

耦合 iRainSnowHydro 模型和加权 Markov 链的高寒山区径流预报方法

王有香¹,王宇昊^{2,3,4},吴 南^{2,3,4},李顺章^{2,3,4},王一帆¹,耿 浩¹,
罗煜宁^{2,3,4},张 珂^{2,3,4,5,6}

(1. 云南电网有限责任公司; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 3. 河海大学水文水资源学院;
4. 河海大学长江保护与绿色发展研究院; 5. 中国气象局水文气象重点开放实验室; 6. 水利部水利大数据重点实验室)

摘要:针对高寒山区径流预报难度较大的问题,提出了一种耦合 iRainSnowHydro 模型和加权 Markov 链的径流预报方法,基于 iRainSnowHydro 模型,通过构建雪层水库考虑雪层对融雪液态水的调蓄,精细刻画了湿雪中融雪液态水的出流过程,并引入加权 Markov 链捕捉模拟误差的传递和转移规律,实现误差实时校正。澜沧江上游乌弄龙流域实例验证结果表明:iRainSnowHydro 模型在率定期和验证期的决定系数和纳什效率系数均超过 0.8,且百分比偏差绝对值均小于 10%,具有良好的模拟效果,尤其在融雪期(3—5 月)表现更优;加权 Markov 链有效校正了模型对夏季径流的系统性低估,使预报平均相对误差从 15.68%降至 7.52%,预报精度显著提升。

关键词:融雪径流;降雨径流;径流预报;雪层水库;iRainSnowHydro 模型;加权 Markov 链;误差校正;乌弄龙流域

Runoff forecasting method for alpine areas by coupling iRainSnowHydro model and weighted Markov chain//
Wang Youxiang¹, Wang Yuhao^{2,3,4}, Wu Nan^{2,3,4}, Li Shunzhang^{2,3,4}, Wang Yifan¹, Geng Hao¹, Luo Yuning^{2,3,4}, Zhang Ke^{2,3,4,5,6} (1. Yunnan Power Grid Co., Ltd.; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University; 5. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory; 6. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources)

Abstract: To address the difficulty in runoff forecasting in alpine areas, a runoff forecasting method coupling the iRainSnowHydro model and weighted Markov chain was proposed. The iRainSnowHydro model considered the regulation and storage of snowmelt water by constructing a snow reservoir, precisely depicting the process of snowmelt water outflows from wet snow. The method also introduced a weighted Markov chain to capture the transmission and transfer rules of simulation errors, achieving real-time error correction. The forecasting method was applied to the Wunonglong Basin in the upper reaches of the Lancang River. The results show that the determination coefficient and Nash efficiency coefficient in the calibration and validation periods were both over 0.8, and the absolute value of the percentage bias was less than 10%, indicating that the iRainSnowHydro model has a good simulation effect, especially during the snowmelt period (March to May). The weighted Markov chain effectively corrects the systematic underestimation of summer runoff by the model, reducing the average relative error from 15.68% to 7.52% and significantly improving the forecasting accuracy.

Key words: snowmelt runoff; rainfall-runoff; runoff forecasting; snow reservoir; iRainSnowHydro model; weighted Markov chain; error correction; the Wunonglong Basin

高寒山区作为重要的“水塔”区域,其径流形成过程受融雪径流和降雨径流混合驱动的影响,表现出显著的非线性和滞后性。准确的径流预报对区域水资源管理、干旱预警及水电调度至关重要^[1-3]。相比

基于物理机制的水文模型和数据驱动模型,概念性水文模型因其结构简单、数据需求低等特点,在高寒山区径流预报中得到了广泛应用^[4-5]。例如:周峰等^[6]以金沟河为研究区,采用融雪径流模型对 2009 年 4—

基金项目:中国南方电网云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20222329);青海省重大科技专项(2024-SF-A1);山东省水文中心科研项目(37000000025001720250235)

