

耦合融雪冻土及机器学习的新安江模型在高寒区的径流模拟

刘 娣^{1,2,3,4}, 董兆龙^{1,2,3,4}, 吕海深^{1,2,3,4}, 张 展⁵, 朱永华^{1,2,3,4},
鞠 琴^{1,2,3,4}, 余钟波^{1,2,3,4}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学水文水资源学院;
3. 河海大学全球变化与水循环国际合作联合实验室; 4. 河海大学长江保护与绿色发展研究院;
5. 黄河水文水资源科学研究院)

摘要:以黄河源区黑河若尔盖水文站上游流域为研究区,构建了耦合融雪、土壤冻融模块及随机森林算法的智慧新安江模型,使用 2007—2019 年降水、蒸发、气温资料开展径流模拟,并将其与传统新安江模型、耦合融雪土壤冻融的新安江模型及随机森林模型进行对比,评估了智慧新安江模型在高寒区水文过程模拟中的适应性。结果表明:传统新安江模型在验证期的整体模拟能力尚可,但在消融期模拟能力有限,无法准确刻画消融期径流过程;单纯随机森林模型虽能捕捉消融期水文过程非线性特征,但验证期整体模拟效果不够理想;耦合融雪土壤冻融模块使新安江模型不确定性增加 35.6%,但模型稳定性和模拟性能表现良好;智慧新安江模型在消融期的纳什效率系数(NSE)和克林-古普塔效率系数(KGE)均在 0.70 以上,验证期的 NSE、KGE 和相关系数均超过 0.90,百分比偏差在±10%以内,体现出更高的模拟性能与稳定性。

关键词:融雪模块;土壤冻融模块;随机森林算法;智慧新安江模型;高寒区;黄河源区

Runoff simulation integrating snowmelt, soil freeze-thaw, and machine learning with Xin'anjiang model in high-cold region//Liu Di^{1,2,3,4}, Dong Zhaolong^{1,2,3,4}, Lyu Haishen^{1,2,3,4}, Zhang Zhan⁵, Zhu Yonghua^{1,2,3,4}, Ju Qin^{1,2,3,4}, Yu Zhongbo^{1,2,3,4} (1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 3. Joint International Research Laboratory of Global Change and Water Cycle, Hohai University; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University; 5. Hydrology and Water Resources Research Institute of Yellow River)

Abstract: Taking the upstream basin of the Ruorgai Hydrological Station of the Heihe River in the source area of the Yellow River as the study area, a smart Xin'anjiang model coupling the snowmelt soil freeze-thaw module and random forest algorithm was constructed. Runoff simulation was carried out using precipitation, evaporation and temperature data from 2007 to 2019. And the simulation results were compared with the traditional Xin'anjiang model, the Xin'anjiang model coupling snowmelt, soil freeze-thaw and the random forest model to evaluate the adaptability of the smart Xin'anjiang model in the hydrological process simulation in high-cold regions. The results show that the overall simulation ability of the traditional Xin'anjiang model during the verification period is acceptable, but its simulation ability during the melting period is limited and cannot accurately depict the runoff process during the melting period. The simple random forest model can capture the nonlinear characteristics of the hydrological process during the melting period, the overall simulation effect during the verification period is not ideal. The coupling of the snowmelt soil freeze-thaw module increased the uncertainty of the Xin'anjiang model by 35.6%, but the model stability and simulation performance were good. During the ablation period, the Nash efficiency coefficient (NSE) and Klin Gupta efficiency coefficient (KGE) indicators of the Smart Xin'anjiang model were both above 0.70. During the validation period, the overall NSE, KGE and correlation coefficient all exceeded 0.90, and the Pbias index was within ±10%, demonstrating higher simulation performance and stability.

Key words: snowmelt module; soil freeze-thaw module; random forest algorithm; smart Xin'anjiang model; high-cold region; source area of the Yellow River

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202301-02);国家自然科学基金项目(42471019)
作者简介:刘娣(1986—),女,副研究员,博士,主要从事变化环境下水文循环演变机理研究。E-mail:liudi@hhu.edu.cn
通信作者:余钟波(1964—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zyu@hhu.edu.cn

近年来,全球气候变暖导致极端水文事件频发,水资源时空分布发生了巨大变化^[1-2]。高寒地区蕴含丰富水资源,可供养全球 50% 的人口^[3],气候变暖对寒区水文循环影响深远^[4]。水文模型在预测水文过程及水资源变化方面发挥重要作用,但在高寒区的适应性仍面临挑战^[5]。由于高寒区水文过程复杂,在自然条件和现有观测技术影响下,用于量化气象强迫和约束模型参数化的地面数据有限,传统水文模型在高寒区的模拟效能有待提高^[6-8]。

随着大数据和人工智能技术的发展,目前针对高寒区水文过程的模拟主要有两种技术路径。一种路径基于物理机理改进模型,即在传统水文模型的基础上,采用模块化技术精细化水文物理过程。例如:张梅洁等^[9]和楼骏等^[10]分别将新安江模型和 SIMHYD 模型与融雪模块进行耦合,改进了模型径流模拟精度;董宁澎等^[11]和 Qi 等^[12]分别基于新安江模型和 WEB-DHM 模型耦合融雪模块与土壤冻融模块,改进了传统水文模型对高寒区水文过程的模拟能力。但基于单纯物理机理的水文模型在处理复杂非线性关系时仍存在不足。另一种路径利用数据驱动方法替代物理模型进行径流模拟。例如:周剑等^[13]利用 BP 神经网络识别水文单元冻土面积改进 PRMS 模型在黑河流域的适应性;黄克威等^[14]基于长短期记忆 (LSTM) 算法构建冻土水文机器学习模型开展缺资料区小流域的径流模拟;Kratzert 等^[15]基于 LSTM 算法构建融雪水文模型,在全球数百个流域进行了径流模拟验证。然而,这种基于单纯数据驱动的机器学习模型虽在捕捉复杂模式方面表现出色,但缺乏物理过程机理。如何有效耦合水文过程物理机理同时融合机器学习算法优化数据驱动是目前智慧水利下高寒区水文模型发展的一个要点。

黄河源区作为“中华水塔”的核心组成部分,是确保黄河下游安澜、实现流域水资源可持续管理与

高质量发展的重要保障,在黄河源区进行水文研究尤为重要^[16]。黄河源区地处青藏高原东北部,属于典型高寒地区。积雪和冻土是黄河源区水文循环过程的重要组成部分,积雪融化和土壤冻融的协同机制对高寒地区径流过程有着复杂影响^[17-18],在高寒地区开展径流模拟研究需充分考虑积雪和冻土对径流的协同作用。目前,针对黄河源区的水文模拟大多采用 SWAT 和新安江等传统水文模型^[19-22]。但这些研究仍侧重于液态降水对径流的作用,忽略融雪和土壤冻融对径流的贡献,致使消融期径流模拟误差较大。鉴于上述问题,本文选取黄河源区黑河若尔盖水文站上游流域作为研究区,耦合新安江模型与随机森林算法、融雪模块和土壤冻融模块,构建智慧新安江模型(以下简称“T-XAJ-RF 模型”),开展若尔盖水文站上游流域的径流模拟,并系统评估传统新安江模型(以下简称“XAJ 模型”)、耦合融雪土壤冻融的新安江模型(以下简称“T-XAJ 模型”)、单纯随机森林算法模型(以下简称“RF 模型”)和 T-XAJ-RF 模型 4 种不同模型对研究区径流过程的模拟能力,旨在提出适应于高寒源区径流模拟的智慧水文模型,为精准刻画黄河源区径流过程提供思路。

1 研究区概况与数据资料

1.1 研究区概况

研究区概况如图 1 所示,面积约为 4 001 km²,海拔在 3 400 m 以上,多年平均气温仅为 0.7 ~ 1.1℃^[23],属高原寒温带半湿润气候,其两大核心寒区水文特征对径流过程具有支配性影响:积雪覆盖期可长达 9 月,使得春季融雪成为径流的关键来源^[24];广泛发育的沼泽湿地导致土层含水量高,致使季节性冻土冻结与解冻过程缓慢,影响持续时间长,年均冻结时间 200 d 左右,个别区域甚至到 7 月

