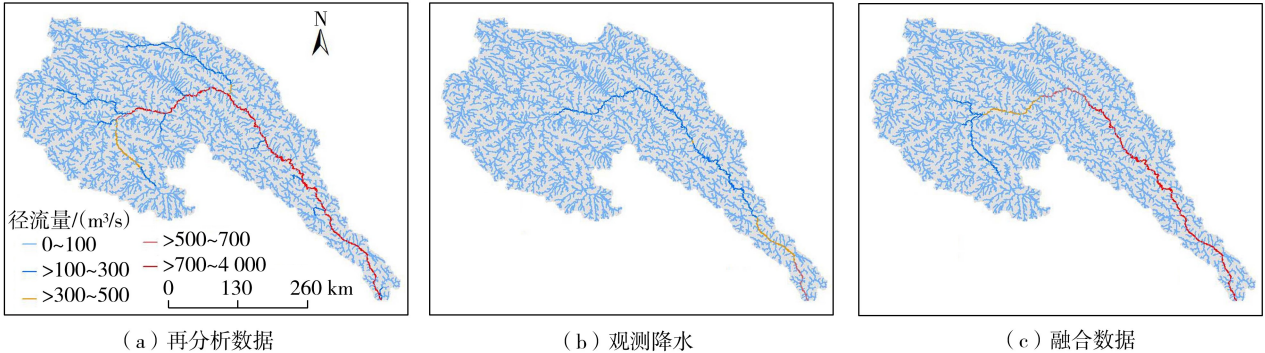


图 8 2019 年 7 月 15 日 18 时不同数据驱动的 VIC 模型模拟径流量空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of runoff simulated by VIC model driven by different data at 18:00 on July 15, 2019

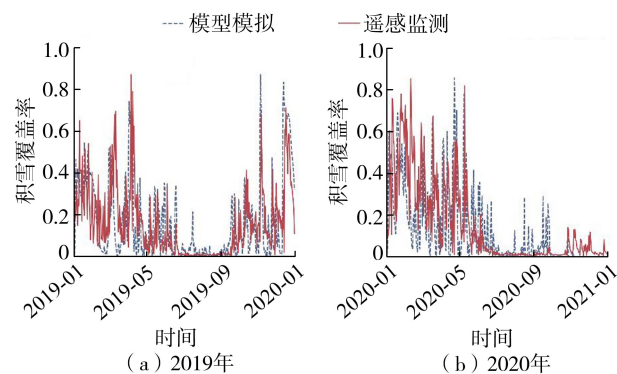


图9 2019年和2020年积雪覆盖率对比

Fig. 9 Comparison of snow coverage in 2019 and 2020

3.4 融雪径流模拟

融雪径流水文效应深刻影响地表径流和大气热交换。在能量平衡模式下,VIC 模型输出的总径流包括降雨径流和融雪径流,通过设置模型输出变量将融雪径流分割出来,分析融雪径流时间变化特征以及气温对融雪径流的影响。

a. 年际变化。分析“岗拖流域”2016—2023 年融雪径流占流域总径流比例的年际变化,发现2016 年和2017 年融雪径流占比分别为 15.40%和 16.26%,呈上升趋势。2018 年融雪径流占比下降到 11.40%,成为研究时段内的最低点。2019 年融雪径流占比回升至 15.87%,接近 2017 年的水平。2020 年下降至 12.81%,2021 年和 2022 年小幅度下降,分别为 12.53%和 12.16%。2023 年融雪径流占比显著上升至 17.12%。总体来看,岗拖流域融雪径流年际变化较为稳定,融雪径流占比为 10%~20%。

b. 年内变化。分析“岗拖流域”2016—2023 年融雪径流占流域总径流比例的年内变化,发现融雪径流占比在不同月份之间存在显著差异,月尺度上融雪径流占比呈现双峰特征。融雪径流占比从 2 月开始升高,5 月达到峰值,2 月融雪径流占比仅为 0.22%,5 月达到 3.81%。整体趋势显示,5 月后开始下降,9 月出现一个小高峰,之后逐渐减少。Jiang 等^[31]研究发现融雪径流随着气温升高而增加,在气温和降水的共同影响下,河道流量减少,因而金沙江上游流域融雪径流年内变化趋势明显,呈现双峰特点,与本文结论一致。

c. 季节变化。分析“岗拖流域”2016—2023 年融雪径流的季节变化特征,发现春季的融雪径流占比最高,达到 7.12%,夏季为 2.49%,相对较低,秋季为 3.81%,冬季最低,仅为 0.77%。总体来看,融雪径流在春季的贡献率最大,秋季次之。这一现象在寒区融雪径流研究中得到了证实。刘晓娇等^[32]在黄河源区的研究表明,春季融雪径流对河流的补