作者简介:王有香(1990—),女,工程师,硕士,主要从事电力电量平衡分析及发电调度计划安排研究。E-mail:809610307@qq.com

通信作者:王宇昊(1997—),男,博士研究生,主要从事水文预报研究。E-mail:yuhaowang@hhu.edu.cn

9 月径流进行模拟;田富强等^[7]采用 THREW (Tsinghua representative elementary watershed) 分布式水文模型模拟了雅鲁藏布江径流并解析了径流水源组成;董宁澎等^[8]开发了考虑融雪及土壤冻融的新安江模型,并在雅砻江上游进行了径流模拟。然而,这些概念性集总式或分布式水文模型多采用度日因子法考虑融雪,对于湿雪中液态水出流速率的模拟仍存在不足。湿雪层的相变过程(固态-液态)受温度梯度、积雪密度及液态水滞留能力的共同影响,度日因子法难以准确反映其动态变化,影响融雪径流的模拟精度^[9]。基于新安江模型开发的栅格新安江模型在中国南方湿润地区得到了广泛应用,具有巨大的应用潜力^[10-11]。Luo 等^[12]在栅格新安江模型的基础上添加了雪层水库模块,开发了分布式融雪径流-降雨径流(iRainSnowHydro)模型。该模型通过雪层水库实现湿雪层对融雪液态水的调蓄,同时考虑融雪液态水出流形成的融雪径流和降雨形成的降雨径流^[13],实现对高寒山区的径流模拟。

输入数据、模型结构、模型参数的不确定性造成了模型的模拟误差,且往往呈现明显的时序相关性和状态依赖性(如持续高估或低估)^[14-15],此外,上述模型大多未考虑冰川融水,因此,在夏季往往存在系统性低估径流的现象^[16-17]。为弥补分布式水文模型的不足,误差校正技术作为对未显式模拟过程的一种替代性手段,成为提升预报精度的关键。目前,径流预报误差校正方法主要分为统计方法、机器学习方法和混合方法^[18-19],统计方法操作简单,可解释性强,其中,自回归模型通过建立当前误差与历史误差的线性关系,在误差校正中得到了广泛应用^[20]。例如:何玉芬等^[21]将自回归模型和分布式水文模型 GBEHM (geomorphology based eco-hydrological model)相结合,提出了低枯流量的预报方法,并应用于长江石鼓水文站以上流域。然而,自回归模型对非线性、非平稳残差序列适应性有限。相比之下,加权 Markov 链通过离散化残差状态和转移概率矩阵,能够自然表征误差的非线性特征和状态依赖性;通过多阶历史状态的加权融合,可以更好地反映水文过程的长记忆性;其概率化的输出形式为预报不确定性量化提供了天然框架^[22-23]。加权 Markov 链的状态转移机制能够更准确地描述误差演变规律,在保持物理可解释性的同时提高校正精度,但尚未有研究将分布式水文模型和加权 Markov 链相结合以提升径流的预报精度。

本文提出了一种耦合 iRainSnowHydro 模型和加权 Markov 链进行误差校正的高寒山区径流预报方法,以澜沧江上游乌弄龙流域为例开展日径流模拟

和预报研究,评价分布式水文模型的模拟性能和实时误差校正对预报精度的提升效果,以期提升高寒山区径流预报的准确性。

1 研究方法

本文提出的径流预报方法步骤为:①基于历史逐日气温、降水和径流数据,率定 iRainSnowHydro 模型,计算逐日模拟误差;②基于模拟误差序列,采用加权 Markov 链对未来模拟误差进行预测;③基于预报的气温和降水数据,预测日径流量,并采用预测的模拟误差对日径流量预测结果进行校正。

1.1 iRainSnowHydro 模型

采用 Luo 等^[12]基于栅格新安江模型开发的 iRainSnowHydro 模型。模型的基本原理为:对于某一时段,根据栅格气温和降水量将降水划分为降雨和降雪;通过构建雪层水库计算融雪液态水出流量,将降水量和融雪液态水出流量合计为栅格单元来水;采用栅格新安江模型计算产流和汇流,主要包括 3 层蒸散发计算、基于蓄满机制的产流与分水源计算以及基于栅格化马斯京根汇流演算方法的坡面汇流和河道汇流计算^[24-25]。

