

冷亚君, 唐博文, 刘昊臣, 等. 高寒流域融雪径流模拟改进及关键驱动因子分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(9): 35-45. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.003

LENG Yajun, TANG Bowen, LIU Haochen, et al. Improvement of snowmelt runoff simulation and analysis of key driving factors in alpine river basins[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(9): 35-45. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.003

高寒流域融雪径流模拟改进及关键驱动因子分析

冷亚君¹, 唐博文¹, 刘昊臣¹, 胡安娜¹, 李红霞^{1,2}

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 山区河流保护与治理全国重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:【目的】针对分布式水文模型 SPHY 在寒区融雪径流模拟中物理机制不足(忽略太阳辐射驱动、采用静态度日因子)的问题, 优化增强其融雪模块, 提升寒区融雪径流模拟精度。【方法】主要进行三个方面改进: (1)构建辐射耦合的融雪潜在能量项; (2)提出基于雪深—太阳辐射关系的季节性动态日因子; (3)基于随机森林等量化不同因子在融雪过程中的重要性。以青藏高原东南部尼洋河流域为研究区, 基于 2010—2015 年气象、水文及遥感数据, 验证改进后模型的模拟性能, 并通过趋势分析、相关性分析及随机森林模型, 量化不同气象因子对融雪径流的贡献率。【结果】模型模拟结果: 率定期与验证期内, 改进后的模型融雪期平均纳什效率系数(NSE)提升 8%, 均方根误差(RMSE)降低 17%, 整体百分比偏差(PBIAS)由-14.77%优化至-0.05%。驱动因子分析显示, 气温是融雪径流的主导因子(贡献率 41.79%), 风速贡献率达 25.58%; 能量因子(气温+辐射)总贡献率达 61.08%。【结论】耦合太阳辐射与季节性动态日因子的改进方案, 有效增强了 SPHY 模型在寒区的径流模拟能力。研究成果可为其他高寒流域径流模拟提供一定的参考, 为气候变化下高寒流域径流预报及水资源管理等提供一定的科学支撑。

关键词: SPHY 模型; 融雪径流; 动态日因子; 辐射耦合; 尼洋河流域; 高寒流域; 驱动因子分析; 随机森林

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.003

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV121

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)09-0035-11



Improvement of snowmelt runoff simulation and analysis of key driving factors in alpine river basins

LENG Yajun¹, TANG Bowen¹, LIU Haochen¹, HU Anna¹, LI Hongxia^{1,2}

(1. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] To address the issue of insufficient physical mechanisms in the distributed hydrological model SPHY for snowmelt runoff simulation in cold regions (specifically the neglect of solar radiation and the use of static degree-day factors), the

收稿日期: 2025-11-21; 修回日期: 2025-12-17; 录用日期: 2026-01-09; 网络出版日期: 2026-01-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52479021)

作者简介: 冷亚君(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文模拟及预报研究。E-mail: 2024223060021@stu.scu.edu.cn

通信作者: 李红霞(1981—), 女, 博士, 教授, 主要从事水文模拟及预报研究。E-mail: hongxiali@scu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

snowmelt module is optimized and enhanced to improve the accuracy of snowmelt runoff simulation in cold regions. [Methods] Three improvements were made: (1) constructing a radiation-coupled potential snowmelt energy term; (2) proposing a seasonal dynamic degree-day factor based on the snow depth-solar radiation relationship; and (3) quantifying the importance of different factors during the snowmelt process based on random forest. Taking the Niyang River Basin in the southeastern Qinghai-Xizang Plateau as the study area, the simulation performance of the improved model was verified based on meteorological, hydrological, and remote sensing data from 2010 to 2015. The contribution rates of different meteorological factors to snowmelt runoff were quantified through trend analysis, correlation analysis, and random forest models. [Results] The model simulation result showed that during the calibration and validation periods, the average Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) of the improved model during the snowmelt period increased by 8%, the root mean square error ($RMSE$) reduced by 17%, and the overall Percent bias ($PBIAS$) was optimized from -14.77% to -0.05%. Driving factor analysis showed that air temperature was the dominant factor for snowmelt runoff (contribution rate of 41.79%), and the wind speed contribution rate reached 25.58%. The total contribution rate of energy factors (air temperature and radiation) reached 61.08%. [Conclusion] The improved scheme coupling solar radiation with the seasonal dynamic degree-day factor effectively enhances the runoff simulation capability of the SPHY model in cold regions. The findings provide references for runoff simulation in other alpine river basins, and offer scientific support for runoff forecasting and water resource management under climate change.

Keywords: SPHY model; snowmelt runoff; dynamic degree-day factor; radiation coupling; Niyang River Basin; alpine watershed; driving factor analysis; Random Forest (RF)

0 引 言

寒区流域独特的冰川-积雪-水文耦合过程不仅主导着区域水资源的时空分布格局,也深刻影响着下游供水安全、农业灌溉及生态系统的稳定性。在青藏高原东南部等典型高寒区域,积雪与冰川消融构成河川径流的主要补给来源,且不同子流域中二者对径流的贡献率呈现出显著的空间异质性^[1]。已有研究表明,在整个青藏高原尺度,冰雪融水对径流总量的贡献比例约为 34%^[2],突显了其在寒区水循环中的核心作用。然而,在气候变暖持续加剧的背景下,积雪积累与消融过程的时空动态趋于复杂^[3-4],对寒区水文模型的模拟精度和适用性提出了更高要求^[5-7]。相较于传统集总式模型,分布式水文模型能更真实地刻画下垫面异质性。SPHY (Spatial Processes in Hydrology) 模型为分布式水文模型,其模块化设计灵活、驱动数据需求相对简单(主要输入为日降水与气温),兼具冰川与积雪模块,尤其适用于数据稀缺的寒区流域。该模型已在青藏高原及其周边区域的水资源评估、径流组分划分及气候变化影响研究中得到广泛应用^[8-9],验证了其在寒区水文模拟中的实用性与潜力。

融雪过程是一个涉及能量与质量交换的复杂物理过程,其模拟精度是决定寒区流域水文模型模拟性能的关键。目前,主要的融雪计算方法包括能量平衡法和温度指数法。能量平衡法通过量化太阳辐射、感热、潜热等多源能量输入与积雪消融的定量关系,物

理机制较为完备,适用于刻画复杂下垫面条件下的非均匀融雪过程,但其高度依赖高时空分辨率的辐射、湿度、湍流交换系数等气象数据,在数据稀缺的大尺度寒区流域应用中面临严峻挑战^[5,10]。相比之下,基于度日因子(Degree-Day Factor, DDF)的温度指数法以“融雪量与正积温呈线性关系”为核心假设,仅需气温驱动,计算高效且数据需求低,因而被广泛集成于 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)、HEC-HMS (The Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) 及 SPHY 等分布式水文模型中^[10]。然而,此类模型的简化处理也带来了一定的模拟偏差^[11]。已有研究表明,温度指数法在刻画驱动融雪的物理机制方面存在不足^[12],采用静态度日因子且未考虑太阳短波辐射直接驱动作用的融雪模型(如 SPHY 模型),可能会引起融雪量系统性低估 15%~30%,尤其在青藏高原东南部等太阳辐射强烈、季节差异显著的区域表现明显,模拟径流过程与实测值偏差较大^[5,13]。