给作用显著,是该地区河流和地下水的重要补给来源。次旦央宗等^[33]在东北寒区白山流域的研究也指出,春季融雪径流对河流流量的贡献率较高,对区域地表水循环和水资源分配产生重要影响。

d. 气温对融雪径流的影响。分析气温对春季融雪径流的影响,结果见表 3。由表 3 可见,春季融雪径流与气温有较好的一致性,3 月气温开始回升,积雪表面开始吸收热量,小部分积雪融化,形成少量融雪径流;随着气温逐渐升高,为积雪大量融化提供了充足的热量,融雪径流占比也逐渐增加,5 月达到峰值。这表明“岗拖流域”气温与春季融雪径流的产生有显著的相关关系。

表3 春季月均气温与融雪径流占比

Table 3 Monthly average temperature and snowmelt runoff ratio in spring			
年份	月份	月均气温/℃	融雪径流占比/%
2016	3	-8.2	0.57
	4	-3.5	3.25
	5	1.4	5.62
2017	3	-9.6	1.77
	4	-2.8	2.04
	5	0.7	5.68
2018	3	-8.1	1.66
	4	-3.0	1.65
	5	1.3	1.72
2019	3	-10.1	1.57
	4	-2.8	1.84
	5	1.2	3.46
2020	3	-8.5	0.92
	4	-4.5	2.51
	5	0.1	3.76
2021	3	-7.2	1.83
	4	-4.4	1.69
	5	1.2	3.64
2022	3	-5.8	0.03
	4	-3.3	0.97
	5	1.9	3.31
2023	3	-8.2	2.88
	4	-3.6	1.27
	5	0.3	3.32

4 结 论

a. 融合数据能够结合再分析数据的空间分布特征,并通过观测降水修正再分析数据偏大的问题,从而提升模型输入数据的精度,提高模型模拟精度。岗拖流域作为典型的缺资料地区,使用观测降水作为气象驱动数据输入构建的 VIC 模型,较难模拟流域真实的径流过程。将融合数据作为气象驱动数据可使 VIC 模型模拟精度得到显著提升。在率定期和验证期,时段径流模拟的确定性系数达到了 0.80 和 0.74。这表明融合数据能显著提升 VIC 模型模

拟结果,在岗拖流域具有较好的适用性。

b. VIC 模型模拟的积雪覆盖率与遥感监测呈现较好的一致性,VIC 模型在积雪模拟方面表现出良好的效果,这主要得益于其在能量平衡及地形因素等方面的精细处理。岗拖流域融雪径流年际变化稳定,融雪径流占比为 10%~20%,年内变化较大,呈现双峰特征。季节变化上,融雪径流在春季占比比较大。在春季,随着气温升高,积雪开始消融,融雪径流与气温变化趋势一致,二者的相关性较为显著。

c. VIC 模型对洪峰模拟的精度还有待提高,观测降水与融合数据驱动的模式模拟洪峰流量低于实测值,而再分析数据驱动的模拟结果则高于实测值,这与卫星同化算法对极端降水的处理有关。未来研究可引入不同再分析数据或增加观测站点资料以优化降水输入。在春季,融合数据驱动的 VIC 模型模拟的洪峰流量偏小,由于金沙江上游地区有部分冰川覆盖,冰川融水在春季可为河流提供额外的水量,而当前模型未能充分考虑这一因素。未来可以将 VIC 模型与冰川模块耦合,以更全面地考虑冰川融水的贡献,从而进一步提升该地区径流模拟的精度和可靠性。

参考文献:

[1] 徐华亭,吴志勇,陈瑞方,等. 基于再分析降水资料的青藏高原典型流域径流模拟分析[J]. 水资源保护,2024,40(4):92-98. (XU Huating, WU Zhiyong, CHEN Ruifang, et al. Runoff simulation analysis of typical watershed in Tibetan Plateau based on reanalysis precipitation data[J]. Water Resources Protection,2024,40(4):92-98. (in Chinese))