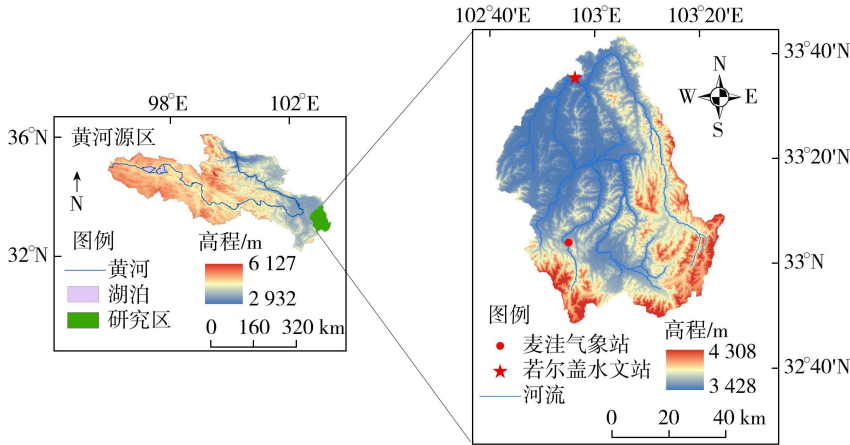


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

才完全解冻^[25-26],所以季节性冻融对土壤蒸散发、下渗等关键水文过程有着长久影响。研究区内站点稀少,除若尔盖水文站和麦洼气象站外,附近再无其他站点可供参考。

1.2 数据资料

本文采用降水、蒸发、气温数据作为新安江模型的驱动数据,采用若尔盖站实测径流作为验证数据,利用积雪数据划分消融期,研究时段为 2007—2019 年。其中,降水、气温数据采用时间分辨率为 1 d、水平空间分辨率为 0.1°的中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD 2.0),该数据集可用于水文模型、地表模型、土地数据同化和其他陆地模型,精度优于国际上已有再分析数据的精度^[27-28]。经过对研究区内格点数据进行提取分析,降水平均空间变异系数小于 0.18,可知降水数据空间分布较为均衡,故采用面平均数据进行模拟;气温平均空间变异系数大约为 0.23,研究期序列中 73% 气温数据空间变异系数小于 0.3,因研究区内平均温度接近于 0℃,可认为气温数据空间变异水平较低,整个流域气温空间分布相似度高,故采用区域内平均气温进行模拟。流量数据和蒸发数据来源于若尔盖水文站和麦洼气象站(图 1),均摘录于《中华人民共和国水文年鉴》。其中,流量采用若尔盖站 2007—2019 年逐日流量数据;蒸发数据采用若尔盖站和麦洼站的蒸发数据平均值,因麦洼站蒸发数据不连续,采用若尔盖站数据对缺测序列进行插补^[29]。积雪数据采用基于高级甚高分辨率辐射计(AVHRR)的《中国积雪物候数据集(1980—2020 年)》^[30],时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 5 km。

2 研究方法

2.1 模型构建

2.1.1 T-XAJ 模型构建

新安江模型主要分为蒸散发、产流、水源划分、汇流计算 4 部分^[31-32]。其中,蒸散发模块采用三层蒸发模型,分为上层、下层和深层蒸发;产流模块采用蓄满产流模式,即假设任意地点上,在土壤含水量达到田间持水量前,降水全部被土壤吸收成为张力水,土壤含水量达到田间持水量后,后续降水全部变为径流;水源划分模块采用三水源划分,将径流分为地表径流、壤中流、地下径流;汇流过程分为坡面汇流和河道汇流。根据董宁澎等^[11]和邓超等^[33-34]的研究,在 XAJ 模型中耦合融雪产流模块和土壤冻融模块。

根据式(1)~(3)建立融雪产流模块。计算步骤为:①根据式(1)设置临界气温判断降水类型;当日气温低于降雪气温时,只产生降雪;当日气温高于融雪气温时,只产生降雨;当日气温介于降雪气温

和融雪气温之间时,降雨量为气温和降水量的线性函数。②根据式(2)计算高温融雪产水量和降雨融雪产水量。③根据式(3)获取当日总融雪水量,更新次日雪水当量;汇总融雪水量与降雨获取当日总液态水。

$$P_r = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ P(T_s - T)/(T_s - T_0) & T_s \leq T < T_0 \\ P & T \geq T_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_s = \alpha(T - T_0) \\ M_r = \beta P_r(T - T_0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} M = \min\{M_s + M_r, G\} \\ G_{t+1} = G_t - M + P_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: T 为当日气温; T_s 为降雪气温; T_0 为融雪气温; P 为降水量; P_s 为降雪量; P_r 为降雨量; M_s 为高温融雪产水量; M_r 为降雨融雪产水量; M 为融雪产水总量; α 为度日因子; β 为降雨融雪因子; G 为雪水当量; G_t 为当日(第 t 日)雪水当量; G_{t+1} 为次日(第 $t+1$ 日)雪水当量。模块参数中 T_s 、 T_0 、 α 、 β 需进行率定。模块输入为逐日降水和逐日气温数据,输出为逐日总液态水量。

根据式(4)~(6)构建土壤冻融模块。计算步骤为:①根据式(4)构建土壤温度关于前 2 日平均气温的函数并计算土壤温度,再利用土壤温度和土壤冻结温度计算土壤水未冻结比例。②根据土壤水未冻结比例,利用式(5)计算总自由水量和自由水蓄水容量中的未冻结部分及冻结部分。③根据式(6)计算总张力水量和张力水蓄水容量中的未冻结部分及冻结部分。

$$\begin{cases} T_e = e^{-\gamma G^2} T_a + (1 - e^{-\gamma G^2}) T_f \\ \theta_u = \begin{cases} 1 - (1 - \theta_r) e^{\delta(T_e - T_f)} & T_e \geq T_f \\ \theta_r & T_e < T_f \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} S = S_{\text{tot}} \theta_u \\ S_f = S_{\text{tot}} (1 - \theta_u) \\ S_M = S_{M_{\text{tot}}} \theta_u \\ S_{Mf} = S_{M_{\text{tot}}} (1 - \theta_u) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} W = W_{\text{tot}} \theta_u \\ W_f = W_{\text{tot}} (1 - \theta_u) \\ W_M = W_{M_{\text{tot}}} \theta_u \\ W_{Mf} = W_{M_{\text{tot}}} (1 - \theta_u) \end{cases} \quad (6)$$

式中: T_e 为土壤温度; γ 为积雪厚度因子; T_a 为前 2 日平均气温; T_f 为土壤冻结温度; δ 为土壤冻融速率因子; θ_r 为残余水含量; θ_u 为土壤水未冻结比例; S_{tot} 为总自由水量; S 为未冻结自由水量; S_f 为冻结

自由水量; S_{Mtot} 为自由水总蓄水容量; S_M 为未冻结自由水蓄水容量; S_{Mf} 为冻结自由水蓄水容量; W_{tot} 为总张力水量; W 为未冻结张力水量; W_f 为冻结张力水量; W_{Mtot} 为张力水总蓄水容量; W_M 为未冻结张力水蓄水容量; W_{Mf} 为冻结张力水蓄水容量。模块参数中 T_f 、 γ 、 δ 、 θ_r 需要率定。

考虑到土壤深度越大,与空气之间的热量交换越小,所以参考 XAJ 模型水源划分部分,即只有上一层的张力水完全冻结或融化,下一层才会产生变化,故将张力水量和张力水蓄水容量中的冻结部分按上层、下层、深层的顺序进行逐层分配,再结合土壤水未被冻结的比例,计算各层张力水量及蓄水容量的未冻结部分和冻结部分。与 XAJ 模型进行耦合时,各部分水量只有未冻结部分参与蒸散发和产流计算,冻结部分不进行计算。土壤冻融模块的输入为气温数据,输出为自由水与各层张力水量及蓄水容量的冻结部分与未冻结部分。