针对温度指数法在物理机制方面的局限性,国内外学者展开了积极探索。改进研究主要有两个方面:一是引入关键物理变量,例如,BOUAMRI 等^[14]通过系统比较温度指数与辐射指数模型在摩洛哥高阿特拉斯山区的模拟性能,证实了引入短波辐射驱动能够更精确地刻画点尺度雪水当量的动态变化,为增强温度指数法的物理机制提供了关键依据;ZHAO 等^[15]在 SWAT 模型中引入总辐射修正项,使天山融雪期径流模拟的纳什效率系数提升了 8%~12%。其

二是优化模型输入与参数, 例如, 刘江涛等^[16]认识到站点数据在代表高寒山区真实降水空间分布上的局限性, 开发了基于遥感卫星数据校正的降水输入模块, 并将其与度日因子模型耦合, 在拉萨河流域有效提高了融雪径流模拟效果; 穆艾塔尔·赛地等^[17]则从地形因素入手, 在 SRM(Snowmelt Runoff Model)模型中引入了海拔、坡向和坡度相结合的精细化流域分带方法及度日因子计算方案, 使模型在乌鲁木齐河流域的模拟确定性系数 R^2 从 0.77 提高至 0.80。这些研究在一定程度上弥补了传统温度指数法的不足, 推动了寒区融雪径流模拟的发展。然而, 现有改进方案主要聚焦于单一因子改进, 如仅耦合辐射、地形等。在青藏高原东南部, 由于季风性降水与强烈的太阳辐射共同作用, 积雪消融呈现出极强的非线性特征, 现有基于单一物理因子的改进模型往往难以准确捕捉这种复杂的时空演变规律。因此, 亟需一种能够同时考虑太阳辐射与温度协同效应, 并适应该区域独特水文特征的改进模型。此外, 雅鲁藏布江及其支流等季节性融雪流域, 相关系统性研究仍较为缺乏, 融雪径流的关键驱动因素也还有待于进一步研究。

尼洋河流域属于典型的以季节性融雪为主要补给来源的寒区流域。该区域太阳辐射强度大, 积雪消融季节变化显著。本研究以尼洋河流域为研究对象, 针对 SPHY 模型在寒区融雪径流模拟中存在的不足, 对其融雪模块进行改进: (1) 构建辐射耦合的融雪潜在能量项, 将太阳短波辐射与温度因子共同纳入融雪计算; (2) 提出基于雪深—太阳辐射关系的季节性动态

度日因子, 通过正弦函数刻画度日因子的年内动态变化, 适配季节性融雪流域特征; (3) 量化不同驱动因子在融雪能量中的重要贡献。本研究旨在通过上述改进, 提升寒区融雪径流的模拟精度, 并量化各驱动因子的重要性, 以期气候变化背景下寒区水资源管理与风险防控提供科学依据。

1 数据

1.1 研究流域概况

尼洋河流域(29°28'N—30°30'N, 92°10'E—94°35'E)位于青藏高原东南部, 是雅鲁藏布江下游北岸的重要支流(见图1), 更张水文站控制流域面积约15 821 km²。流域发源于念青唐古拉山脉南麓, 干流全长307.5 km, 总落差2 080 m, 平均坡降约7‰。地势西北高、东南低, 谷底海拔3 000~3 500 m, 山脊海拔多为5 500~6 500 m^[18]。冰川与永久积雪面积约975 km², 占全流域的5.5%, 是重要的“固态水库”^[19]。流域属湿润温带气候, 四季分明, 干湿季显著。受印度季风影响, 多年平均气温约8.5℃, 季节变化明显, 年内温差约15.4℃, 多年平均降水量约1 295 mm, 主要集中在6—9月^[20]。

1.2 数据来源

为构建、驱动、率定与验证 SPHY 模型, 本研究收集了多源数据, 主要包括基础地理数据、气象驱动数据以及用于模型验证的观测与遥感数据。其中, 数字高程模型(DEM)采用地理空间数据云平台发布的90 m分辨率数据, 用于提取流域边界、河网及坡度

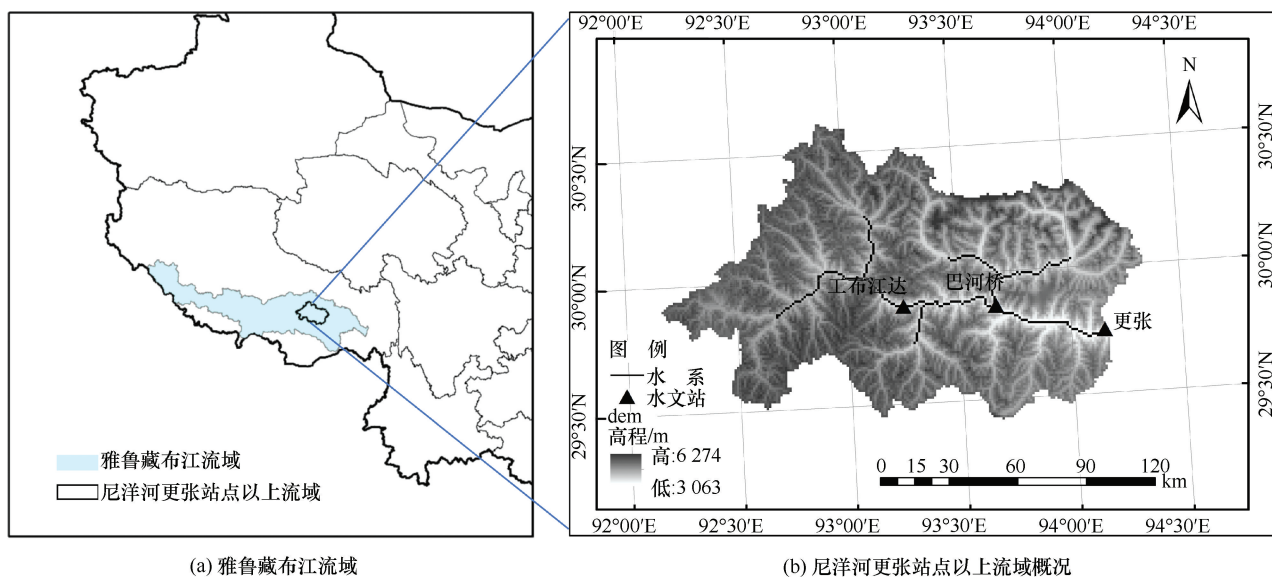


图1 尼洋河更张站点以上流域概况

Fig. 1 Overview of Niyang River Basin above Gengzhang hydrological station

等信息; 土地利用数据采用欧洲航天局发布的 GlobCover2009 全球土地利用产品, 空间分辨率为 300 m, 各地类关联相应作物系数以计算潜在蒸散发^[21]; 土壤水力参数来源于 HiHydroSoil v1.2 全球土壤水力数据库, 分辨率为 1 km, 提供根区层与下层土壤的田间持水量、饱和含水量、永久萎蔫点及饱和水力传导率等关键参数; 冰川范围数据采用 Randolph Glacier Inventory (RGI) 6.0 版本^[22]; 气象驱动数据采用中国区域高分辨率气象再分析数据集 (CMFD) 中的降水及气温数据^[23], 时间分辨率为 3 h, 空间分辨率为 0.1°, 该数据集融合了 GLDAS、TRMM 等再分析资料与中国地面气象站观测数据。本研究选取 2010—2015 年逐日降水量、平均气温、风速和向下短波辐射数据用于后续融雪径流驱动因子分析。此外, 积雪验证采用 HAO 等^[24] 开发的中国区域 MODIS 雪被范围产品 (2000—2020 年), 该产品针对不同土地覆盖类型设置了差异化的 NDSI 阈值 (如非森林类型阈值介于 -0.13~0.52 之间), 并在森林区域引入基于 NDVI 分段的 NDFSi 动态阈值方案, 有效提高了