[2] 张子凡,刘时银,马凯,等. 基于 LSTM 和气候要素分带的金沙江上游流域径流模拟研究[J]. 地理科学进展,2023,42(6):1139-1152. (ZHANG Zifan,LIU Shiyin,MA Kai,et al. Runoff simulation of the upper Jinsha River Basin based on LSTM driven by elevation dependent climatic forcing[J]. Progress in Geography,2023,42(6):1139-1152. (in Chinese))

[3] 王维,刘佳,李传哲,等. 高分辨率融合降水驱动下的 WRF/WRF-Hydro 耦合模拟研究[J]. 水资源保护,2023,39(5):125-134. (WANG Wei, LIU Jia, LI Chuanzhe, et al. Study on coupled WRF/WRF-Hydro system driven by high resolution merging precipitation [J]. Water Resources Protection,2023,39(5):125-134. (in Chinese))

[4] 胡文韬,余钟波,陈松峰,等. 长江上游卫星反演与再分析降水数据的适用性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):15-24. (HU Wentao,YU Zhongbo, CHEN Songfeng,et al. Applicability evaluation of satellite

and reanalysis precipitation products in upper Yangtze River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(3):15-24. (in Chinese))

[5] 贾玉雪,张奇,曾冰茹,等. 湘江流域多源降水与气温产品组合的径流极值模拟精度评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):8-16. (JIA Yuxue,ZHANG Qi,ZENG Bingru, et al. Accuracy evaluation of runoff extremum simulation for the product combination of multi-source precipitation and temperature in the Xiangjiang River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):8-16. (in Chinese))

[6] WANG Xiaofeng, ZHOU Jitao, MA Jiahao, et al. Evaluation and comparison of reanalysis data for runoff simulation in the data-scarce watersheds of alpine regions [J]. Remote Sensing,2024,16(5):751.

[7] 沈哲辉,韩静妍,桂敬聪,等. 长江流域再分析与卫星反演降水数据的适用性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):50-61. (SHEN Zhehui, HAN Jingyan,GUI Jingcong,et al. Analysis of the applicability of reanalysis and satellite-derived precipitation data in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(1):50-61. (in Chinese))

[8] TAREK M,BRISSETTE F P,ARSENAULT R. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2020,24(5):2527-2544.

[9] GUO Dandan, WANG Hantao, ZHANG Xiaoxiao, et al. Evaluation and analysis of grid precipitation fusion products in Jinsha river basin based on China meteorological assimilation datasets for the SWAT model [J]. Water,2019,11(2):253.

[10] LIU Jun, SHANGUAN Donghui, LIU Shiyin, et al. Evaluation and hydrological simulation of CMADS and CFSR reanalysis datasets in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Water,2018,10(4):513.

[11] XU Jintao, MA Ziqiang, YAN Songkun, et al. Do ERA5 and ERA5-land precipitation estimates outperform satellite-based precipitation products?: a comprehensive comparison between state-of-the-art model-based and satellite-based precipitation products over mainland China [J]. Journal of Hydrology,2022,605:127353.

[12] 张佳鹏,王加虎,李丽,等. ERA-5 降水数据在雨量站稀疏地区的适用性研究:以缅甸密支那流域为例[J]. 人民长江,2021,52(6):36-41. (ZHANG Jiapeng, WANG Jiahu,LI Li, et al. Research on applicability of ERA-5 precipitation data in basins with spare rain-gauge coverage; case of Myitkyina Basin in Myanmar [J]. Yangtze River,2021,52(6):36-41. (in Chinese))

[13] 高瑞,穆振侠. 天山西部山区 VIC 模型的应用[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(4):44-48. (GAO Rui, MU Zhenxia. Application of VIC model in western Tianshan