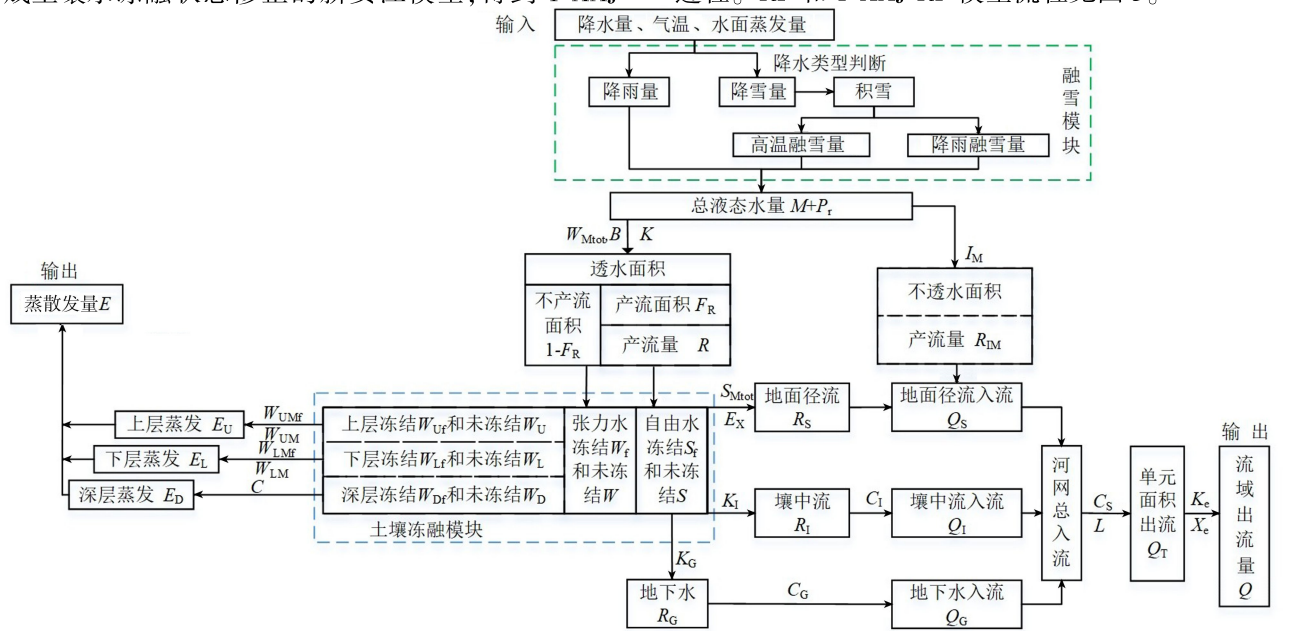
本文将逐日降水 and 气温数据输入融雪模块,经过雪雨分离和积雪消融计算得到总液态水量;将气温数据输入土壤冻融模块,计算自由水与各层张力水量及蓄水容量的冻结部分与未冻结部分;最后将蒸发数据和融雪模块输出的总液态水量输入至已完成土壤水冻融状态修正的新安江模型,得到 T-XAJ

模型的径流输出。T-XAJ 模型结构见图 2。

2.1.2 RF 与 T-XAJ-RF 模型构建

随机森林是一种集成学习方法^[35],在训练时考虑了不同子集特征,增加了模型的多样性,提升整体泛化能力,可以增强水文模型的准确性和鲁棒性,故本文采用随机森林算法提高 T-XAJ 模型在研究区的径流模拟精度。

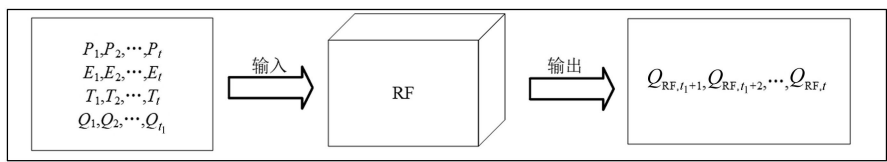
研究中采用两种方法对比数据驱动模型的适用性^[36-37]。第一种方法直接采用随机森林算法构建 RF 模型;将率定期的降水、蒸发、气温和实测径流数据输入 RF 模型进行训练,将验证期的降水、蒸发和气温数据输入训练后的模型,输出验证期的模拟流量过程。第二种方法将 T-XAJ 模型与随机森林算法进行耦合构建 T-XAJ-RF 模型,包含两个阶段:①利用 T-XAJ 模型开展整个研究期的径流模拟,其中输入数据为降水、蒸发和气温,输出数据为模拟的流量过程和融雪水量、土壤含水量等中间变量;②将率定期的降水、蒸发、气温、融雪水量、土壤含水量、模拟流量及实测流量作为训练数据,将验证期的降水、蒸发、气温、融雪水量、土壤含水量和模拟流量作为验证数据,输出随机森林算法改进后的模拟流量过程。RF 和 T-XAJ-RF 模型流程见图 3。



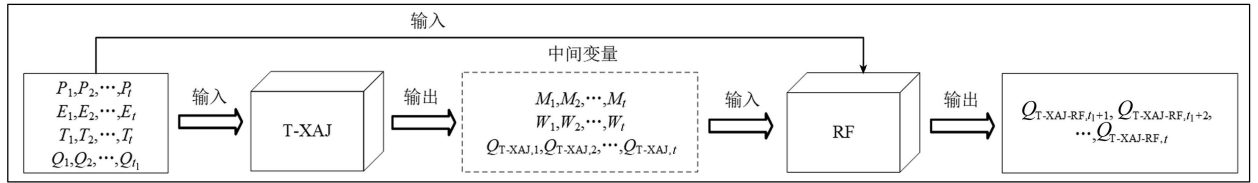
注:图中 B 为流域张力水蓄水容量曲线方次; K 为流域蒸散发折算系数; F_R 为透水产流面积占比; R 为透水面产流量; I_M 为不透水面积占比; R_{IM} 为不透水面积产流量; W_{UMf} 为上层冻结张力水蓄水容量; W_{UM} 为上层未冻结张力水蓄水容量; W_{LMf} 为下层冻结张力水蓄水容量; W_{LM} 为下层未冻结张力水蓄水容量; C 为深层蒸散发折算系数; W_{Uf} 为上层冻结张力水量; W_U 为上层未冻结张力水量; W_{Lf} 为下层冻结张力水量; W_L 为下层未冻结张力水量; W_{Df} 为深层冻结张力水量; W_D 为深层未冻结张力水量; E_X 为流域自由水蓄水容量曲线方次; R_S 为地面径流; Q_S 为地面径流入流量; K_1 为壤中流日流出系数; R_1 为壤中流; C_1 为壤中流消退系数; Q_1 为壤中流入流量; K_G 为地下水日流出系数; R_G 为地下水; C_G 为地下水消退系数; Q_G 为地下水入流量; C_S 单元内河网汇流系数; L 为滞后时间; Q_T 为单元面积出流量; K_e 为马斯京根法传播时间; X_e 为马斯京根法调蓄系数; E 为蒸散发量; Q 为流域出流量。

图 2 T-XAJ 模型结构

Fig. 2 Structure of T-XAJ model



(a) RF 模型



(b) T-XAJ-RF 模型

注:图中变量下标中模型名称表示该变量为对应模型输出结果;1,2,...,t₁ 为率定期,t₁+1,t₁+2,...,t 为验证期。

图 3 RF 模型和 T-XAJ-RF 模型流程

Fig. 3 Flowchart of RF model and T-XAJ-RF model

2.2 参数率定上不确定分析方法

本文以 2007—2015 年作为率定期,率定融雪模块、土壤冻融模块和 XAJ 模型的参数;以 2016—2019 年作为验证期,验证 T-XAJ 模型的径流模拟能力。研究中将融雪参数、土壤冻融参数与 XAJ 模型的参数进行统一率定,考虑到模型率定的精度和效率,对 T-XAJ 模型的参数采用粒子群算法进行参数率定^[38],粒子种群数取 1000,迭代次数为 50 次。

由于 XAJ 模型在耦合其他模块后,模型参数增加,模型结构发生变化,不同模块中参数可能会有相关性,进而引发异参同效现象^[39]。这种情况下,仅凭最优参数集的良好表现无法证明模型的普遍适用性,所以需要通过不确定性分析验证参数空间的整体行为,进而对耦合模型的不确定性进行量化和溯源。由于将物理模型的参数和随机森林算法的超参数共同分析较为复杂,所以本文只对 T-XAJ 模型中的物理参数进行不确定性分析。分析过程中考虑到敏感参数与耦合模型的相关性更高,分布结果对模型的不确定性影响更大,所以本文只分析最为敏感参数的后验分布特征。方法为:①采用广义似然不确定性估计 (GLUE) 框架,通过拉丁超立方采样技术在参数可行域内生成 500 组代表性参数集^[40]。以纳什效率系数 (NSE) 作为模型性能的量化指标,设定 NSE 大于 0.4 的似然阈值筛选行为参数集,通过计算参数集内所有参数的变异系数求取不同模块对耦合模型的不确定性贡献率;②假设模型参数的先验分布在取值范围内为均匀分布,基于参数值与模型性能的相关性分析,从 T-XAJ 模型所有参数中识别出对模型输出最为敏感的关键参数,并对比分析这些参数的相对不确定性和后验分布特征^[41];③选取代表性水文序列,基于行为参数集构建 90% 置信区间的 uncertainty 边界,系统性评估 T-XAJ 模型的预测可靠性和稳定性。