积雪识别精度, 在青藏高原地区经过验证表现可靠; 雪深数据来源于国家青藏高原科学数据中心的 中国雪深长时间序列数据集 (1979—2024)^[25], 该数据集基于被动微波亮温反演, 采用 Chang 算法并结合中国地区实测雪深进行系数校正, 针对数据缺失时段, 利用时间上最邻近的有效观测进行插补, 为融雪过程分析提供数据支撑。

2 方法

2.1 SPHY 模型

图 2 展示了 SPHY 模型的结构原理。该模型的融雪模块基于动态雪储量模型, 采用度日因子法模拟雪的积累、消融、再冻结及径流生成过程。

根据气温阈值 T_{crit} 判断降水形式: 若日平均气温 $T_{avg,t} \leq T_{crit}$, 则为降雪; 若 $T_{avg,t} > T_{crit}$, 则为降雨, 降雪量公式为

$$P_{s,t} = \begin{cases} P_{e,t} & T_{avg,t} \leq T_{crit} \\ 0 & T_{avg,t} > T_{crit} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_{s,t}$ 为日降雪量 (mm); $P_{e,t}$ 为有效降水量

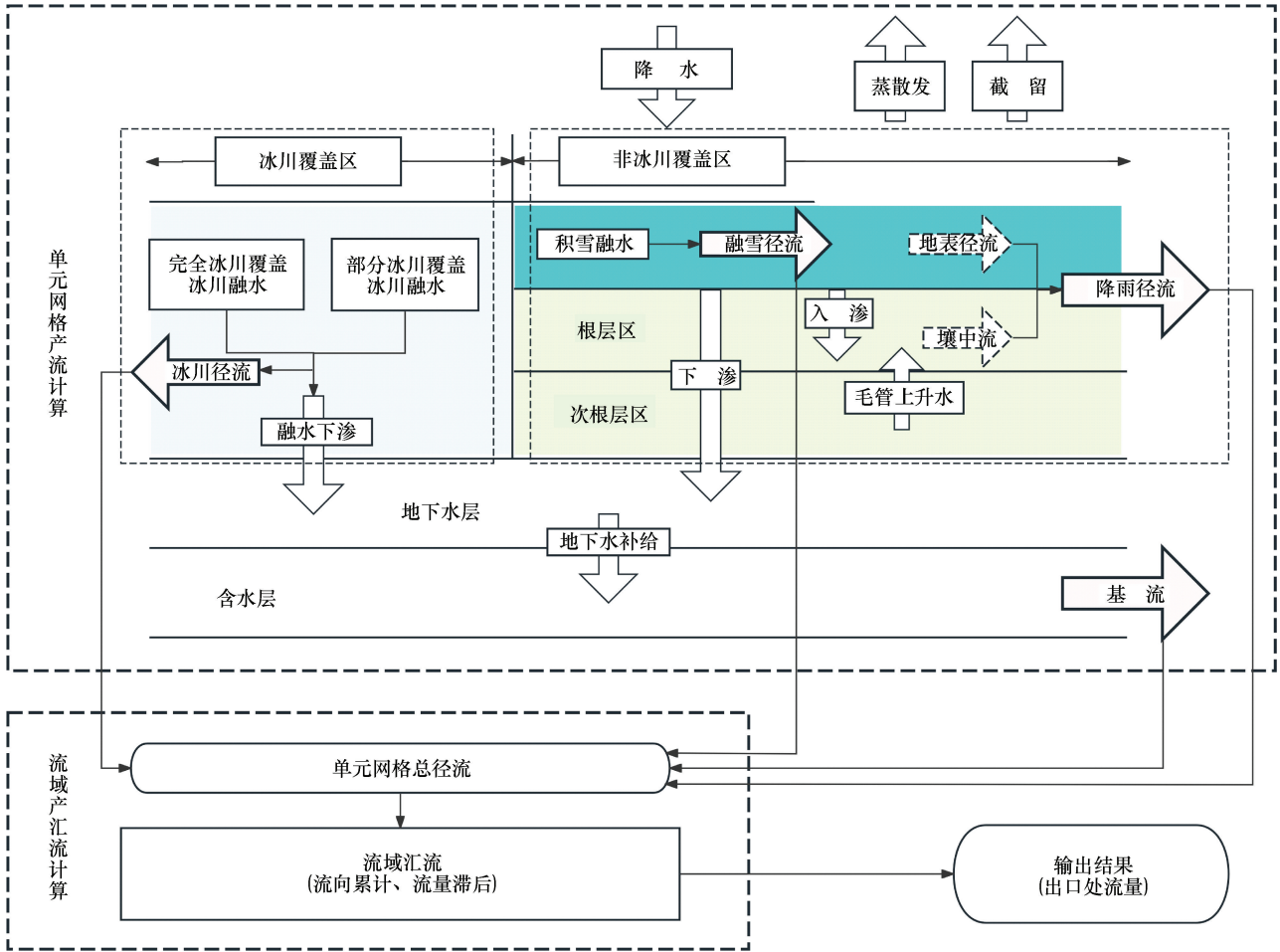


图 2 SPHY 结构原理

Fig. 2 Structural principle of SPHY model

(mm); $T_{avg, t}$ 为日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$); T_{crit} 表示雪/雨分界温度 ($^{\circ}\text{C}$) (需率定)。

原模型融雪过程采用度日因子法进行模拟, 即仅基于气温计算潜在融雪量, 计算公式为

$$A_{p, t} = \begin{cases} T_{avg, t} \cdot DDF_s, & T_{avg, t} > 0 \\ 0, & T_{avg, t} \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $A_{p, t}$ 为第 t 天积雪潜在消融量 (mm); DDF_s 为积雪度日因子 ($\text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。

2.2 融雪径流模拟改进

2.2.1 考虑太阳短波辐射的潜在融雪量计算

区域的融雪除了受气温主导, 太阳辐射驱动的融雪也占有很大的比例(辐射加热导致雪面温度远高于气温)。因此, 为进一步提高模型在辐射影响显著区域的适用性, 本研究引入太阳短波辐射项, 将潜在融雪量计算改进为

$$A_{p, t} = MT + MS \quad (3)$$

$$MT = T_{avg, t} \cdot DDF_s, T_{avg, t} > 0 \quad (4)$$

$$MS = SR \cdot (1 - \alpha) \cdot m_Q \quad (5)$$

式中, MT 为日温度项融雪 (mm); MS 为日辐射项融雪 (mm); SR 为入射太阳总辐射 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); α 为雪反照率, 根据先前青藏高原的研究^[26], 这里选择使用 $\alpha = 0.7$; m_Q 为能量-水深转换系数 ($\text{mm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$), 可由 $m_Q = \Delta t / (\rho_w \cdot L_f)$ 计算; Δt 是时间步长 (s); ρ_w 是水密度 ($1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$); L_f 是冰的融化潜热 ($3.34 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), 这里取为物理理论值; $m_Q = 0.258 \text{ mm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.2.2 将静态度日因子改进为季节性动态变化