1.2 加权 Markov 链

加权 Markov 链根据变量在不同时刻的数据特征赋予不同权重,利用级别特征值法结合多步状态转移矩阵定量计算预测变量的具体值。对于序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,利用传统 Markov 预测模型计算各阶的自相关系数 r_k ,并计算各阶自相关信息在预测中的贡献权重 w_k :

$$w_k = |r_k| / \sum_{k=1}^m |r_k| \tag{1}$$

式中: k 为滞后阶数,即状态转移步数; m 为最大阶数,一般取 4~6^[26]。

假设变量范围被划分为 s 个区间,即 s 个状态。根据历史序列中各状态之间的转移关系,可构建 k 阶状态转移概率矩阵 $\mathbf{P}_k$:

$$\mathbf{P}_k = (p_{kij})_{s \times s} \tag{2}$$

式中: p_{kij} 为变量处于状态 i 时,在第 k 阶条件下转移到状态 j 的条件概率。

结合各阶状态转移概率矩阵和滞后状态,可计算预测变量处于各状态的概率。设第 k 阶条件对应的滞后状态为 i_k ,则预测变量处于状态 j 的概率 p'_j 为

$$p'_j = \sum_{k=1}^m w_k p_{kij_k} \tag{3}$$

计算状态 j 对应的模糊数 d_j 和级别特征值 H :

$$d_j = p'_j / \sum_{j=1}^s p'_j \tag{4}$$

$$H = \sum_{j=1}^s j d_j \quad (5)$$

式中: ε 为最大概率作用指数, 其值越大, 越能突出最大概率作用, 一般取 2.0~4.0。

变量 x_{n+1} 的预测值为:

$$x_{n+1} = \begin{cases} T_l H(l + 0.5) & H \geq l \\ B_l H(l - 0.5) & H < l \end{cases} \quad (6)$$

式中: l 为转移概率最大的状态; T_l 、 B_l 分别为预测变量在状态 l 时的上、下限。

1.3 模型性能评价

采用洗牌复形演化算法对 iRainSnowHydro 模型进行参数率定, 采用决定系数 (R^2)、纳什效率系数 (NSE) 和百分比偏差 (PBIAS) 作为模型模拟效果的评价指标, 并采用平均相对误差 (MRE) 对短期预报结果进行评价。

2 实例验证

2.1 研究区概况与数据来源

澜沧江是亚洲重要的国际河流, 发源于中国青海省唐古拉山脉, 出境后称为湄公河, 纵贯中南半岛, 最终注入南海。该河全长约 4 880 km, 中国境内段长约 2 161 km, 总落差约 4 580 m, 水能资源丰富, 是中国西南地区水电开发的核心流域之一。研究区为澜沧江上游乌弄龙水电站以上流域 (简称乌弄龙流域), 流域面积约为 7.6 万 km^2 , 横跨西藏东部和云南西北部, 介于 $27^\circ 45' \text{N} \sim 33^\circ 50' \text{N}$ 、 $93^\circ 42' \text{E} \sim 99^\circ 10' \text{E}$ 之间^[27]。

乌弄龙流域地貌以高山峡谷为主, 地形起伏显著, 流域内积雪融水与降水共同构成径流的主要来源。受西南季风与高原寒带系统共同影响, 降水时空分布不均, 植被垂直分异明显, 生物多样性丰富。作为澜沧江水源涵养关键区, 该流域的水文过程对下游梯级电站调度及跨境水资源管理具有重要影响, 其生态环境对气候变化响应敏感, 是研究高寒山区水文生态效应的典型区域。研究区概况如图 1 所示。

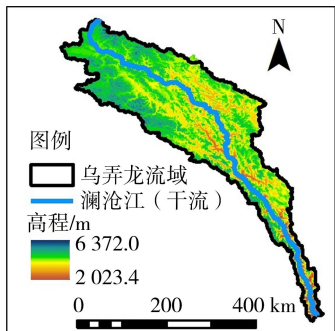


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

乌弄龙流域高程数据来源于 GLOBE 数据集 (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html>), 相同空间分辨率 (1 km) 的土壤数据和土地利用数据 (2020 年) 分别来源于世界土壤数据库全球土壤数据集 (<https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>) 和中国多时期土地利用遥感监测数据集 (<https://www.resdc.cn/>)。降水 and 气温数据由中国气象信息中心提供, 空间分辨率为 5 km; 初始雪深空间分布来源于中国雪深长时间序列数据集 (<https://data.tpdc.ac.cn/>), 空间分辨率为 25 km。本文采用最近邻法将降水、气温和初始雪深数据重采样到 1 km, 使模型在空间分辨率为 1 km 的网格上运行。此外, 乌弄龙流域出口实测流量来源于乌弄龙水电站逐日入库数据。

