

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.001

考虑融雪和降雨径流过程的网格化模拟方法及应用

王一帆¹,王宇昊^{2,3,4},张珂^{2,3,4,5,6},罗煜宁^{2,3,4},李顺章^{2,3,4},吴南^{2,3,4},
沈龙¹,马仪¹

(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. 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: 针对目前考虑融雪的概念性水文模型大多为集总式水文模型这一问题,以网格新安江模型为基础,通过耦合融雪模块构建了考虑融雪和降雨径流过程的网格新安江模型(iRainSnowHydro模型),以金沙江上游梨园流域和澜沧江上游乌弄龙流域为典型流域进行日径流模拟,并与集总式融雪径流模型(Hydromad模型)进行对比分析。结果表明:iRainSnowHydro模型在梨园和乌弄龙流域的日径流模拟效果均良好,率定期和验证期的决定系数和纳什效率系数均超过了0.85,百分比偏差绝对值均小于10%;iRainSnowHydro模型的模拟性能优于Hydromad模型,且其分布式结构具有显著优势。

关键词: 融雪径流; 网格新安江模型; 径流模拟; 高寒山区

Gridded simulation method considering snowmelt and rainfall-runoff processes and its application

Wang Yifan¹, Wang Yuhao^{2,3,4}, Zhang Ke^{2,3,4,5,6}, Luo Yuning^{2,3,4}, Li Shunzhang^{2,3,4}, Wu Nan^{2,3,4}, Shen Long¹, Ma Yi¹

(1. Yunnan Power Grid Co., Ltd.; 2. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;
3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development;
5. Hydro-Meteorology Key Laboratory of China Meteorological Administration;
6. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources)

Abstract: To address the issue that most conceptual hydrological models considering snowmelt are lumped models, a gridded Xin'anjiang model considering snowmelt and rainfall-runoff processes (iRainSnowHydro model) was constructed based on the gridded Xin'anjiang model by coupling a snowmelt module. Daily runoff simulations were conducted taking the Liyuan basin in the upper reaches of the Jinsha River and the Wunonglong basin in the upper reaches of the Lancang River as typical basins, and the results were compared with those of a lumped snowmelt runoff model (Hydromad model). The results indicate that the iRainSnowHydro model exhibits good daily runoff simulation performance in both the Liyuan and Wunonglong basins, with R^2 and NSE exceeding 0.85 and the absolute value of PBIAS being less than 10% in the calibration and validation periods. The simulation performance of the iRainSnowHydro model is superior to that of the Hydromad model, and its distributed structure has significant advantages.

Key words: snowmelt runoff; gridded Xin'anjiang model; runoff simulation; alpine region

高寒山区的融雪径流是下游地区的重要水源,尤其在春夏两季。在全球气候变化的背景下,高寒山区的融雪过程变得更加复杂,直接影响了流域内的水文过程。在考虑融雪径流的基础上对高寒山区的径流进行准确模拟与预测,可以为水资源管理与配置,生态保护与修复、旱涝灾害防治提供重要依据^[1]。目前,许多学者将不同的水文模型应用于高寒山区的径流模拟与预报,主要包括概念性模型、基于物理机制的水文模型、数据驱动模型^[2]。相比于后两者,概念性水文模型通常基于度日因子概念建立融雪与气温间的关系,具有结构简单、数据需求低等特点,因此得到了广泛应用^[3-4],例如:张海川等^[5]分别运用 HBV 模型和 SRM 模型对新疆玛纳斯河流域的径流进行了模拟;田富强等^[6]以雅鲁藏布江为研究区,采用 THREW 模型进行了径

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项目(2024-SF-A1);山东省水文中心科研项目(37000000025001720250235)

作者简介: 王一帆(1994—),男,高级工程师,博士,主要从事新能源预测管理技术研究。E-mail:wangyifan@yn.csg.cn

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:yuhao wang@hhu.edu.cn

流模拟并解析了径流水源组成。基于物理机制的水文模型通常基于能量平衡模拟融雪过程,典型代表有 SWAT 模型^[7-8],VIC 模型^[9-10]等,但这类模型建模所需资料较多且过程复杂^[11]。近年来,伴随着计算机技术的发展,人工神经网络^[12]、长短期记忆网络模型^[13]、支持向量机模型^[14]等数据驱动模型被用于提高径流模拟与预测的准确性,然而数据驱动模型对建模过程描述不足,且模型效果与提供的数据量密切相关,在资料短缺地区的局限性较大^[15-16]。目前,考虑融雪的概念性水文模型大多为集总式模型,无法反映流域融雪-产流-汇流过程的空间异质性。