原始 SPHY 模型中静态的度日因子不适用于季节性融雪地区。本研究通过分析流域 2009—2016 年 10 月至次年 6 月雪深与太阳辐射的 7 d 移动平均关系, 识别年内融雪速率最大与最小日期, 进而构建以正弦函数为基础的季节性动态度日因子表达式。雪深随着太阳辐射的逐渐增加而减小, 当雪深较高, 同时太阳辐射最小的时候, 表示融雪度日因子出现最小值的时间; 反之, 当雪深逐渐减小时, 最大辐射所对应的时间将是最大融雪度日因子出现的时间。

通过分析两个日期的时间分布, 获得度日因子的最大值和最小值的多年平均发生时间。度日因子最小值的中位数日期为 2 月 25 日 (第 56 天), 度日因子最大值的中位数日期为 5 月 31 日 (第 151 天)。在本研究中, 这两个中位数分别代表融雪度日因子的最大值和最小值。根据正弦变化原理, 将其值代入公式时, 分别出现最小正弦值和最大正弦值。即当 $n = 56$ 时,

$\sin$ 函数应处于 $3\pi/2$ 相位而正弦值应为 -1 。同时, $\sin$ 函数为 $\pi/2$ 相位, $n = 151$ 时正弦值为 1 。在此基础上, 将融雪度日因子的公式修改为

$$DDF_s = \frac{DDF_{s\text{MAX}} + DDF_{s\text{MIN}}}{2} + \frac{DDF_{s\text{MAX}} - DDF_{s\text{MIN}}}{2} \times \sin\left(\frac{\pi}{a} \times (b - n)\right) \quad (6)$$

式中, $DDF_{s\text{MAX}}$ 和 $DDF_{s\text{MIN}}$ 分别为最大最小度日因子; n 为年序日, 即一年中的第几天; a 、 b 为参数, 由两个年序日代入 $\sin$ 函数联立方程组确定, 本研究流域中, 通过计算, a 取 95, b 取 198.5。

改进的融雪模块如图 3 所示。

3 结果与分析

3.1 模型率定与验证

采用 HE 等^[27]提出的水文过程分割 (Hydrograph Partitioning Curves, HPC) 法对 2010—2015 年间更张水文站实测径流曲线进行划分, 结果如图 4(a) 所示。为验证划分结果的合理性, 将更张站 2010—2015 年融雪径流主导期划分结果与流域平均 MODIS 雪被覆盖度进行对比, 如图 4(b) 所示。结果显示, 划分出的融雪主导期与遥感观测的积雪覆盖度快速衰减期高度吻合, 表明 HPC 方法能够有效捕捉尼洋河流域以融雪为主要驱动的水文动态, 划分结果具有可靠性。

综合考虑了流域面积、下垫面特征、输入数据精度及计算效率, 本研究模型空间分辨率设定为 3 km 。模型以 2010 年作为预热期稳定初始水文状态, 2011—2013 年为率定期, 2014—2015 年为验证期进行模型模拟。由于 SPHY 模型未内置自动参数优化模块, 本研究在参考前人研究基础上采用手动调参方式, 对关键敏感性参数进行率定^[8-9]。参数率定依据前述 HPC 径流组分划分结果, 分四个步骤依次进行 (见表 1), 步骤 1 以基流和降雨径流子集 (QBF + QRR) 为对象, 率定与地下水过程相关的参数; 步骤 2 加入融雪径流 (QSR), 率定与融雪过程相关的参数; 步骤 3 进一步加入冰川融水径流 (QGR), 率定冰川消融相关参数; 步骤 4 则以全序列径流 (QTR) 为对象, 率定其余与整体模拟效果相关但难以归属前述步骤的参数, 采用多目标函数进行综合优化: 一是采用 NSE 作为目标函数进行率定, 主要关注峰值流量过程; 二是采用 N_l 作为目标函数进行率定, 主要关注基流过程; 三是采用 N_{ave} 作为目标函数进行率定, 同时关注峰值流量过程和基流过程。

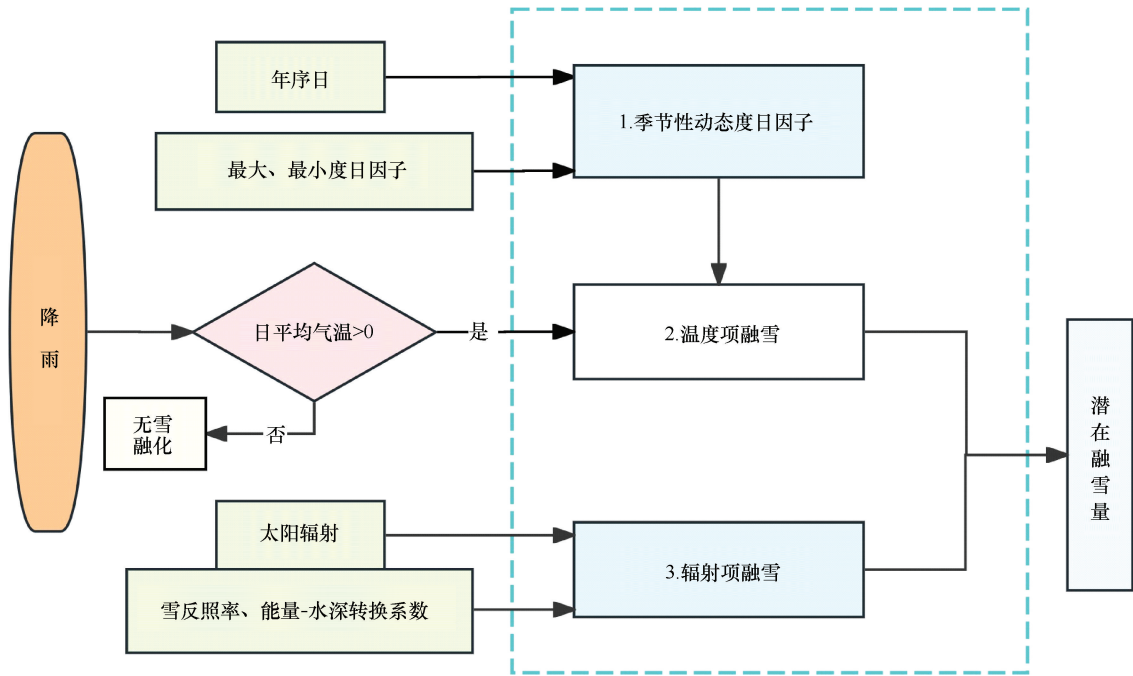


图 3 改进的融雪模块示意

Fig. 3 Schematic diagram of improved snowmelt module

表1 基于 HPC 划分方法的 SPHY 模型参数逐步率定

Table 1 Stepwise calibration of SPHY model parameters based on HPC division method

步 骤	水文过程子集	目标函数	参 数
1	QBF+QRR	E_l	$GwDepth$, $GwSat$, $deltaGw$, $alphaGv$.
2	QBF+QRR+QSR	E	DDF_{sMAX} , DDF_{sMIN} , T_{crit} , $SnowSC$
3	QBF+QRR+QSR+QGR	E	$DDFG$, $DDFDG$, $Glacf$
4	QTR	NSE , N_l , N_{ave}	$RootDepthFlat$, $SubDepthFlat$, kx

$$E_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\ln Q_{o,j} - \ln Q_{s,j})^2}{n}} \quad (7)$$