2.2 iRainSnowHydro 模型的率定和验证

从中国雪深长时间序列数据集获取乌弄龙流域 2017 年 12 月 31 日的网格雪深数据作为初始雪深的空间分布, 如图 2 所示。图 2 表明乌弄龙流域初始雪深呈现两边大中间小的分布规律。基于 2018 年 1 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日逐日降水和气温数据, 以 2018 年 1 月 1 日至 2019 年 5 月 31 日为预热期, 2019 年 6 月 1 日至 2022 年 5 月 31 日为率定期, 2022 年 6 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日为验证期, 对模型进行率定和验证。iRainSnowHydro 模型计算所得的各月降水量和融雪液态水出流量如图 3 所示, 日降水量和模拟的日径流量如图 4 所示。

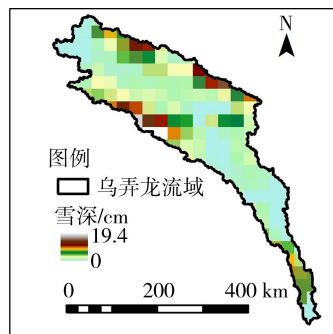


图 2 初始雪深空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of initial snow depth

图 3 表明融雪径流主要出现在 3—5 月, 降雨径流 6—9 月占主导地位, 由于 11—2 月整体降水量较小且气温降低, 融雪液态水出流量和降水量均较小。模型率定期 R^2 、NSE、PBIAS 分别为 0.883、0.857、-5.946%, 验证期分别为 0.844、0.819、-4.296%, 表明 iRainSnowHydro 模型在乌弄龙流域具有良好的模拟效果。相比气温较高的夏季 (6—9 月), 模型在融雪径流占较大比例的 3—5 月模拟

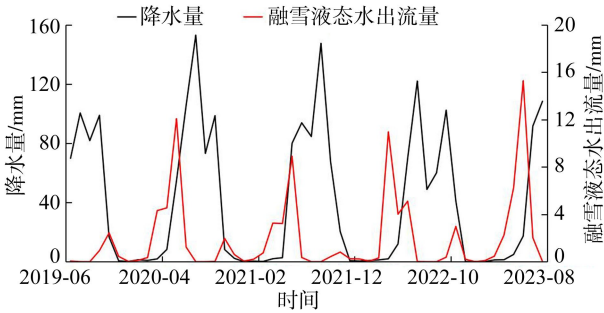


图3 逐月降水量和融雪液态水出流量

Fig.3 Monthly precipitation and snowmelt liquid water outflow

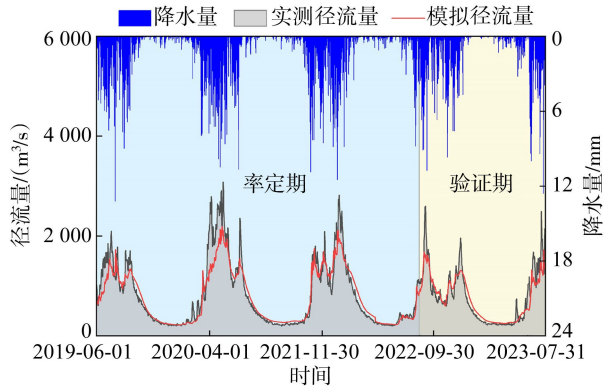


图4 日降水量和日径流量模拟结果

Fig.4 Daily precipitation and simulation results of daily runoff

效果明显更好,表明该模型有效模拟了融雪液态水的出流过程。此外,模型在汛期部分时段显著低估了径流量,模拟精度较低,因此,基于预报气象数据应用该模型对未来径流进行预报时,有必要对模拟结果进行实时误差修正以提升预报精度。

2.3 基于加权 Markov 链的预报误差预测

以 2023 年 8 月 1 日的径流量预报误差预测为例,基于日径流量的模拟值和实测值,可得逐日模拟误差,如图 5 所示。图 5 表明模拟误差介于 $-1015.98 \sim 380.79 \text{ m}^3/\text{s}$,且在 1522 d 内有 948 d 误差为正。针对模拟误差序列,计算各阶的自相关系

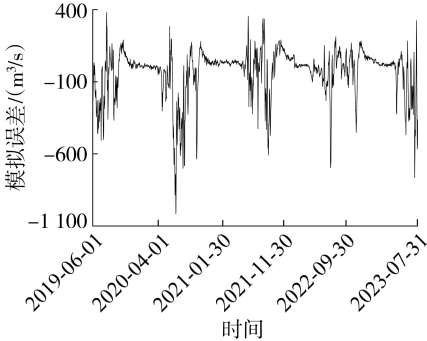


图5 日径流量模拟误差

Fig.5 Simulation errors of daily runoff

数,可以发现,随着阶数 k 增加,自相关系数逐渐减小,且当 $k=6$ 时自相关系数仍大于 0.5,因此最大阶数确定为 6。各阶的自相关系数 r_k 和权重 w_k 如表 1 所示。