新安江模型是在中国南方应用最广泛的概念性水文模型之一^[17],基于该模型开发的全分布式水文模型——网格新安江模型的结构已在多个湿润和半湿润流域得到了验证^[18-19]。因此,本文在网格新安江模型的基础上,通过耦合融雪模块构建了考虑融雪和降雨径流过程的网格新安江模型(iRainSnowHydro 模型),并以金沙江上游梨园流域和澜沧江上游乌弄龙流域为典型流域进行日径流模拟,与集总式融雪径流模型(Hydromad 模型)的模拟结果进行对比分析。

1 研究方法

1.1 iRainSnowHydro 模型

iRainSnowHydro 模型将 SNOW-17 模型和网格新安江模型进行耦合:①根据气温计算降水形式为降雪的概率,将降水划分为降雨和降雪;②基于气温和降雪量模拟雪层中的物理过程,包括雪层积累、雪-气交界面的能量传输、雪层内部状态、液态水在雪层中的传输、土壤-积雪交界面处的热交换等,得到雪层的融雪液态水出流量;③将经过植被冠层截留后的降雨量和融雪液态水出流量合计为网格新安江模型的输入,进行 3 层蒸散发计算、产流与分水源计算、汇流计算,输出流量过程线。

a. 降水形式判别。根据气温以概率方式判别是否会发生降雪比单一的气温阈值法更符合实际。当气温低于阈值时,降雪的概率为 1,当气温逐渐升高时,降雪的概率呈指数形式减小:

$$p_s = \begin{cases} 1 & T_f < 28^\circ\text{F} \\ e^{-\left(\frac{T_f - 3.5}{8}\right)^5} & T_f \geq 28^\circ\text{F} \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_s 为降雪的概率; T_f 为气温。

b. 雪层积累。新雪的密度随气温的变化而变化,气温越低新降雪的概率越小。SNOW-17 模型中用放大系数调整未添加到现雪层中的新雪,主要用来弥补降雪观测、升华以及风吹雪导致的损失:

$$P_n = P p_s S_c \quad (2)$$

式中: P_n 为新降雪水当量; P 为降水量; S_c 为放大系数,用于调整雪量损失。

c. 雪-气交界面的能量传输。SNOW-17 模型对积雪表层能量的交换按照是否融化来考虑,若积雪表层融化,则还需细分为是否有降雨发生的情况,利用能量平衡原理计算积雪表层的能量传输过程,基本原理详见文献[20-21]。

d. 雪层内部状态。当积雪不能保持融雪水时,融雪水将会渗透形成径流;此时,液态水持水能力表示为:

$$W_{qx} = P_L W_i \quad (3)$$

式中: W_{qx} 为液态水容量; P_L 为液态水持水量; W_i 为积雪水当量。根据一系列经验推导的成熟方程^[22],对超出持水能力的融雪液态水进行滞后和衰减模拟相应的出流量 R_{snow} 。

e. 植被冠层截留计算。在一场降雨中,时段内植被冠层截留量 I_{ca} 的计算公式参见文献[23]。

f. 土壤蒸散发计算。模型采用 3 层蒸散发模型考虑土壤湿度垂向分布作用^[24]。当上层张力水蓄量 (W_U) 足够时,上层蒸散发 E_U 为:

$$E_U = K E_p - I_{ca} \quad (4)$$

式中: K 为蒸散发折算系数; E_p 为实测水面蒸发。当 W_U 小于蒸散发能力且下层张力水蓄量 (W_L) 足够时,下层蒸散发 E_L 为:

$$E_L = (K E_p - I_{ca} - E_U) \frac{W_L}{W_{LM}} \quad (5)$$

式中: W_{LM} 为下层张力水容量。当 W_L 不足时,深层蒸散发 E_D 为:

$$E_D = C(KE_p - I_{ca} - E_U) - E_L \tag{6}$$

式中: C 为深层蒸散发系数。时段总蒸散发量 E 为:

$$E = E_U + E_L + E_D \tag{7}$$

g. 基产流与分水源计算。基于融雪液态水出流计算及蒸散发计算,得到用于产流计算的净雨量 P_e :

$$P_e = R_{snow} + P(1 - p_s) - I_{ca} - E \tag{8}$$

模型采用蓄满产流机制,即时段产流量 R 可以表示为:

$$R = \begin{cases} 0 & P_e \leq 0 \text{ 或 } P_e + W \leq W_M \\ P_e + W - W_M & P_e + W > W_M \end{cases} \tag{9}$$