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (Q_{o,j} - Q_{s,j})^2}{n}} \quad (8)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (Q_{o,j} - Q_{s,j})^2}{\sum_{j=1}^n (Q_{o,j} - \overline{Q_o})^2} \quad (9)$$

$$N_l = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (\ln Q_{o,j} - \ln Q_{s,j})^2}{\sum_{j=1}^n (\ln Q_{o,j} - \ln \overline{Q_o})^2} \quad (10)$$

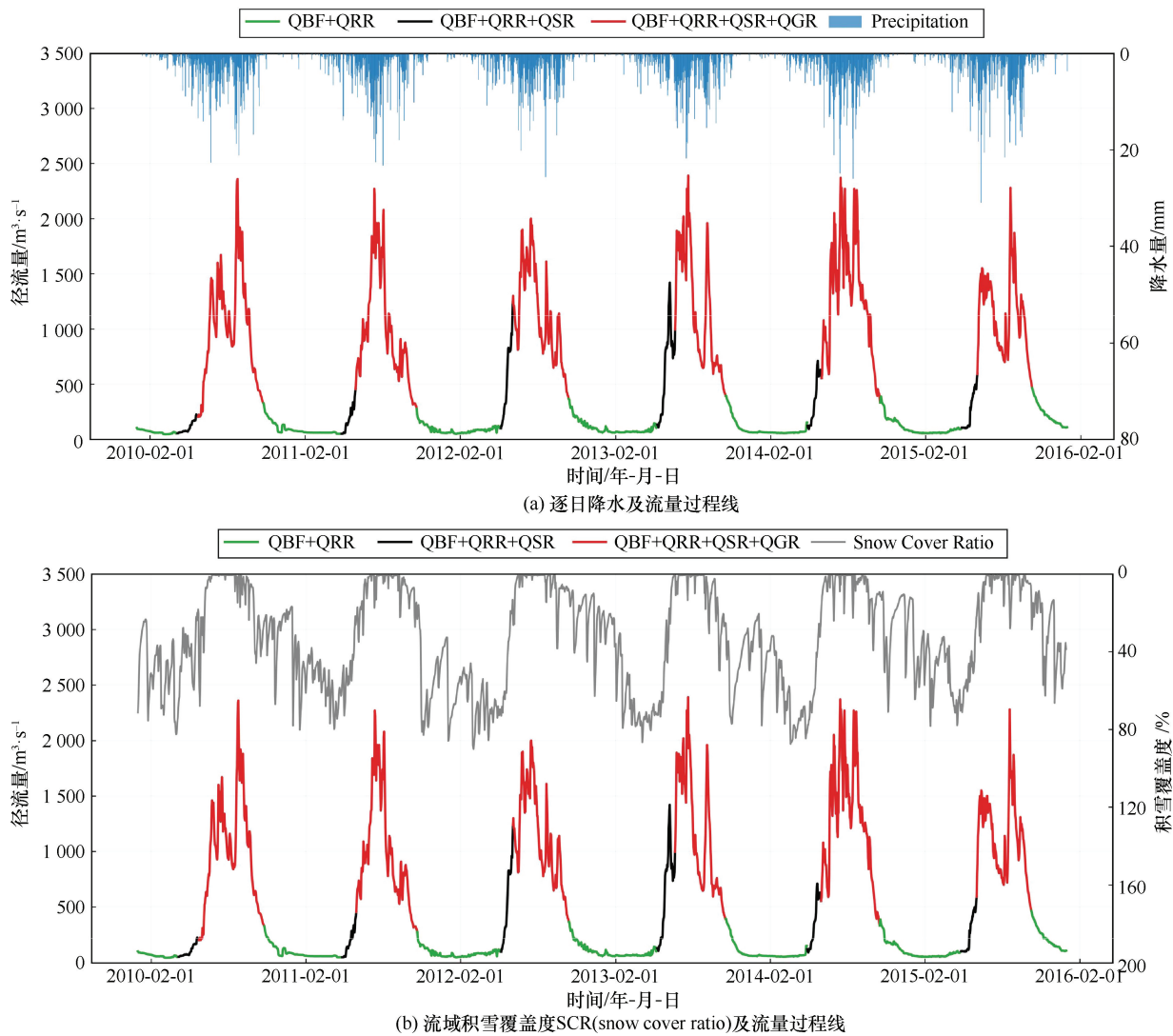
$$N_{ave} = \frac{N + N_l}{2} \quad (11)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,j} - Q_{o,j})}{\sum_{i=1}^n Q_{o,j}} \times 100\% \quad (12)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{j=1}^n (Q_{o,j} - \overline{Q_o})(Q_{s,j} - \overline{Q_s})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (Q_{o,j} - \overline{Q_o})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (Q_{s,j} - \overline{Q_s})^2}} \right]^2 \quad (13)$$

式中, E 为均方根误差; $Q_{o,j}$ 为第 j 时段实测径流 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); $Q_{s,j}$ 为第 j 时段模拟径流 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); $\overline{Q_o}$ 为实测径流均值 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); $\overline{Q_s}$ 为模拟径流均值 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); n 为模拟时段总数。

采用纳什效率系数 (NSE)、均方根误差 ($RMSE$) [见式(8)]、百分比偏差 ($PBIAS$) [见式(12)] 和决定性系数 (R^2) [见式(13)] 对模拟效果进行评价。如



QBF 为基流; QRR 为降雨径流; QSR 为融雪径流; QGR 为冰川融水径流

图 4 2010—2015 年更张站 HPC 径流组分划分结果

Fig. 4 HPC runoff component division results at Gengzhang hydrological station (2010—2015)

图 5(a) 所示, 整体上改进后的模型率定期 (2011—2013 年) NSE 为 0.88, $RMSE$ 为 $191.01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 验证期 (2014—2015 年) NSE 为 0.91, $RMSE$ 为 $180.41 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 模型模拟的各径流组分及占比如图 5(b) 所示, 其中融雪径流占比较高 (18.1%), 对流域径流模拟影响较大。进一步分析融雪期日径流模拟结果 (见图 6), 结果显示, 改进后的模型模拟性能有效提升 (见表 2): 在率定期与验证期中, 融雪期的 NSE 由原模型 0.74 提高到 0.80, 提升约 8%; $RMSE$ 由 $164.22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 下降至 $147.96 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 下降约 17%; 整体偏差由 -14.77% 改善至 -0.05%, 绝对值下降 14.72%; R^2 由 0.9 提升至 0.92 [见图 6(a) 和图 6(b)], 反映出模型对融雪期径流总量的模拟能力明显增强。典型场次融雪径流模拟可以看出改进后

的模型对峰值模拟的更为准确 [见图 6(c)(d)], 验证了本文改进的融雪模块的有效性。

表 2 融雪期模型性能指标改进对比

Table 2 Comparison of improvement in model performance indicators during snowmelt period

评估指标	原模型结果	改进后模型结果
NSE	0.74	0.80
$RMSE/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	164.22	147.96
$PBIAS/\%$	-14.77	-0.05
R^2	0.90	0.92