表 1 各阶自相关系数和权重

Table 1 Autocorrelation coefficients and weights of each order		
k	r_k	w_k
1	0.910	0.219
2	0.789	0.190
3	0.685	0.165
4	0.625	0.150
5	0.589	0.142
6	0.553	0.133

对模拟误差序列进行等效替代。利用实际模拟误差值减去最小值 ($-1015.98 \text{ m}^3/\text{s}$) 即得替代值,此时替代值范围为 $0 \sim 1396.80 \text{ m}^3/\text{s}$,等效替代后新序列的均值 μ 和标准差 σ 分别为 984.77 和 167.04。以 $\mu-2\sigma$ 、 $\mu-\sigma$ 、 μ 、 $\mu+\sigma$ 、 $\mu+2\sigma$ 为阈值将替代值范围划分为 6 个状态,状态 1~6 对应的替代值区间分别为 $0 \sim < 650.69$ 、 $650.69 \sim < 817.73$ 、 $817.73 \sim < 984.77$ 、 $984.77 \sim < 1151.81$ 、 $1151.81 \sim < 1318.84$ 、 $1318.84 \sim 1396.80$ 。

计算各阶状态转移概率矩阵,以 1 步状态转移概率矩阵为例,矩阵中第 i 行第 j 列的值为序列中处于状态 i 的变量经过 1 步转移到状态 j 的次数占状态 i 出现总次数的比例。1~6 步状态转移概率矩阵分别为:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \begin{bmatrix} 0.719 & 0.281 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.161 & 0.542 & 0.297 & 0 & 0 & 0 \\ 0.022 & 0.109 & 0.622 & 0.243 & 0.004 & 0 \\ 0.001 & 0.004 & 0.049 & 0.913 & 0.032 & 0.002 \\ 0 & 0 & 0.043 & 0.315 & 0.609 & 0.033 \\ 0 & 0 & 0 & 0.143 & 0.571 & 0.286 \end{bmatrix} \\
 P_2 &= \begin{bmatrix} 0.568 & 0.30 & 0.102 & 0 & 0 & 0 \\ 0.195 & 0.398 & 0.322 & 0.085 & 0 & 0 \\ 0.039 & 0.139 & 0.452 & 0.348 & 0.017 & 0.004 \\ 0.005 & 0.009 & 0.071 & 0.871 & 0.041 & 0.003 \\ 0.022 & 0.011 & 0.076 & 0.380 & 0.478 & 0.033 \\ 0 & 0 & 0.143 & 0.286 & 0.571 & 0 \end{bmatrix} \\
 P_3 &= \begin{bmatrix} 0.448 & 0.368 & 0.115 & 0.069 & 0 & 0 \\ 0.220 & 0.297 & 0.347 & 0.127 & 0 & 0.008 \\ 0.057 & 0.130 & 0.409 & 0.378 & 0.022 & 0.004 \\ 0.008 & 0.017 & 0.077 & 0.859 & 0.046 & 0.003 \\ 0.022 & 0.033 & 0.054 & 0.446 & 0.424 & 0.022 \\ 0.143 & 0.143 & 0.286 & 0 & 0.429 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$P_4 = \begin{bmatrix} 0.407 & 0.291 & 0.209 & 0.081 & 0 & 0.011 \\ 0.178 & 0.339 & 0.288 & 0.186 & 0.008 & 0 \\ 0.070 & 0.126 & 0.391 & 0.374 & 0.039 & 0 \\ 0.014 & 0.020 & 0.077 & 0.834 & 0.049 & 0.005 \\ 0.0011 & 0.043 & 0.065 & 0.522 & 0.348 & 0.011 \\ 0.286 & 0 & 0.429 & 0 & 0.286 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_5 = \begin{bmatrix} 0.360 & 0.291 & 0.244 & 0.081 & 0.012 & 0.012 \\ 0.169 & 0.305 & 0.280 & 0.246 & 0 & 0 \\ 0.079 & 0.105 & 0.376 & 0.389 & 0.052 & 0 \\ 0.018 & 0.028 & 0.078 & 0.822 & 0.048 & 0.005 \\ 0.011 & 0.043 & 0.076 & 0.533 & 0.326 & 0.011 \\ 0.143 & 0.143 & 0.429 & 0 & 0.286 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_6 = \begin{bmatrix} 0.337 & 0.244 & 0.302 & 0.093 & 0.012 & 0.012 \\ 0.178 & 0.263 & 0.271 & 0.280 & 0.008 & 0 \\ 0.070 & 0.135 & 0.328 & 0.419 & 0.043 & 0.004 \\ 0.021 & 0.030 & 0.084 & 0.808 & 0.052 & 0.004 \\ 0.022 & 0.033 & 0.088 & 0.549 & 0.308 & 0 \\ 0 & 0.286 & 0.429 & 0 & 0.143 & 0.143 \end{bmatrix}$$