2.3 评估指标

以 NSE、克林-古普塔效率系数 (KGE)、相关系数 (r)、均方根误差 (RMSE) 和百分比偏差 (P_b) 作为评估指标^[42-44],评估模型的适应性。其中,使用 NSE 和 KGE 综合评判各模型的模拟能力,使用 r 重点判断各模型对径流增减趋势的响应情况,使用 RMSE 和 P_b 对比分析各模型的模拟误差。

3 结果与分析

3.1 消融期划分

利用 K-Means 聚类法^[45],结合研究区温度、径流、积雪和季节性冻土特征,将径流过程划分为 3 个时期:积雪冻土消融期为 3 月 6 日至 7 月 5 日,降水产流期为 7 月 6 日至 10 月 15 日,积雪冻土退水期为 10 月 16 日至次年 3 月 5 日。基于气温、径流及积雪覆盖率数据序列获取 2007—2019 年气温、流量和积雪覆盖率多年旬均值变化过程,如图 4 所示。由图 4 可见,积雪冻土消融期始于春季,气温达到 0℃ 以上,积雪覆盖率逐渐减小,此时融雪、冻土和降水共同影响径流;6 月中旬积雪全部消融,7 月上旬

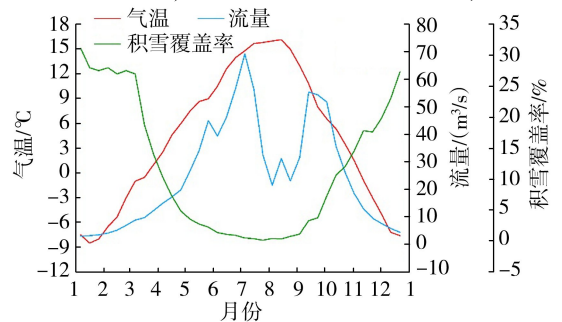


图 4 2007—2019 年气温、流量和积雪覆盖率多年旬均值变化过程

Fig. 4 Change process of multi-year 10-d mean values of temperature, discharge, and snow cover rate from 2007 to 2019

冻土完全解冻,此时降水成为径流变化的主要驱动要素;10月中旬径流明显减小,积雪明显增多,此时积雪冻土退水期开始。

3.2 T-XAJ 模型参数率定与不确定性

T-XAJ 模型中参数敏感性、取值范围和最优取值见表 1。

表 1 T-XAJ 模型参数
Table 1 Parameters of T-XAJ model

层次	参数	敏感性	取值范围	最优取值
融雪模块	T_0	敏感	-2.0~4.0℃	1.5℃
	T_s	敏感	-6.0~5.0℃	-4℃
	α	不敏感	0~5.0 mm/d	4.18 mm/d
	β	不敏感	0~0.2 mm/d	0.12 mm/d
土壤冻融模块	T_f	敏感	-30~5.0℃	-12℃
	γ	敏感	0~0.2	0.08
	δ	不敏感	0~20.0	9.68
	θ_r	不敏感	0~0.5	0.25
蒸散发计算	K	敏感	<1	0.76
	W_{UMtot}	敏感	10~50 mm	36.7 mm
	W_{LMtot}	敏感	60~90 mm	75.0 mm
	C	不敏感	0.10~0.20	0.14
产流计算	W_{Mtot}	不敏感	70~200	135
	B	不敏感	0.1~0.4	0.30
	I_M	不敏感	0.01~0.02	0.01
水源划分	S_{Mtot}	敏感	10~80 mm	21.8 mm
	K_G	敏感	<0.7	0.40
	K_I	敏感	<0.7	0.39
	C_I	敏感	0~0.9	0.43
汇流计算	C_G	敏感	0.980~0.998	0.992
	C_S	敏感	0.001~1	0.86
	L	敏感	≥ 1 h	2.8 h
	K_e	敏感	12~48 h	28.47 h
	X_e	敏感	0~0.5	0.37

注： W_{UMtot} 为上层张力水总蓄水容量； W_{LMtot} 为下层张力水总蓄水容量。

根据参数与模拟结果 NSE 的相关度选取了 T-XAJ 模型中的 8 个敏感性较大的参数(T_0 、 T_s 、 T_f 、 γ 、 W_{LMtot} 、 K 、 K_G 、 C_G)进行后验分布分析,结果如图 5 所示。由图 5 可见, T_0 和 T_s 的分布较为分散,缺乏明显的集中趋势,不确定性最大,这直接导致融雪模块对 T-XAJ 模型的不确定性贡献最大,贡献率达 22.9%,显著高于土壤冻融模块的 9.6%和模块交互产生的 3.1%。敏感参数中大多参数均呈现单峰分布,有较高的可辨识性,整体看来模型有较好的稳健性。只有 T_0 、 T_s 和 W_{LMtot} 概率密度曲线较平缓、峰型不够明显,究其原因为:冻融过程中的水分相变和土壤热传导耦合作用增强了寒区水文过程非线性特征;参数间的补偿关系导致不同参数组合通过相互调整产生相似的模拟效果,削弱了单个参数的可辨识性。

为验证模型的性能,选取了枯水年(2008 年)、丰水年(2014 年)以及平水年(2010 年、2012 年)对 T-XAJ 模型在不同流量量级下的稳定性和可靠性进行评估,结果如图 6 所示。由图 6 可见,行为参数集模拟结果的 90%置信区间宽度适中,说明模型不确定性较低,具有良好的稳定性;2008 年、2014 年、2010 年、2012 年预测结果 90%置信区间对观测径流值的覆盖率分别为 81.5%、85.7%、82.8%、80.2%,均超过 80%,说明模型对不同量级径流的模拟效果良好,可靠性较好。

3.3 径流模拟结果

以 2007—2015 年为率定期,2016—2019 年为验证期,利用 XAJ、T-XAJ、RF、T-XAJ-RF 4 种模型分别对研究区的径流进行模拟,结果如图 7 所示,模拟结果评价指标如表 2 所示。由图 7 和表 2 可见,XAJ