3.2 融雪径流与气象因子关系分析

基于改进模型模拟的 2010—2015 年融雪径流数据, 选取降水、太阳辐射、气温、风速这四个关键气象因子进行深入的分析。

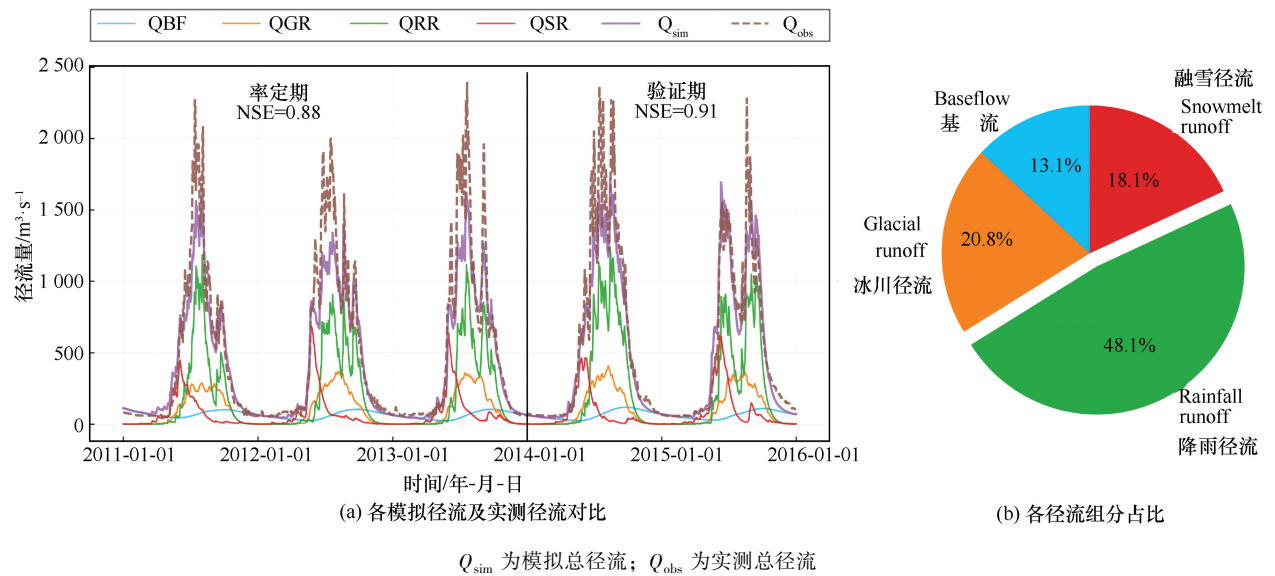


图 5 2011—2015 年模型模拟各径流组分及实测对比

Fig. 5 Comparison of model-simulated runoff components and observed values (2011—2015)

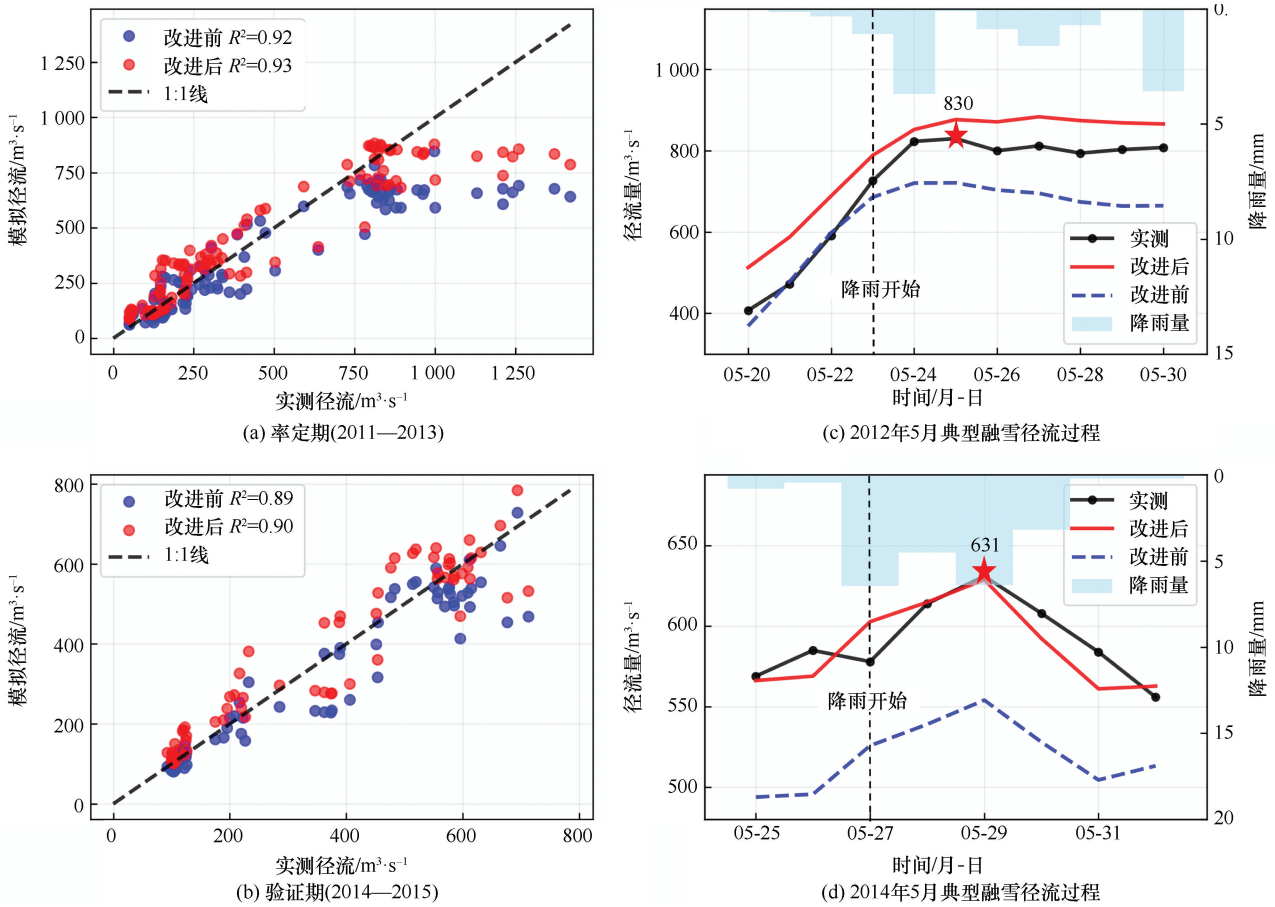


图 6 模型改进前后融雪期径流模拟效果对比

Fig. 6 Comparison of runoff simulation performance before and after model improvement during snowmelt period

3.2.1 时滞效应分析

时滞分析揭示了气象因子与融雪径流之间的动态响应特征。如图 7(a) 所示, 气温、太阳辐射和风速

对径流的影响均在 5 d 后达到最大, 反映了从积雪消融到产汇流的完整过程需要一定时间。相比之下, 降水对径流的响应更快, 时滞仅为 2 d, 这与其通过地

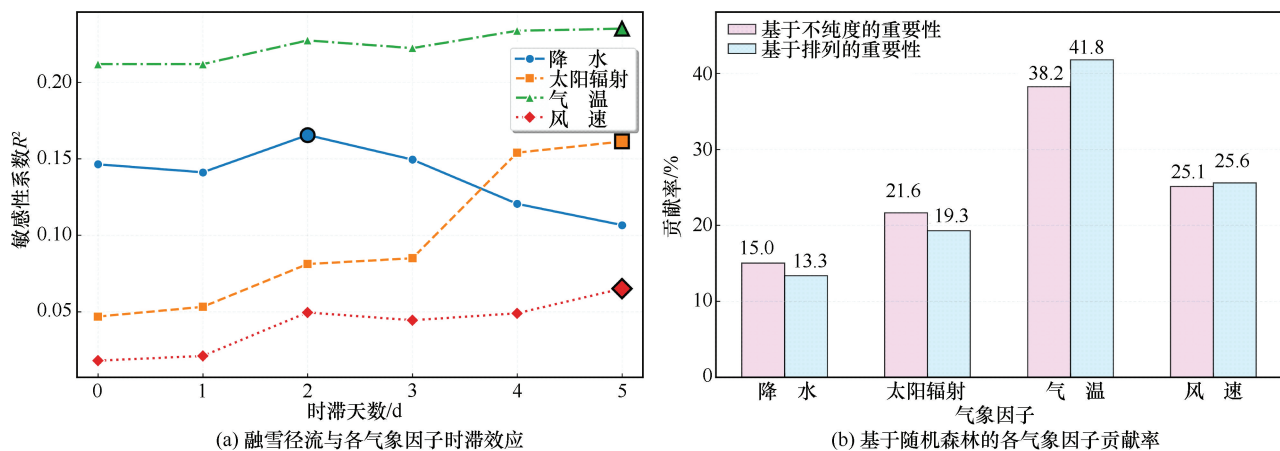


图7 融雪径流与气象因子关系分析

Fig. 7 Analysis of relationship between snowmelt runoff and meteorological factors