从图 5 可以看出,2023 年 7 月 26 日至 2023 年 7 月 31 日的模拟误差替代值分别处于状态 5、3、1、1、1、2,基于式(3)可得 2023 年 8 月 1 日状态 1~6 的预报误差替代值的概率分别为 0.292、0.299、0.200、0.152、0.048、0.002,因此,状态 2 的概率最大。基于式(4)(5)可得特征值为 2.032,由式(6)可得,2023 年 8 月 1 日的预报误差替代值为 664.53 m³/s,即预报误差为-351.47 m³/s。

2.4 耦合 iRainSnowHydro 模型和加权 Markov 链的径流预报

基于 2023 年 8 月 1 日至 2023 年 8 月 31 日的气象数据,采用 iRainSnowHydro 模型进行径流预报。基于当日及前 5 日的模拟误差,迭代预测下 1 日的预报误差,采用加权 Markov 链进行实时误差校正,逐日径流预报结果如图 6 所示。

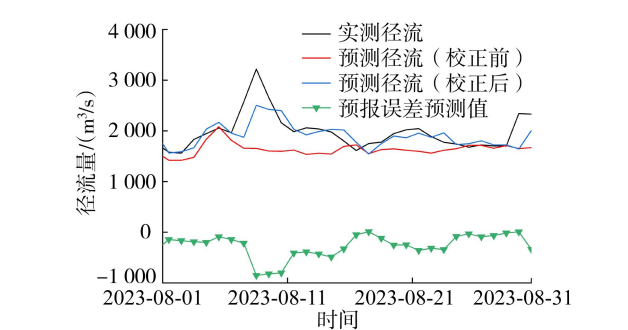


图 6 逐日径流预报结果
Fig. 6 Daily runoff forecast results

图 6 表明通过加权 Markov 链迭代预报误差,对 iRainSnowHydro 模型的预报结果进行校正,2023 年

8 月 1 日至 2023 年 8 月 31 日的预报平均相对误差从 15.68% 降至 7.52%,显著提升了径流的预报精度。

3 结 论

a. iRainSnowHydro 模型在率定期和验证期的 R^2 和 NSE 均超过 0.8,且 PBIAS 的绝对值均小于 10%,表明该模型在乌弄龙流域具有良好的模拟效果。

b. 与气温较高的夏季(6—9 月)相比,iRainSnowHydro 模型在融雪径流占较大比例的 3—5 月模拟效果明显更好,表明该模型有效模拟了融雪液态水的出流过程。相比于其他时段,在预报 6—9 月日径流量时更需要进行实时误差校正以提升预报精度。

c. 采用本文提出的预报方法对 2023 年 8 月进行日径流量预报,校正前预报平均相对误差为 15.68%,校正后降低至 7.52%,预报方法显著提升了径流的预报精度。

参考文献:

[1] 常启昕,孙自永,潘钊,等.高寒山区河道径流的形成与水文调节机制研究进展[J].地球科学,2022,47(11):4196-4209. (Chang Qixin, Sun Ziyong, Pan Zhao, et al. Stream runoff formation and hydrological regulation mechanism in mountainous alpine regions: a review [J]. Earth Science, 2022, 47(11): 4196-4209. (in Chinese))

[2] 张居嘉,杨明祥,王贺佳,等.澜沧江上游积雪演变规律及融雪径流模拟[J].长江科学院院报,2025,42(3):42-49. (Zhang Jujia, Yang Mingxiang, Wang Hejia, et al. Evolution trend of snow cover and simulation of snowmelt runoff in upper reaches of Lancang River [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(3): 42-49. (in Chinese))

[3] Wang Wenzhuo, Dong Zengchuan, Zhang Tianyan, et al. Mixed D-vine copula-based conditional quantile model for stochastic monthly streamflow simulation [J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(1): 13-20.