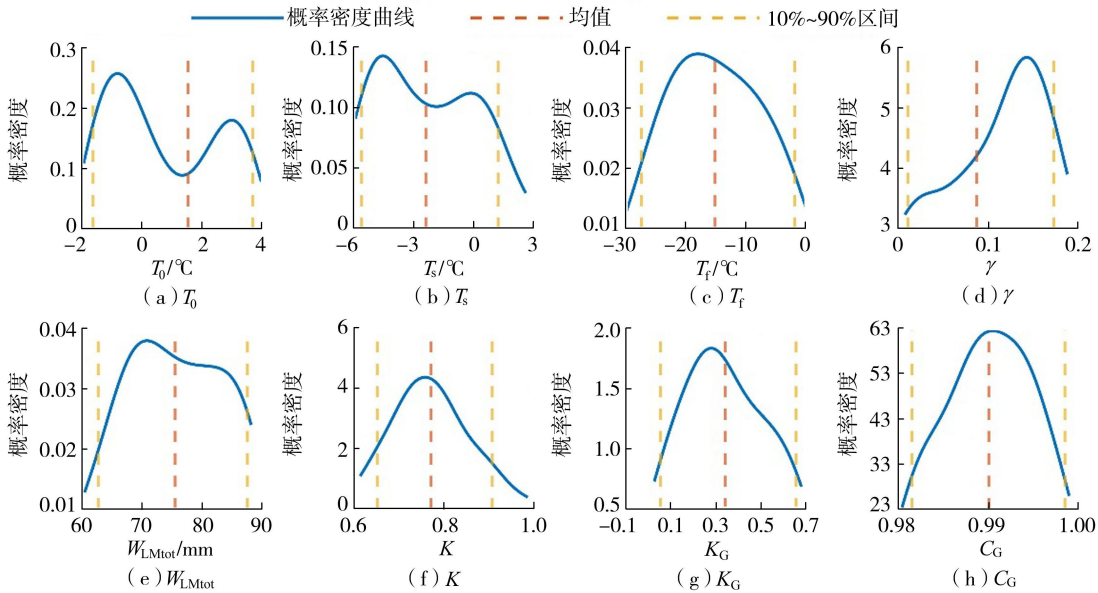


图 5 敏感参数后验分布
Fig. 5 Posterior distributions of sensitive parameters

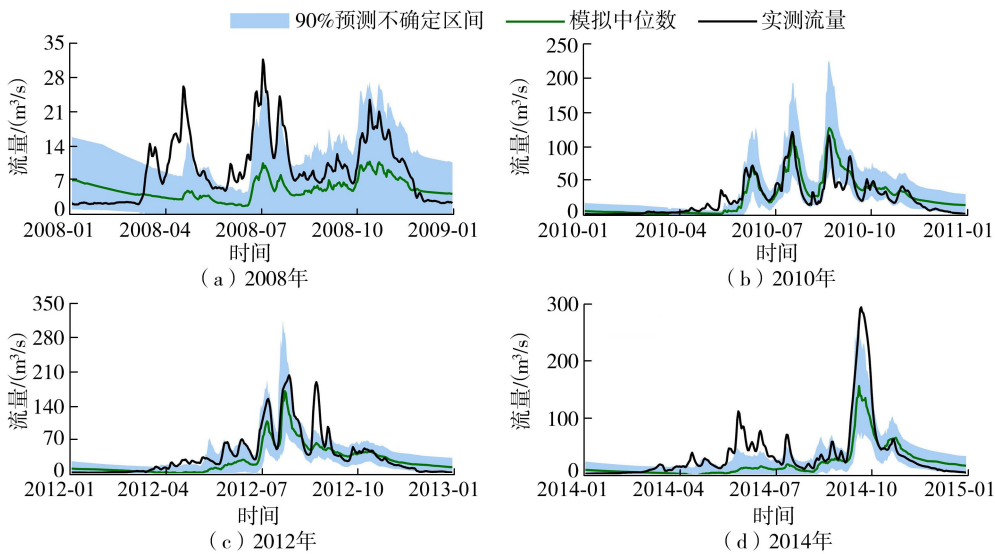


图 6 T-XAJ 模型在不同典型水文年的验证结果

Fig. 6 Validation results of T-XAJ model in different typical hydrological years

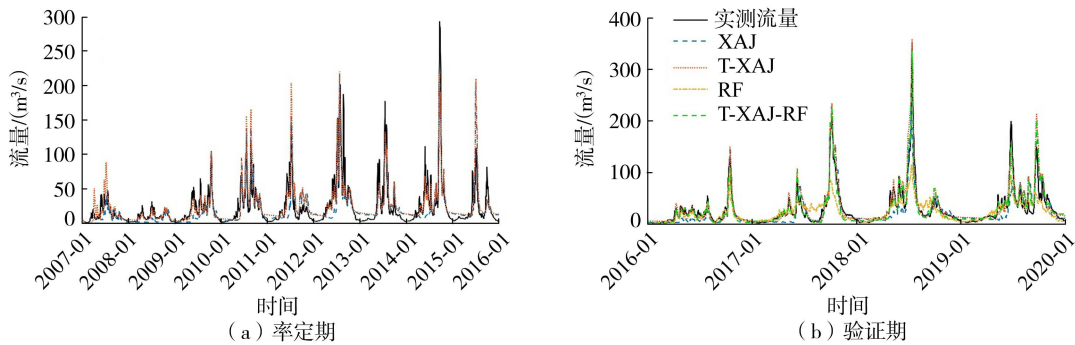


图 7 4 种模型的径流模拟结果

Fig. 7 Runoff simulation results of four models

表 2 4 种模型模拟结果的评价指标

Table 2 Evaluation indicators for simulation results of four models

模型	时期	NSE	KGE	r	RMSE/(m^3/s)	$P_b/\%$
XAJ	率定期	0.67	0.77	0.83	17.44	-11.1
XAJ	验证期	0.72	0.70	0.86	19.70	-13.3
T-XAJ	率定期	0.74	0.83	0.87	15.71	10.2
T-XAJ	验证期	0.84	0.81	0.94	14.82	13.1
RF	验证期	0.57	0.45	0.84	24.70	-20.4
T-XAJ-RF	验证期	0.90	0.94	0.95	11.90	-0.4

模型的 NSE 在率定期和验证期分别为 0.67 和 0.72, KGE 分别为 0.77 和 0.70, r 在 0.8 以上, 整体模拟结果尚可, 但模型误差较大, RMSE 在率定期和验证期均超过 $17 \text{ m}^3/\text{s}$, 对水量的低估超过 10%。XAJ 模型误差主要来源于消融期, 因为 XAJ 模型未考虑积雪消融的影响, 仅靠降水量驱动模型无法准确刻画消融期真实的径流过程。RF 模型虽然对消融期径流过程刻画较好, 但其难以复现夏秋季节洪峰流量过程, 对水量的估计误差最大, 所以整体模拟效果一般。相比之下, 引入融雪模块与季节性土壤冻融模块的 T-XAJ 模型在评价指标上均有提升, 验

证期 NSE 较 XAJ、RF 模型分别提升 0.12、0.27, KGE 分别提升 0.11、0.36, 总体效能有所提升, 可以较好地模拟实测径流过程。在耦合随机森林算法后, T-XAJ-RF 模型的模拟效果较 T-XAJ 模型又有所改进, NSE 和 KGE 分别提升 0.06 和 0.13, r 达到 0.95, 误差降到最低水平, P_b 接近 0, 评价指标在 4 种模型中均为最优。可见, T-XAJ-RF 模型模拟结果与实测过程吻合度更高, 尤其是对流量峰值的刻画能力得到显著改善, 在极端径流过程的还原上表现出更强的适应性。

进一步对比分析验证期 4 种模型在积雪冻土消融期(3 月 6 日至 7 月 5 日)的径流模拟能力, 结果如图 8 所示, 模拟结果评价指标如表 3 所示。由图 8 和表 3 可见, XAJ 模型在消融期, NSE 和 KGE 在 2018 年最大, 分别为 0.43 和 0.60, 在其余模拟年份均较低, 表明 XAJ 模型在消融期的模拟精度较低。XAJ 模型的 r 值为 0.638 ~ 0.911, 中位数为 0.789, 表明 XAJ 模型对径流增减趋势的捕捉能力一般, 主要因为 XAJ 模型无法识别积雪融水, 不能对径流的增减趋势及时产生响应。另外, 基于

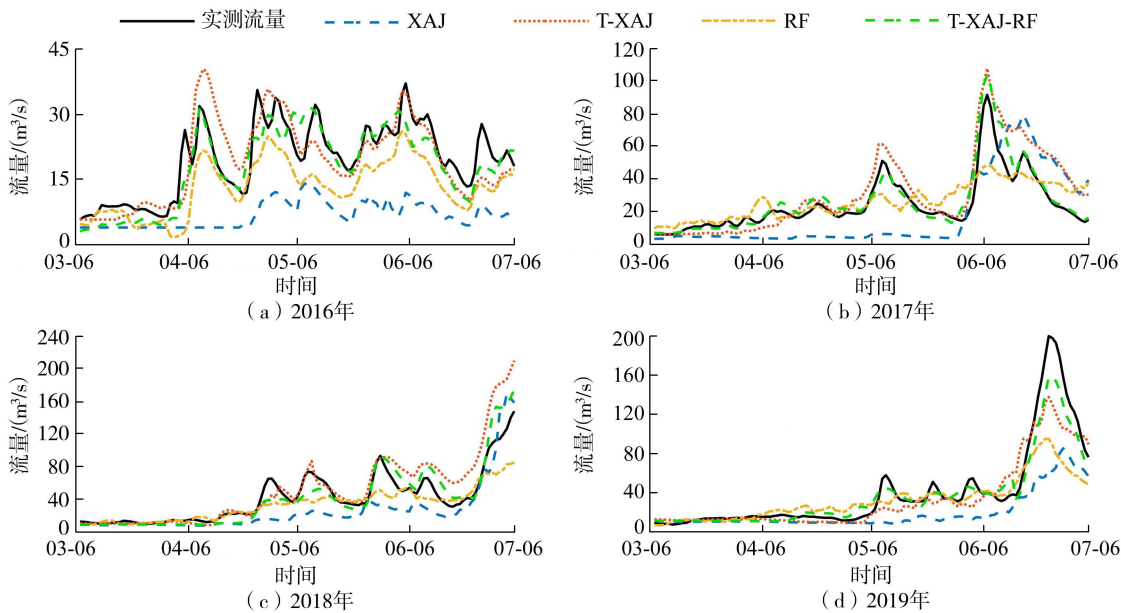


图 8 验证期 4 种模型在消融期的径流模拟结果

Fig. 8 Simulation results of runoff during ablation period of four models during validation period