式中: W 为网格的张力水蓄量; W_M 为张力水蓄水容量,由网格的地形指数、土壤和植被属性确定。根据网格的自由水蓄水量(S)和自由水蓄水容量(S_M),将 R 划分为地面径流 R_s 、壤中流 R_i 以及地下径流 R_g ,具体公式参见文献[25]。

h. 汇流计算。模型采用网格-网格 Muskingum 汇流方法将各径流成分分别演算至流域出口,基本原理详见文献[26-27]。对于日径流模拟,模型采用线性水库法和滞后演算法计算流域的出流过程:

$$Q_{si,t} = R_{si,t} U \tag{10}$$

$$Q_{ii,t} = Q_{ii,t-1} C_i + R_{ii,t} (1 - C_i) U \tag{11}$$

$$Q_{gi,t} = Q_{gi,t-1} C_g + R_{gi,t} (1 - C_g) U \tag{12}$$

$$Q_{T,t+L_{ag}} = Q_{T,t+L_{ag}-1} C_{ch} + \left(\sum_{i=1}^k Q_{si,t} + \sum_{i=1}^k Q_{ii,t} + \sum_{i=1}^k Q_{gi,t} \right) (1 - C_{ch}) \tag{13}$$

式中: $R_{si,t}$ 、 $R_{ii,t}$ 、 $R_{gi,t}$ 分别为 t 时刻网格 i 产生的地面径流、壤中流和地下径流; $Q_{si,t}$ 、 $Q_{ii,t}$ 、 $Q_{gi,t}$ 分别为 t 时刻网格 i 的地面径流、壤中流和地下径流相对应的出流量,作为网格-网格 Muskingum 汇流方法的输入; U 为将径流深转化为流量的单位折算系数; C_i 、 C_g 、 C_{ch} 分别为壤中流,地下径流,河道径流的消退系数; L_{ag} 为河网汇流滞时; $Q_{T,t+L_{ag}}$ 为 $t+L_{ag}$ 时刻流域出口流量。

1.2 Hydromad 模型

本文基于 R 软件的 Hydromad 包实现流域湿度指数 (CWI) 产流模块、融雪模块和线性汇流模块的耦合,得到的 Hydromad 模型是集成降雨-径流和融雪-径流模块的集总式水文模型。模型的核心计算过程包括土壤水计算 (SMA) 模块和汇流模块。SMA 模块将降水 and 气温转换为有效降水量,即最终到达流域出口形成径流的那部分降水 (包含降雨和降雪)。汇流模块将有效降水转换为流量,这涉及定义洪峰响应时间和退水曲线的形状^[28]。Hydromad 模型结构如图 1 所示。

2 实例验证

2.1 研究区概况

金沙江为长江上游,横跨青海、西藏、四川、云南等 4 省 (区),控制面积约为 50.2 万 km^2 ,占长江流域总面积的 26%。澜沧江同样发源于唐古拉山脉,是国际河流澜沧江-湄公河的上游,流经青海、西藏、云南后出境,控制面积约为 16.7 万 km^2 。梨园流域位于金沙江上游,流域面积约为 21.4 万 km^2 ;乌弄龙流域位于澜沧江上游,流域面积约为 7.6 万 km^2 ;两个流域的地势均呈现西北高东南低的特点,高程落差超过 4 km^[29-30]。两个典型流域相邻,地理位置及高程分布如图 2 所示。

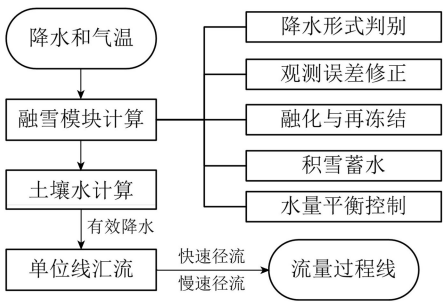


图 1 Hydromad 模型结构
Fig. 1 Hydromad model structure

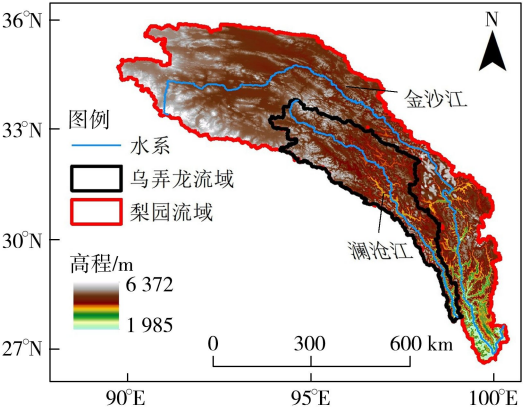


图 2 研究区域地理位置及高程分布
Fig. 2 Geographical location and elevation distribution of study area