[4] 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))

- [5] 刘渤, 骆震, 陈伏龙, 等. 基于 MIKE 耦合模型的开都河中短期径流预报[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35 (5): 100-106. (Liu Bo, Luo Zhen, Chen Fulong, et al. Medium-short-term runoff forecast of Kaidu River based on MIKE coupling model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35 (5): 100-106. (in Chinese))
- [6] 周峰, 覃姗, 岳春芳, 等. 基于 SRM 模型的金沟河流域融雪径流模拟[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18 (5): 395-400. (Zhou Feng, Qin Shan, Yue Chunfang, et al. Simulation of snowmelt runoff in Jingou River Basin based on SRM model[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18 (5): 395-400. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 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))
- [9] Rottler E, Warscher M, Hanzer F, et al. Spatio-temporal wet snow dynamics from model simulations and remote sensing: a case study from the Rofental, Austria [J]. Hydrological Processes, 2024, 38 (9): e15279.
- [10] 陆旻皎. 新安江模型研究的回顾和展望[J]. 水利学报, 2021, 52 (4): 432-441. (Lu Minjiao. Recent and future studies of the Xinanjiang model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (4): 432-441. (in Chinese))
- [11] 何涯舟, 张珂, 晁丽君, 等. 基于多源遥感土壤湿度与模型数据同化的流域径流模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 145-151. (He Yazhou, Zhang Ke, Chao Lijun, et al. Watershed runoff simulation based on multi-source remotely sensed soil moisture and data assimilation [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 145-151. (in Chinese))
- [12] 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.
- [13] 罗煜宁, 张珂, 王宇昊, 等. 金沙江上游降雨-融雪径流模拟与洪水风险评估[J]. 水资源保护, 2025, 41 (3): 93-100. (Luo Yuning, Zhang Ke, Wang Yuhao, et al. Simulation of rainfall-snowmelt runoff and flood risk assessment in upper reaches of the Jinsha River[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (3): 93-100. (in Chinese))
- [14] 梁丽莎, 蒋晓蕾, 胡乐怡, 等. 基于 XGBoost 与 SWAT 径流模拟对比及校正研究[J]. 人民珠江, 2025, 46 (1): 50-58. (Liang Lisha, Jiang Xiaolei, Hu Leyi, et al. Comparison and correction of runoff simulation based on XGBoost and SWAT [J]. Pearl River, 2025, 46 (1): 50-58. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 魏潇娜, 龙爱华, 尹振良, 等. 和田河流域冰川径流对气候变化响应的模拟分析[J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 137-144. (Wei Xiaona, Long Aihua, Yin Zhenliang, et al. Simulation of response of glacier runoff to climate change in the Hotan River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 137-144. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 张晓菁, 刘攀, 周丽婷, 等. 考虑水文模型参数时变的水库水位多预见期实时预报: 以水布垭水库为例[J]. 水利学报, 2023, 54 (4): 426-438. (Zhang Xiaojing, Liu Pan, Zhou Liting, et al. Real-time forecasting of reservoir water levels over multiple lead times considering time-varying hydrological model parameters and its application in the Shuibuya Reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (4): 426-438. (in Chinese))
- [19] 刘莉, 梁霄, Wang Quanjun, 等. 基于深度学习的改进 ERRIS 径流预报实时校正模型[J]. 水资源保护, 2024, 40 (6): 155-164. (Liu Li, Liang Xiao, Wang Quanjun, et al. Improved ERRIS model for real-time correction of streamflow forecast based on deep learning [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (6): 155-164. (in Chinese))
- [20] 王红瑞, 魏豪杉, 胡立堂, 等. 基于遗传算法的 SVM-AR 改进模型与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48 (6): 488-497. (Wang Hongrui, Wei Haoshan, Hu Litang, et al. Improved model and application of SVM-AR based on genetic algorithm [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (6): 488-497. (in Chinese))

(下转第 139 页)

characteristics of rainfall in the upper Lijiang River Basin from 1983 to 2023 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (4): 85-93. (in Chinese))

[22] Jing Wenlong, Zhao Xiaodan, Yao Ling, et al. Variations in terrestrial water storage in the Lancang-Mekong River Basin from GRACE solutions and land surface model[J]. Journal of Hydrology, 2020, 580: 124258.