表 3 验证期 4 种模型在消融期的评价指标

Table 3 Evaluation indicators for ablation period of 4 models during validation period

年份	模型	NSE	KGE	r	RMSE/(m^3/s)	$P_b/\%$
2016	XAJ	-1.95	0.04	0.74	14.33	-65.24
	T-XAJ	0.60	0.79	0.83	5.27	-1.91
	RF	0.16	0.57	0.86	7.65	-32.09
	T-XAJ-RF	0.74	0.85	0.90	4.26	-8.88
2017	XAJ	-0.27	0.42	0.64	18.78	-26.99
	T-XAJ	0.44	0.45	0.94	12.47	27.40
	RF	0.54	0.55	0.75	11.27	6.30
	T-XAJ-RF	0.88	0.79	0.97	5.69	8.10
2018	XAJ	0.43	0.60	0.84	23.09	-36.82
	T-XAJ	0.51	0.46	0.95	21.31	24.39
	RF	0.68	0.56	0.92	17.26	-19.53
	T-XAJ-RF	0.83	0.75	0.96	12.57	-0.29
2019	XAJ	0.37	0.22	0.91	35.30	-51.33
	T-XAJ	0.83	0.72	0.94	18.52	-15.43
	RF	0.60	0.42	0.91	28.23	-19.81
	T-XAJ-RF	0.93	0.77	0.99	11.69	-8.17

XAJ 模型对消融期径流的模拟在量化精度上较为不足, RMSE 为 $14.33 \sim 35.30 \text{ m}^3/\text{s}$, 在 4 种模型中最大; P_b 为 $-65.24\% \sim -26.99\%$, 各年份模拟值均显著低于实测径流。究其原因, XAJ 模型未考虑积雪消融和季节冻土对径流的影响, 而冰雪融水是消融期径流的主要来源。各年对比表明, XAJ 模型的 RMSE 年际差异大, 如 2016 年积雪覆盖度较少, 融雪水量不足, 融雪期的径流量相应较小, 该年的 RMSE 为 $14.33 \text{ m}^3/\text{s}$; 而 2018 年、2019 年雨雪较多的年份, 冬季积雪深度较大, 春季融雪径流量显著高于 2016 年, XAJ 模型因不能准确表现融雪-降雨耦合产流过程和冻土阻渗作用, 致使该时期 RMSE 达

$35.30 \text{ m}^3/\text{s}$, 说明 XAJ 模型在消融期的径流模拟稳定性不足。

T-XAJ 模型在消融期的 NSE 为 $0.44 \sim 0.83$, 中位数为 0.56 ; KGE 为 $0.45 \sim 0.79$, 中位数为 0.59 , 除 2017 年、2018 年 KGE 较差外, 其余年份 T-XAJ 模型的 NSE 和 KGE 指标均较 XAJ 模型有较大提升。同时, T-XAJ 模型的 r 值为 $0.832 \sim 0.951$, 中位数为 0.937 , 说明 T-XAJ 模型可以更精准地表现径流的增减趋势, 对径流动态变化的捕捉能力较 XAJ 模型明显加强。此外, T-XAJ 模型的 P_b 为 $-15.43\% \sim 27.40\%$, 中位数为 11.24% 。与 XAJ 模型相比, T-XAJ 模型的 RMSE 降低至 $5.27 \sim 21.31 \text{ m}^3/\text{s}$, 中位数为 $15.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。T-XAJ 模型的整体误差明显降低, 说明考虑了积雪消融和土壤冻融影响的 T-XAJ 模型可有效地降低 XAJ 模型在消融期的模拟误差。在年际尺度上, T-XAJ 模型通过动态调节积雪消融水量和土壤冻结水量, 使得 RMSE 波动范围缩小 24% , 证实耦合融雪模块和土壤冻融模块的 T-XAJ 模型可以提升 XAJ 模型在消融期的稳定性。

RF 模型在消融期的 NSE 为 $0.16 \sim 0.68$, 中位数为 0.57 ; KGE 为 $0.42 \sim 0.57$, 中位数为 0.55 。与 XAJ 模型相比, RF 模型的 NSE 和 KGR 整体有所提升, 表明随机森林算法在捕捉消融期径流非线性特征方面具备一定优势; 与 T-XAJ 模型相比, NSE 和 KGR 在 2017 年、2018 年有所上升, 而在 2016 年、2019 年有所下降, 说明数据驱动模型和物理模型在处理复杂非线性问题时各有优缺。RF 模型的 r 值为 $0.752 \sim 0.916$, 中位数为 0.886 , 也表明 RF 模型可以较好地表现消融期径流的增减趋势。RF 模型

的 P_b 为 $-32.09\% \sim 6.30\%$, 中位数为 -19.67% , RMSE 为 $7.65 \sim 28.23 \text{ m}^3/\text{s}$, 中位数为 $14.27 \text{ m}^3/\text{s}$, 与 XAJ 模型相比有所改进。进一步分析发现, RF 模型的 RMSE 随实测径流量的增大而增大, 其中在 2016 年最小, 为 $7.65 \text{ m}^3/\text{s}$, 而在 2019 年最大, 为 $28.23 \text{ m}^3/\text{s}$, 这种误差变化趋势表明纯数据驱动模型对极端水文事件的适应性不足。

T-XAJ-RF 模型在消融期的 NSE 为 $0.74 \sim 0.93$, 中位数为 0.86 ; KGE 为 $0.75 \sim 0.85$, 中位数为 0.78 。与 XAJ、T-XAJ、RF 模型相比, T-XAJ-RF 模型的 NSE 和 KGE 最优。与此同时, T-XAJ-RF 模型的 r 值在各年份均超过 0.9 , 说明 T-XAJ-RF 模型能够精准地刻画流域径流的动态变化特征。此外, T-XAJ-RF 模型的 Pbias 为 $-8.88\% \sim 8.10\%$, 中位数为 -4.23% , RMSE 为 $4.26 \sim 12.57 \text{ m}^3/\text{s}$, 中位数为 $11.64 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在 4 种模型中, T-XAJ-RF 模型的 RMSE 的中位数和波动幅度最小, 说明基于 T-XAJ-RF 模型的水量估计更精确, 稳定性更强, 整体模拟性能较 T-XAJ 模型和 RF 模型得到有效提升, 证明 T-XAJ-RF 模型中耦合融雪和土壤冻融模块可以确保模型能够遵循积雪消融与土壤冻融的物理规律, 为径流过程模拟提供合乎逻辑的物理基础, 机器学习模块可通过引入物理模型的关键中间变量, 精准捕捉这些物理状态与径流之间复杂的非线性关系。通过将考虑融雪和季节性土壤冻融的 XAJ 模型与随机森林算法进行耦合, 可以有效发挥物理机制模型与数据驱动模型的优势, 大幅提升耦合模型的模拟精度和稳定性。

4 结 论

a. 以黄河源区黑河若尔盖水文站上游流域为研究区, 基于 XAJ 模型, 耦合融雪、土壤冻融模块及随机森林算法构建了 T-XAJ-RF 模型, 以降水、蒸发、气温数据驱动 XAJ、T-XAJ、RF、T-XAJ-RF 4 种模型开展了径流模拟。

b. XAJ 模型在验证期模拟能力仅优于 RF 模型, 但在消融期的模拟能力严重不足, 模拟效果劣于其他模型。RF 模型可以捕捉水文过程的非线性特征, 较 XAJ 模型在消融期的 NSE、KGE 的中位数分别提升了 0.52 、 0.43 , 但对极端水文事件的适应性不足, 难以刻画峰值流量过程, 在验证期模拟效果劣于 XAJ 模型。T-XAJ 模型虽较 XAJ 模型的不确定性增加了 35.6% , 但耦合优化后的模型仍具有良好的可靠性和稳定性, 消融期与 RF 模型效果相当; 验证期 NSE 较 XAJ 模型、RF 模型分别提升 0.12 、 0.27 , KGE 分别提升 0.11 、 0.36 , 模拟效能有所

提升。

c. T-XAJ-RF 模型在消融期和整个验证期模拟评估指标普遍提升, 消融期 NSE、KGE 均在 0.70 以上, 验证期整体 NSE、KGE、 r 均超过 0.90 , P_b 均在 $\pm 10\%$ 以内。T-XAJ-RF 模型表现出更强的模拟精度和稳定性, 证明物理机制与数据驱动融合的智慧水文模型更适应于高寒区水文过程模拟。

参考文献:

[1] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-161. (Zhang Jianyun, Wang Guoqing, Jin Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese))

[2] 王幸, 张晓力, 刘翔宇. 黄河流域环境规制对水资源利用效率的影响研究[J]. 水利经济, 2024, 42(6): 43-49. (Wang Xing, Zhang Xiaoli, Liu Xiangyu. Research on impact of environmental regulations on water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(6): 43-49. (in Chinese))

[3] Pomeroy J W, Brown T, Fang Xing, et al. The cold regions hydrological modelling platform for hydrological diagnosis and prediction based on process understanding[J]. Journal of Hydrology, 2022, 615: 128711.