表径流和快速壤中流路径形成径流的特征相符。这一时滞效应表明, 气象因子的驱动作用需通过时间尺度的累积效应逐步显现, 为后续相关性分析提供了时间维度的参考。

3.2.2 相关性分析

基于时滞效应的分析结果, 进一步进行相关性分析以量化各气象因子与融雪径流的线性关系。结果表明, 首先气温与融雪径流的相关性最强($r = 0.465$, 中等相关), 其次是太阳辐射($r = 0.310$, 中等相关), 再次是降水($r = 0.263$, 弱相关)和风速($r = 0.202$, 弱相关)。这一排序符合融雪主导流域的基本物理认知: 温度是启动融雪过程的关键控制因子, 辐射是能量的主要来源。敏感性分析进一步确认气温是对径流变化最敏感的因子(敏感性指数为 0.235)。

3.2.3 贡献率量化分析

基于时滞效应和相关性分析结果, 采用随机森林模型量化各气象因子的贡献率。贡献率分析结果显示, 基于 2010—2015 年日数据构建的模型拟合优度较高($R^2 = 0.913$), 表明模型能够准确地捕捉融雪径流变化的驱动机制, 其输出的贡献率结果具有较高的可信度。各气象因子对融雪径流变化的具体贡献率如图 7(b)所示, 依次为: 气温 41.79%、风速 25.58%、太阳辐射 19.29%、降水 13.34%。结果突显了气温在融雪过程中的重要作用, 其贡献率与前述相关性和敏感性分析结论一致。能量因子(气温、太阳辐射)的总贡献率高达 61.08%, 而作为物质输入的降水贡献率仅为 13.34%, 表明在融雪径流模拟中准确刻画能量平衡过程的重要性, 也从机理层面验证了本研究改进 SPHY 模型能量计算模块的科学基础。

此外, 研究流域 2010—2015 年 Mann-Kendall 趋

势检验结果显示, 融雪径流呈现显著上升趋势($Z = 2.01$, $p = 0.045$), 而气温($Z = -2.57$, $p = 0.010$)和太阳辐射($Z = -4.65$, $p < 0.001$)均表现出显著下降趋势; 与此同时, 风速显著增强($Z = 11.51$, $p < 0.001$), 降水量虽略有增加但未通过显著性检验($p = 0.622$), 反映出多因子耦合驱动的复杂响应。

4 讨论

本研究将静态度日因子模型改进为考虑辐射与季节性的动态模型, 有效提升了 SPHY 模型在尼洋河流域的融雪径流模拟精度。原模型因忽略辐射作用, 在晴朗或雪面反照率较低时期系统存在低估融雪能量的问题。改进模型增强了物理合理性与时序一致性, 其与原模型在研究流域的结果相比精度有所提升, 表明考虑辐射的季节性动态日因子方法在青藏高原流域具有良好的适用性和可靠性。该方法本质上是在温度指数法中引入辐射效应的季节动态, 属于介于传统温度指数法与完整能量平衡法之间的半物理模型。与近年来发展的其他改进模型相比, 如耦合机器学习的融雪模型或考虑湍流热交换的详细能量平衡模型, 该模型在保持较低参数需求与计算复杂度的同时, 增强了物理过程的代表性, 尤其适用于资料相对稀缺的高寒流域。然而, 与完全的能量平衡模型相比, 改进模型仍对湍流交换过程做了较大简化, 未显式模拟感热与潜热通量的动态变化。

研究流域 2010—2015 年驱动因子贡献分析表明, 除了能量因子, 风速作用也非常显著(贡献率 25.58%)。Mann-Kendall 趋势检验结果显示, 融雪径流呈现上升趋势, 而气温和太阳辐射均表现出下降趋势, 同时, 风速显著增强。这一“能量输入减少而

径流反升”的现象,反映出融雪径流对气候变化的多因子耦合驱动复杂响应。进一步结合风速作为仅次于气温的关键驱动因子的分析结果,提出一种合理解释:研究区域地处高原东南缘、受复杂地形与局地环流影响,显著上升的风速可能通过增强积雪表面的湍流热交换(包括感热和潜热通量),有效补偿了气温与辐射下降导致的能量亏损,从而促进了融雪量增加。湍流热通量(感热与潜热通量)是地表与大气能量交换的关键组分。根据空气动力学理论,风速是驱动湍流交换的核心变量。本研究中观测到的风速显著增强,可通过促进感热与潜热向雪面的输送。在气温高于冰点时,增强的感热直接促进融雪;在低湿条件下,增强的潜热通量可能通过升华或特定条件下的凝结潜热释放,间接加剧融雪。风速驱动的湍流热通量放大效应,很可能补偿了辐射与气温下降导致的能量亏损,成为驱动融雪径流增加的关键物理过程。这一机制解释与 QI 等^[28]在青藏高原东部和南部流域关于湍流通量在融雪变率中关键作用的研究一致。HOELZLE 等^[29]的研究也表明,湍流热通量在表面能量平衡中占有重要比重,感热与潜热通量的贡献率合计可达 20%~35%甚至更高。结合其他青藏高原感热通量相关研究,王慧等^[30]指出高原地面风速对地表感热具有重要贡献,在夏季甚至是趋势变化的主因;李宏毅等^[31]的观测表明高原站点感热与风速存在显著正相关。这些研究共同说明了风速通过调控感热通量,影响高原地区能量收支与相变过程。本研究表明,在寒区水文气候研究中,除温度与降水外,风速等气候因子也可能在某些时段对径流变化起到重要驱动作用。

本研究结果基于尼洋河流域 2010—2015 年数据,模型在其他流域的有效性还有待进一步验证。此外,尽管本文改进的模型精度有明显提升,但仍存在一定的低估问题,可能因为 SPHY 模型模拟雪存储不够,未来应进一步加强研究,将模型应用于更长时段及更多流域,模型中引入其他因子的影响(如风速、地形与高程因子的空间异质性),以及分区域、分季节的驱动因子量化分析,以进一步提升模型的模拟精度。

5 结 论

本文通过耦合辐射因素与季节性动态度日因子,改进了 SPHY 模型的融雪模块。改进后模型在尼洋河流域融雪期的 *NSE* 提升 8%,*RMSE* 降低 17%,*PBIAS* 由-14.77%优化至-0.05%,有效提升了寒区流域径流模拟性能。驱动机制分析表明,气温是融雪径流变化

的核心驱动因子(贡献率 41.79%),而风速的作用也较为显著(贡献率 25.58%)。能量因子(气温、太阳辐射)的总贡献率达 61.08%,表明了寒区融雪径流模拟中准确刻画能量平衡过程的重要性。在未来气候变化影响评估等研究中,除关注温度、降水等变化外,还需重视风速等气候因子的潜在主导作用。

参考文献(References):

[1] LI G H, LI Z X, ZHANG B Q, et al. Changes in runoff from major alpine watersheds on the Qinghai-Tibetan Plateau: A review [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2025, 60: 102514.