- Mountains[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15 (4): 44-48. (in Chinese))
- [14] 谭秋阳,徐宗学,赵彦军,等. CMFD 数据集在雅江年楚河流域的适用性分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57 (3): 372-379. (TAN Qiuyang, XU Zongxue, ZHAO Yanjun, et al. Applicability of China meteorological forcing dataset to the Nianchu River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(3): 372-379. (in Chinese))
- [15] 唐豪,王晓云,陈伏龙,等. 基于 ERA5-Land 数据集的玛纳斯河径流模拟研究[J]. 地学前缘, 2022, 29(3): 271-283. (TANG Hao, WANG Xiaoyun, CHEN Fulong, et al. Simulation of Manas River runoff based on ERA5-Land dataset [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29 (3): 271-283. (in Chinese))
- [16] 宋蕾玥,张珂,晁丽君,等. 基于随机森林模型的长江流域分区多源融合降水模拟方法研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (3): 125-132. (SONG Leiyue, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Research on zoning multi-source fusion precipitation simulation method of the Yangtze River Basin based on random forest model [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 125-132. (in Chinese))
- [17] 孙振利,吴志勇,何海. TRMM 卫星反演降水在江苏典型平原区的评估与订正[J]. 水电能源科学, 2017, 35 (2): 24-28. (SUN Zhenli, WU Zhiyong, HE Hai. Evaluation and correction of TRMM satellite-retrieved precipitation in the typical plain area of Jiangsu Province [J]. Water Resources and Power, 2017, 35 (2): 24-28. (in Chinese))
- [18] 肖渝,孙若辰,王倩,等. 不同降水驱动的 SWAT 模型参数不确定性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52 (2): 43-52. (XIAO Yu, SUN Ruochen, WANG Qian, et al. Study on parameter uncertainty in SWAT model driven by different precipitation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (2): 43-52. (in Chinese))
- [19] 王奕钧,于德永,周祉蕴. 青藏高原寒区水文过程研究进展及模型述评[J]. 冰川冻土, 2024, 46 (4): 1312-1328. (WANG Yijun, YU Deyong, ZHOU Zhiyun. Review of research progress and modeling of hydrological processes in the cold regions of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(4): 1312-1328. (in Chinese))
- [20] POMEROY J W, GRAY D M, BROWN T, et al. The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence [J]. Hydrological Processes, 2007, 21 (19): 2650-2667.
- [21] 董宁澎,王浩,杨明祥,等. 考虑融雪及土壤冻融的新安江模型及其应用:以雅砻江上游径流模拟为例[J]. 水科学进展, 2024, 35 (4): 530-542. (DONG Ningpeng, WANG Hao, YANG Mingxiang, et al. An improved Xin' anjiang model with snow melting and soil freeze-thaw processes and its application in streamflow simulations of the Upper Yalongjiang River basin [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(4): 530-542. (in Chinese))
- [22] 余文君,南卓铜,赵彦博,等. SWAT 模型融雪模块的改进[J]. 生态学报, 2013, 33 (21): 6992-7001. (YU Wenjun, NAN Zhuotong, ZHAO Yanbo, et al. Improvement of snowmelt implementation in the SWAT hydrologic model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (21): 6992-7001. (in Chinese))
- [23] 刘文丰,徐宗学,刘浏,等. 基于 VIC 模型的拉萨河流域分布式水文模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48 (5): 524-529. (LIU Wenfeng, XU Zongxue, LIU Liu, et al. Distributed hydrological simulation in the Lhasa River Basin based on VIC model [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48 (5): 524-529. (in Chinese))
- [24] 何思为,南卓铜,张凌,等. 用 VIC 模型模拟黑河上游流域水分和能量通量的时空分布[J]. 冰川冻土, 2015, 37 (1): 211-225. (HE Siwei, NAN Zhuotong, ZHANG Ling, et al. Spatial-temporal distribution of water and energy fluxes in the upper reaches of the Heihe River simulated with VIC model [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 211-225. (in Chinese))
- [25] 高瑞,穆振侠,彭亮,等. 水量平衡与能量平衡模式下的 VIC 模型在喀什河流域的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37 (1): 106-112. (GAO Rui, MU Zhenxia, PENG Liang, et al. Application research of VIC model with the mode of water balance and energy balance in Kashi River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(1): 106-112. (in Chinese))
- [26] 王红,何海,吴志勇,等. VIC 模型在季节性冻土区水文模拟适用性研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61 (8): 35-42. (WANG Hong, HE Hai, WU Zhiyong, et al. Hydrological simulation of VIC model in seasonal frozen soil area applicability research [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(8): 35-42. (in Chinese))
- [27] 张丹,梁瀚续,何小聪,等. 基于 CMIP6 的金沙江流域径流及水文干旱预估[J]. 水资源保护, 2023, 39 (6): 53-62. (ZHANG Dan, LIANG Hanxu, HE Xiaocong, et al. Estimation of runoff and hydrological drought in the Jinsha River Basin based on CMIP6 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 53-62. (in Chinese))
- [28] REYNOLDS C A, JACKSON T J, RAWLS W J. Estimating soil water-holding capacities by linking the food and agriculture organization soil map of the world with global Pedon databases and continuous pedotransfer functions[J]. Water Resources Research, 2000, 36(12): 3653-3662.