[4] 韩璐, 魏加华, 侯铭垒, 等. 黄河源区下垫面变化对水文过程的影响[J]. 水力发电学报, 2024, 43(6): 63-74. (Han Lu, Wei Jiahua, Hou Minglei, et al. Impact of underlying surface changes on hydrological process in source area of Yellow River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(6): 63-74. (in Chinese))

[5] 雍斌, 张建云, 王国庆. 黄河源区水文预报的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2023, 34(2): 159-171. (Yong Bin, Zhang Jianyun, Wang Guoqing. Key scientific issues of hydrological forecast in the headwater area of Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2): 159-171. (in Chinese))

[6] 刘扬李, 周祖昊, 刘佳嘉, 等. 基于水热耦合的青藏高原分布式水文模型: II. 考虑冰川和冻土的尼洋河流域水循环过程模拟[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 201-210. (Liu Yangli, Zhou Zuhao, Liu Jiajia, et al. Distributed hydrological model of the Qinghai Tibet Plateau based on the hydrothermal coupling: II: simulation of water cycle processes in the Niyang River Basin considering glaciers and frozen soils? [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2): 201-210. (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] 胡一栋,史玉品,康耀辉,等. 黄河源区玛曲至唐乃亥区间水文模型适用性研究[J]. 人民黄河,2023,45(9): 81-85. (Hu Yidong, Shi Yupin, Kang Yaohui, et al. Applicability study of hydrological models from Maqu to Tangnaihai in the source of Yellow River [J]. Yellow River,2023,45(9):81-85. (in Chinese))
- [9] 张梅洁,吕海深,刘娣,等. 耦合融雪的新安江模型在干旱区径流模拟研究[J]. 干旱区研究,2022,39(2): 379-387. (Zhang Meijie, Lyu Haishen, Liu Di, et al. Runoff simulation in an arid area using the Xin' anjiang model coupled with snowmelt [J]. Arid Zone Research, 2022, 39 (2) : 379-387. (in Chinese))
- [10] 楼骏,崔激. 改进的 SIMHYD 模型在黄河源区高寒气候的适应性研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39 (10) : 27-30. (Lou Jun, Cui Wei. Study on adaptability of improved SIMHYD model in alpine climate region [J]. Water Resources and Power, 2021, 39 (10) : 27-30. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] Qi Jia, Wang Lei, Zhou Jing, et al. Coupled snow and frozen ground physics improves cold region hydrological simulations: an evaluation at the Upper Yangtze River Basin (Tibetan Plateau) [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124 (23) : 12985-13004.
- [13] 周剑,李新,王根绪,等. 一种基于 MMS 的改进降水径流模型在中国西北地区黑河上游流域的应用[J]. 自然资源学报, 2008, 23 (4) : 724-736. (Zhou Jian, Li Xin, Wang Genxu, et al. An improved precipitation-runoff model based on MMS and its application in the upstream Basin of the Heihe River [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23 (4) : 724-736.)
- [14] 黄克威,王根绪,宋春林,等. 基于 LSTM 的青藏高原冻土区典型小流域径流模拟及预测[J]. 冰川冻土, 2021, 43 (4) : 1144-1156. (Huang Kewei, Wang Genxu, Song Chunlin, et al. Runoff simulation and prediction of a typical small watershed in permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau based on LSTM [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43 (4) : 1144-1156. (in Chinese))
- [15] Kratzert F, Klotz D, Brenner C, et al. Rainfall-runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22 (11) : 6005-6022.
- [16] 李芳,邹松兵,陆志翔,等. 气候变暖背景下黄河源区白河和黑河流域径流变化归因分析[J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2020, 56 (1) : 56-64. (Li Fang, Zou Songbing, Lu Zhixiang, et al. Analysis of streamflow variations in the Bai and Hei River Basins in the source region of the Yellow River under the background of climate warming [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2020, 56 (1) : 56-64. (in Chinese))
- [17] 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) : 217-220. (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) : 217-220. (in Chinese))
- [18] Wang Tianye, Wu Tonghua, Wang Ping, et al. Spatial distribution and changes of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau revealed by statistical models during the Period of 1980 to 2010 [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 661- 670.
- [19] 王梦园,解宏伟,赵杰,等. 基于 SWAT 模型的黄河源区径流模拟[J]. 青海大学学报 (自然科学版), 2019, 37 (1) : 39-46. (Wang Mengyuan, Xie Hongwei, Zhao Jie, et al. Runoff simulation of the Yellow River source region based on SWAT model [J]. Journal of Qinghai University (Natural Science), 2019, 37 (1) : 39-46. (in Chinese))
- [20] 奚建梅,杨现坤,吕喜玺,等. 基于 SWAT 模型的黑河与白河流域水文模拟研究[J]. 人民黄河, 2021, 43 (10) : 60-66. (Xi Jianmei, Yang Xiankun, Lyu Xixi, et al. Hydrological simulation of Heihe and Baihe River Basin based on SWAT model [J]. Yellow River, 2021, 43 (10) : 60-66. (in Chinese))
- [21] 赵娜娜,王贺年,张贝贝,等. 若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应[J]. 水资源保护, 2019, 35 (5) : 40-47. (Zhao Nana, Wang Henian, Zhang Beibei, et al. Runoff variation in Zoige Wetland Basin and its response to climate change [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5) : 40-47. (in Chinese))
- [22] 殷晖,白福青. 流域未来径流和蓄水量预测不确定性的量化评估[J]. 水电能源科学, 2024, 42 (2) : 18-22. (Yin Hui, Bai Fuqing. Quantitative evaluation of uncertainty in predicting future runoff and water storage in a watershed [J]. Water Resources and Power, 2024, 42 (2) : 18-22. (in Chinese))
- [23] 陈靖松,刘焱序,刘涛,等. 若尔盖高寒泥炭地生态修复对气候减缓的影响评估[J]. 生态学报, 2025, 45 (16) : 7938-7950. (Chen Jingsong, Liu Yanxu, Liu Tao, et al. Assessment of the impact of ecological restoration on