[23] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72 (1): 116-134. (Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (1): 116-134. (in Chinese))

[24] Song Yongze, Wang Jinfeng, Ge Yong, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data [J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57 (5): 593-610.

[25] 任立良, 王宇, 江善虎, 等. 基于 GRACE 和 GRACE-FO 的黄河流域陆地水储量及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 26-32. (Ren Liliang, Wang Yu, Jiang Shanhu, et al. GRACE and GRACE-FO-based terrestrial water storage and its influencing factor analysis of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 26-32. (in Chinese))

[26] 夏婷婷, 薛璇, 王灏伟, 等. 昆仑山北坡陆地水储量变化及其驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47 (8): 1292-1303. (Xia Tingting, Xue Xuan, Wang Haowei, et al. Changes in terrestrial water storage and its drivers on the north slope of Kunlun Mountains [J]. Arid Land Geography, 2024, 47 (8): 1292-1303. (in Chinese))

[27] 王晟, 田琳, 李峰平, 等. 松花江流域陆地水储量时空变异特征与影响因素探究[J]. 中国农村水利水电, 2024 (10): 47-58. (Wang Sheng, Tian Lin, Li Fengping, et al. Characteristics and influencing factors of spatial-temporal variation of land water reserves in Songhua River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024 (10): 47-58. (in Chinese))

[28] 徐鹏飞, 蒋涛, 章传银, 等. GRACE/GRACE-FO 空窗期的陆地水储量变化数据间断补偿: 以全球典型流域为例[J]. 地球物理学报, 2021, 64 (9): 3048-3067. (Xu Pengfei, Jiang Tao, Zhang Chuanyin, et al. Data filling of terrestrial water storage anomaly during the gap period of GRACE/GRACE-FO: a case study of global typical basins [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64 (9): 3048-3067. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-21 编辑: 施业)

(上接第 131 页)

[21] 何玉芬, 杨汉波, 董宁澎, 等. 分布式水文模型与自回归误差校正相结合的低枯流量预报研究[J]. 水利学报, 2024, 55 (12): 1539-1547. (He Yufen, Yang Hanbo, Dong Ningpeng, et al. Research on low flow forecast based on a distributed hydrological model and autoregressive error correction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55 (12): 1539-1547. (in Chinese))

[22] 贺娟, 王晓松, 王彩云. 加权马尔可夫链模型在密云水库入库流量中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13 (4): 618-621. (He Juan, Wang Xiaosong, Wang Caiyun. Application of the weighted Markov chain model in the inflow prediction of the Miyun Reservoir [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13 (4): 618-621. (in Chinese))

[23] 闫国辉, 乔长录, 陈伏龙. 基于 EMD-WDD-MK 模型的玛纳斯河年径流预测[J]. 中国农村水利水电, 2021 (11): 83-89. (Yan Guohui, Qiao Changlu, Chen Fulong. Annual runoff prediction of Manas River based on EMD-WDD-MK model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021 (11): 83-89. (in Chinese))

[24] 杜若愚, 姚成, 刘玉环, 等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50 (6): 25-32. (Du Ruoyu, Yao Cheng, Liu Yuhuan, et al. Grid-Xin' anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (6): 25-32. (in Chinese))

[25] 王雨洁, 李致家, 姚成, 等. 基于分布式水文水动力耦合模型的秦淮河流域洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53 (2): 11-18. (Wang Yujie, Li Zhijia, Yao Cheng, et al. Flood simulation in the Qinhuai River Basin based on a coupled distributed hydrological and hydrodynamic model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (2): 11-18. (in Chinese))

[26] Zhang Jinping, Wang Yuhao, Zhao Yong, et al. Multi-scale flood prediction based on GM (1, 2)-fuzzy weighted Markov and wavelet analysis [J]. Journal of Water and Climate Change, 2021, 12 (6): 2217-2231.

[27] 李琼芳, 方凯悦, 韩幸烨, 等. 基于多维 Copula 函数的澜沧江-湄公河流域气象干旱特征分析[J]. 水资源保护, 2024, 40 (1): 52-59. (Li Qiongfang, Fang Kaiyue, Han Xingye, et al. Analysis of meteorological drought characteristics in the Lancang-Mekong River Basin based on multi-dimensional copula function [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 52-59. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-06-07 编辑: 施业)