(下转第 222 页)

River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022,44(1):275-287. (in Chinese))

[29] 郭珈源,孙旭杨,刘金涛,等. 基于 Budyko 理论的高寒山区流域径流演变归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 22-29. (GUO Jiayuan, SUN Xuyang, LIU Jintao, et al. Attribution analysis of runoff evolution in cold alpine catchment based on Budyko theory [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025,53(3):22-29. (in Chinese))

[30] DAI Liyun, CHE Tao, DING Yongjian, et al. Evaluation of snow cover and snow depth on the Qinghai-Tibetan Plateau derived from passive microwave remote sensing[J]. The Cryosphere, 2017, 11(4): 1933-1948.

[31] 邱玉宝, 王星星, 韩璐璐, 等. 2002—2016 年高亚洲逐日积雪覆盖率数据集 [J]. 中国科学数据, 2017, 2(2): 11. (QIU Yubao, WANG Xingxing, HAN Lulu, et al., Daily fractional snow cover dataset over High Asia (2002-2016) [J]. China Scientific Data, 2017, 2(2): 11. (in Chinese))

[32] 邱玉宝, 郭华东, 除多, 等. 青藏高原 MODIS 逐日无云积雪面积数据集[J]. 中国科学数据, 2016, 1(1): 1-11. (QIU Yubao, GUO Huadong, CHU Duo, et al. MODIS daily cloud-free snow cover products over Tibetan Plateau [J]. China Scientific Data, 2016, 1(1): 1-11. (in Chinese))

[33] SALOMONSON V V, APPEL I. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(3): 351-60.

[34] LUO Yuning, ZHANG Ke, WANG Yuhao, et al. iRainSnowHydro v1. 0: a distributed integrated rainfall-runoff and snowmelt-runoff simulation model for alpine watersheds[J]. Journal of Hydrology, 2024, 645: 132220.

[35] 李巧玲, 李旻喆, 李致家, 等. 新安江-海河模型参数物理意义分析及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 1-9. (LI Qiaoling, LI Minzhe, LI Zhijia, et al. Physical interpretation parameters of Xin'anjiang-Haihe model and its application [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 1-9. (in Chinese))

[36] 石朋, 丁松, 司伟, 等. 新安江模型敏感参数动态变化规律研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 1-6. (SHI Peng, DING Song, SI Wei, et al. Study on dynamic variations of sensitive parameters in Xin'anjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 1-6. (in Chinese))

[37] 刘松, 余敦先, 张利平, 等. 基于 Morris 和 Sobol 的水文模型参数敏感性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1296-1303. (LIU Song, SHE Dunxian, ZHANG Liping, et al. Global sensitivity analysis of hydrological model parameters based on morris and sobol methods[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(6): 1296-1303. (in Chinese))

[38] WISE J. The autocorrelation function and the spectral density function [J]. Biometrika, 1955, 42(1/2): 151-159.

[39] RAMSEY F L. Characterization of the partial autocorrelation function [J]. The Annals of Statistics, 1974: 1296-301.

[40] BUSSGANG J J. Crosscorrelation functions of amplitude-distorted Gaussian signals [J]. 1952.

(收稿日期: 2025-02-11 编辑: 王芳)

(上接第 212 页)

[29] 金君良. 西部资料稀缺地区的水文模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

[30] ROSENBROCK H H. An automatic method for finding the greatest or least value of a function [J]. The Computer Journal, 1960, 3(3): 175-184.

[31] JIANG Tong, SU Buda, HARTMANN H. Temporal and spatial trends of precipitation and river flow in the Yangtze River Basin, 1961-2000[J]. Geomorphology, 2007, 85(3-4): 143-154.

[32] 刘晓娇, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 黄河源区积雪变化特征及其对春季径流的影响[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 226-233. (LIU Xiaojiao, CHEN Rensheng, LIU Junfeng, et al. Variation of snow cover and its influence on spring runoff in the source region of Yellow River [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(2): 226-233. (in Chinese))

[33] 次旦央宗, 李鸿雁, 李晓峰. 东北寒区 SWAT 模型融雪径流空间异质性参数率定方法及应用: 以白山流域为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1): 230-240. (CIDAN Yangzong, LI Hongyan, LI Xiaofeng. Method and application of SWAT model parameter calibration for spatial heterogeneity of snowmelt runoff in cold regions of Northeast China: a case study of Baishan Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1): 230-240. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-02-17 编辑: 王芳)