- climate mitigation in the alpine peatland of Zoige[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45 (16): 7938-7950. (in Chinese))
- [24] 扎兴初,黄待富,郭懋,等. 若尔盖高原草原湿地 40 年积雪的初步研究[J]. *高原山地气象研究*,2012,32(4): 61-64. (Zha Xingchu,Huang Daifu,Guo Mao,et al. Study on forty-year snow cover of Zoige Plateau[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,2012,32(4): 61-64. (in Chinese))
- [25] Chen Xuegao, Yu Zhongbo, Lin Hui,et al. Hydrological responses to permafrost degradation on Tibetan Plateau under changing climate [J]. *Water Science and Engineering*, 2024,17(3):209-216.
- [26] 王绍令. 若尔盖高原及其周围山地的冻土和环境[J]. *冰川冻土*, 1997 (1): 41-48. (Wang Shaoling. Frozen ground and environment in the Zoige Plateau and its surrounding mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,1997(1):41-48. (in Chinese))
- [27] He Jie, Yang Kun, Tang Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. *Scientific Data*,2020,7(1):25.
- [28] 何杰,阳坤,李新,等. 中国区域地面气象要素驱动数据集 v2.0(1951—2024) [EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心 (2025-09-16). [https://www. tpdc. ac. cn/zh-hans/data/e60dfd96-5fd8-493f-beae-e8e5d24dece4](https://www.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/e60dfd96-5fd8-493f-beae-e8e5d24dece4).
- [29] 王德维,冉四清,胡必要. 浅谈水文年鉴汇编及其质量控制[J]. *江苏水利*,2017(1):32-33. (Wang Dewei,Ran Siqing,Hu Biyao. Primary discussion on compilation of hydrological yearbook and the quality control[J]. *Jiangsu Water Resources*,2017(1):32-33. (in Chinese))
- [30] 郝晓华,赵琴,纪文政,等. 1980—2020 年 AVHRR 中国积雪物候数据集[J]. *中国科学数据(中英文网络版)*, 2022, 7 (3): 45-54. (Hao Xiaohua, Zhao Qin, Ji Wenzheng,et al. A dataset of snow cover phenology in China based on AVHRR from 1980 to 2020 [J]. *China Scientific Data*,2022,7(3):45-54. (in Chinese))
- [31] 赵人俊. *流域水文模拟* [M]. 北京:水利电力出版社, 1984.
- [32] 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 interpretaion parameters of Xin’ anjiang-Haihe model and its application[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2025,53(1):1-9. (in Chinese))
- [33] 邓超,孙培源,尹鑫,等. 基于概念性水文模型与长短时记忆模型耦合的汉江上游流域径流模拟[J]. *湖泊科学*,2025,37(1):279-292. (Deng Chao,Sun Peiyuan,Yin Xin,et al. Runoff simulation in the upper Han River Basin using physics-informed machine learning-model [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37 (1): 279-292. (in Chinese))
- [34] 林雍权,陈启慧,李琼芳,等. 基于新安江模型的老挝南俄河流域径流变化贡献率分析[J]. *水利水电科技进展*,2024,44(3):21-26. (Lin Yongquan, Chen Qihui, Li Qiongfang, et al. Analysis of contribution rate of runoff variability of Nam Ngum River Basin in Laos based on Xin’ anjiang model [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2024,44(3):21-26. (in Chinese))
- [35] Breiman L. Random forests[J]. *Machine Learning*,2001, 45(1):5-32.
- [36] 瞿思敏,余裕,方正,等. 机器学习模型与物理机制模型在长诏水库流域实时洪水预报中的比较研究[J]. *水资源保护*, 2025, 41 (5): 73-78. (Qu Simin, Yu Yu, Fang Zheng,et al. Comparative study of machine learning model and physical mechanism model in flood forecasting of the Changzhao Reservoir Basin [J]. *Water Resources Protection*,2025,41(5):73-78. (in Chinese))
- [37] 徐嘉远,邹磊,夏军,等. TVGM-LSTM 耦合模型及其径流模拟效果分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39 (6): 104-110. (Xu Jiayuan, Zou Lei, Xia Jun, et al. TVGM-LSTM coupling model and its runoff simulation effect analysis [J]. *Water Resources Protection*,2023,39(6):104-110. (in Chinese))
- [38] 石朋,陆美霞,吴洪石,等. 不同优化算法在新安江模型参数率定中的效果评估[J]. *水资源保护*,2023,39(4): 19-25. (Shi Peng, Lu Meixia, Wu Hongshi, et al. Evaluation of different optimization algorithms in parameter calibration of Xin’ anjiang model [J]. *Water Resources Protection*,2023,39(4):19-25. (in Chinese))
- [39] 陈峻琳,温天福,李国芳,等. 土地利用变化和水库调控对洪水过程的影响:以赣江上游平江流域为例[J]. *湖泊科学*, 2025, 37 (2): 612-626. (Chen Junlin, Wen Tianfu,Li Guofang,et al. Effects of land use change and reservoir operation on flood process: a case study of Pingjiang River Basin in the Upper Ganjiang River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37 (2): 612-626. (in Chinese))
- [40] Fadhliani, Zulkafli Z, Yusuf B, et al. Assessment of streamflow simulation for a tropical forested catchment using dynamic TOPMODEL-dynamic fluxEs and Connectivity for predictions of HydRology (DECIPHeR) framework and generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) [J]. *Water*,2021,13(3):317.
- [41] 陈橙. 基于 SWAT 模型参数不确定性的纳伦河流域水文过程分析[D]. 厦门:厦门理工学院,2023.
- [42] 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))

[43] Tang Guoqiang,Clark M P ,Papalexious S M. The use of serially complete station data to improve the temporal continuity of gridded precipitation and temperature estimates[J]. Journal of Hydrometeorology,2021,22(6):1553-1568.

[44] Nair G S, Karunanidhi D, Subramani T. Hydrological modeling for the Bharathapuzha River Basin of South India using SWAT model [J]. Desalination and Water Treatment,2025,321:100975.

[45] 赵文龙,吕海深,朱永华,等. 额尔齐斯河库威站日尺度的降雨融雪径流模拟[J]. 干旱区研究,2024,41(10):1685-1698. (Zhao Wenlong, Lyu Haishen, Zhu Yonghua, et al. Simulation of rainfall and snowmelt runoff on the daily scale of the Kuwei Station in the Irtysh River [J]. Arid Zone Research,2024,41(10):1685-1698. (in Chinese))

(收稿日期:2025-09-26 编辑:王芳)

+++++

(上接第 64 页)

[29] 王钰,张翔,闫少锋,等. 基于水-经济社会-生态环境协同演变的生态流量阈值适宜性研究[J]. 水资源与水利工程学报,2024,35(4):47-55. (Wang Yu, Zhang Xiang, Yan Shaofeng, et al. Suitability of ecological flow thresholds based on the simulation of coordinated development of water-economic society-ecological environment[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2024,35(4):47-55. (in Chinese))

[30] 孟钰,魏剑林,管新建,等. 流域水生态环境补偿研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(6):215-223. (Meng Yu, Wei Jianlin, Guan Xinjian, et al. Research progress in watershed water ecological environment compensation[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):215-223. (in Chinese))

[31] 游进军,贾玲,王彦兵,等. 协调公平与效率的“四水四定”研究Ⅱ:应用[J]. 水利学报,2024,55(3):266-277. (You Jinjun, Jia Ling, Wang Yanbing, et al. Study on “water dominates development” based on equity and efficiency Ⅱ: application [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(3):266-277(in Chinese))

[32] 陈明,陈睿,任希岩,等. 基于“人-地-水”平衡的流域国土空间格局优化:以长江经济带国土空间规划为例[J]. 城市规划,2024,48(增刊1):44-52. (Chen Ming, Chen Rui, Ren Xiyan, et al. Optimization for territorial space layout of river basin based on population-land use-water resource balance: a case study of territorial and spatial planning of Yangtze River Economic Belt[J]. City Planning Review,2024,48(Sup1):44-52. (in Chinese))

[33] 江恩慧,李洁玉,王远见,等. 黄河流域系统可持续运行的“139+”水沙调控指标体系[J]. 水利学报,2025,56(4):423-432. (Jiang Enhui, Li Jieyu, Wang Yuanjian, et al. Water and sediment regulation index system “139+” for sustainable development of the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2025,56(4):423-432. (in Chinese))

[34] 刘宇,辜玉慧,刘炎鑫,等. 泾河流域水文气象演变及其变化归因[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(10):34-48. (Liu Yu, Gu Yuhui, Liu Yanxin, et al. Hydrometeorological evolution and its change attribution in Jinghe River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(10):34-48. (in Chinese))

[35] Ma Yuan, Li Yongping, Zhang Yufei, et al. Mathematical modeling for planning water-food-ecology-energy nexus system under uncertainty: a case study of the Aral Sea Basin [J]. Journal of Cleaner Production,2021,308:127368.

[36] 周洪华,杨玉海,朱成刚,等. 供需平衡视角下昆仑山北坡县域单元地表水资源开发利用潜力初探[J]. 干旱区地理,2024,47(7):1106-1115. (Zhou Honghua, Yang Yuhai, Zhu Chenggang, et al. Development and utilization potential of surface water resources of the counties on the northern slope of Kunlun Mountains from the perspective of supply and demand balance[J]. Arid Land Geography,2024,47(7):1106-1115. (in Chinese))

[37] 王红瑞,丁雨涵,李敏,等. 黄河流域典型地区人水关系耦合与调控[J]. 水资源保护,2025,41(5):132-141. (Wang Hongrui, Ding Yuhan, Li Min, et al. Coupling and regulation of human-water relationship in typical areas of the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2025,41(5):132-141. (in Chinese))

(收稿日期:2025-09-18 编辑:王芳)