[2] WANG Y B, XIE X H, SHI J C, et al. Ensemble runoff modeling driven by multi-source precipitation products over the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(32): 4169-4186.

[3] MYERS D T, FICKLIN D L, ROBESON S M. Incorporating rain-on-snow into the SWAT model results in more accurate simulations of hydrologic extremes[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126972.

[4] 刘金平,任艳群,张万昌,等. 雅鲁藏布江流域气候和下垫面变化对径流的影响研究[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(1): 275-287.

LIU J P, REN Y Q, ZHANG W C, et al. Study on the influence of climate and underlying surface change on runoff in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(1): 275-287.

[5] 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 Y J, YU D Y, ZHOU Z Y. 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.

[6] TIAN L, WANG W J, MA X G, et al. Refining snow-streamflow dynamics in a Tibetan Plateau basin by incorporating snow depth and topography[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 657: 133057.

[7] NUNCHHANI V, CHIPHANG N, BANDYOPADHYAY A, et al. Development of a Spatially Distributed Snow and Glacier Melt Runoff Model (SDSGRM) for data scarce high-altitude river basins [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2024, 175: 106004.

[8] 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 C G, XU Z X, ZUO D P, 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.

[9] 李洪源,赵求东,吴锦奎,等. 疏勒河上游径流组分及其变化特征定量模拟[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(4): 907-917.

LI H Y, ZHAO Q D, WU J K, et al. Quantitative simulation of the runoff components and its variation characteristics in the upstream of the Shule River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4): 907-917.

[10] 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 Y L, ZHOU Z H, LIU J J, 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.
- [11] JU Q, LIU X N, ZHANG D W, et al. Application of distributed Xin'anjiang model of melting ice and snow in Bahe River Basin[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 51: 101638.
- [12] DEBELE B, SRINIVASAN R, GOSAIN A K. Comparison of process-based and temperature-index snowmelt modeling in SWAT[J]. Water Resources Management, 2010, 24(6): 1065-1088.
- [13] MOHAMMADI B, GAO H K, PILESJÖ P, et al. Integrating machine learning with process-based glacio-hydrological model for improving the performance of runoff simulation in cold regions[J]. Journal of Hydrology, 2025, 656: 132963.
- [14] BOUAMRI H, BOUDHAR A, GASCOIN S, et al. Performance of temperature and radiation index models for point-scale snow water equivalent (SWE) simulations in the Moroccan High Atlas Mountains [J]. Hydrological Sciences Journal, 2018, 63(12): 1844-1862.
- [15] ZHAO H L, LI H Y, XUAN Y Q, et al. Improvement of the SWAT model for snowmelt runoff simulation in seasonal snowmelt area using remote sensing data[J]. Remote Sensing, 2022, 14(22): 5823.
- [16] 刘江涛, 徐宗学, 赵焕, 等. 基于改进降水输入模块的融雪径流模拟: 以拉萨河为例[J]. 水利学报, 2018, 49(11): 1396-1408.
- LIU J T, XU Z X, ZHAO H, et al. Simulation of snowmelt runoff processes based on enhanced precipitation input module: Case studies in the Lhasa River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(11): 1396-1408.
- [17] 穆艾塔尔·赛地, 丁建丽, 崔春亮. 基于地形因子改进融雪径流的模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 179-186.
- MUATTAR · Saydi, DING Jianli, CUI Chunliang. Simulation and verification of improved snowmelt runoff based on topographic factors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(19): 179-186.
- [18] 达瓦次仁, 巴桑赤烈, 白玛, 等. 尼洋河流域水文特性分析[J]. 水文, 2008, 28(4): 92-94.
- DAWA Ciren, BASANG Chile, BAIMA, et al. Analysis of hydrologic characteristics in the Niyang River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(4): 92-94.
- [19] ZHANG M F, REN Q S, WEI X H, et al. Climate change, glacier melting and streamflow in the Niyang River Basin, Southeast Tibet, China[J]. Ecohydrology, 2011, 4(2): 288-298.
- [20] 苏立彬, 郭永刚, 吴悦, 等. 基于DEM的尼洋河流域地貌形态分析[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(3): 12-21.
- SU L B, GUO Y G, WU Y, et al. Analysis of geomorphology of Niyang River Basin based on digital elevation model[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(3): 12-21.
- [21] 牛振国, 单玉秀, 张海英. 全球土地覆盖 GlobCover2009 数据中的中国区域湿地数据精度评价[J]. 湿地科学, 2012, 10(4): 389-395.
- NIU Z G, SHAN Y X, ZHANG H Y. Accuracy assessment of wetland categories from the GlobCover2009 data over China [J]. Wetland Science, 2012, 10(4): 389-395.
- [22] PFEFFER W T, ARENDT A A, BLISS A, et al. The Randolph Glacier Inventory: A globally complete inventory of glaciers [J]. Journal of Glaciology, 2014, 60(221): 537-552.
- [23] HE J, YANG K, TANG W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 2020, 7: 25.
- [24] HAO X H, HUANG G H, ZHENG Z J, et al. Development and validation of a new MODIS snow-cover-extent product over China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022, 26(8): 1937-1952.
- [25] DAI L Y, CHE T, DING Y J, 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.
- [26] 张正, 肖鹏峰, 张学良, 等. 青藏高原融雪期积雪反照率特性分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1146-1154.
- ZHANG Z, XIAO P F, ZHANG X L, et al. Analysis of the characteristics of snow albedo during the snowmelt period of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(6): 1146-1154.
- [27] HE Z H, VOROGUSHYN S, UNGER-SHAYESTEH K, et al. The value of hydrograph partitioning curves for calibrating hydrological models in glacierized basins [J]. Water Resources Research, 2018, 54(3): 2336-2361.
- [28] QI W, FENG L, KUANG X X, et al. Divergent and changing importance of glaciers and snow as natural water reservoirs in the eastern and southern Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022, 127(7): e2021JD035888.
- [29] HOELZLE M, HAUCK C, MATHYS T, et al. Long-term energy balance measurements at three different mountain permafrost sites in the Swiss Alps[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(4): 1531-1547.
- [30] 王慧, 张璐, 石兴东, 等. 青藏高原中东部地表感热趋势转折特征的季节差异[J]. 大气科学, 2022, 46(1): 133-150.
- WANG H, ZHANG L, SHI X D, et al. Seasonal differences in the trend turning characteristics of surface sensible heat over the central and eastern Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(1): 133-150.
- [31] 李宏毅, 肖子牛. 青藏高原不同地区湍流输送特征及其与气象因子的关系[J]. 气候与环境研究, 2022, 27(4): 533-546.
- LI H Y, XIAO Z N. Characteristics of turbulent transport in different areas of Qinghai-Tibet Plateau and its relationship with meteorological factors[J]. Climatic and Environmental Research, 2022, 27(4): 533-546.

(责任编辑 王海锋)