2.2 数据来源

梨园流域和乌弄龙流域的数据来源如下:DEM 数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 1 km;土壤数据来自全球土壤数据集(<https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>),空间分辨率为 1 km;土地利用来自中国多时期土地利用遥感监测数据集(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km;气象数据(降水及气温)来自中国气象信息中心(<https://data.cma.cn/>),空间分辨率为 5 km;径流量数据来自梨园水电站和乌弄龙水电站的实测入库流量;雪深数据来自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。

2.3 模型参数率定及性能评价

本文采用 SCE-UA 算法对 iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型进行参数率定,并选取决定系数(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^[31-32]。

2.4 典型流域下垫面分析

梨园流域和乌弄龙流域的上层土壤(0~30 cm)和下层土壤(30~100 cm)类型如图 3 所示,土地利用类型如图 4 所示。梨园流域的上层土壤主要为砂壤土和壤土,其中壤土主要分布在流域下游;下层土壤主要为水域或无值区、黏壤土和壤土,其中黏壤土主要分布在流域下游,壤土主要分布在流域上游。乌弄龙流域的上层土壤同样以砂壤土和壤土为主,且壤土主要分布在流域中下游,下层土壤则以水域或无值区和黏壤土为主。梨园流域的土地利用类型主要为草地,其次是裸地和林地,其中裸地大多位于流域上游,林地大多位于流域下游。此外,水域主要集中在流域上游。乌弄龙流域的土地利用类型主要为草地,其次是林地和裸地。两个流域的耕地和城市用地占比之和均小于 1%,表明流域受人类活动影响较小。综上,两个流域的土壤和土地利用空间分布差异较大,采用分布式水文模型较集总式水文模型更加合理。

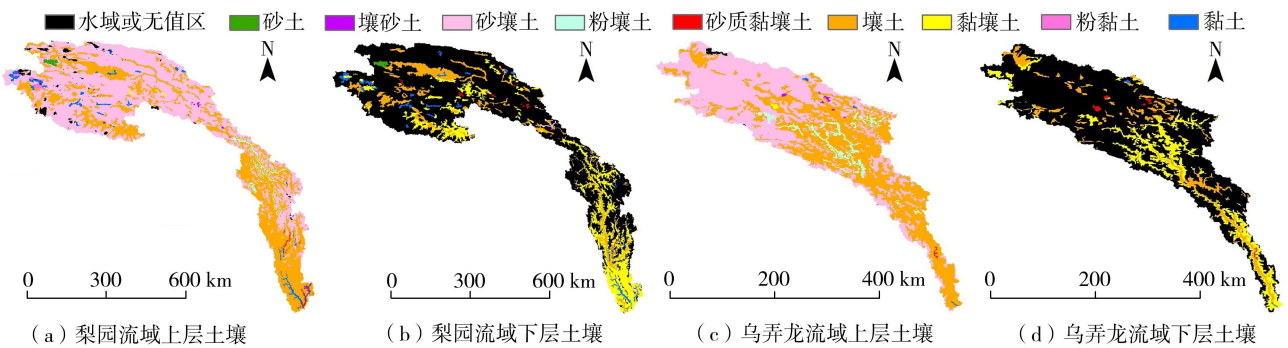


图 3 典型流域土壤空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil in typical basins

从中国雪深长时间序列数据集中获取梨园流域 2013 年 12 月 31 日、乌弄龙流域 2017 年 12 月 31 日的网格雪深数据作为初始雪深数据,如图 5 所示。梨园流域的积雪深度空间差异较大,流域中部地区较大,西北地区地区和东南地区较小;乌弄龙流域的积雪深度呈现两边大中间小的空间分布,空间差异较梨园流域偏小。

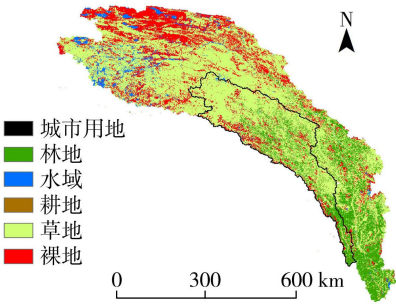


图 4 典型流域土地利用类型空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of land use types in typical basins

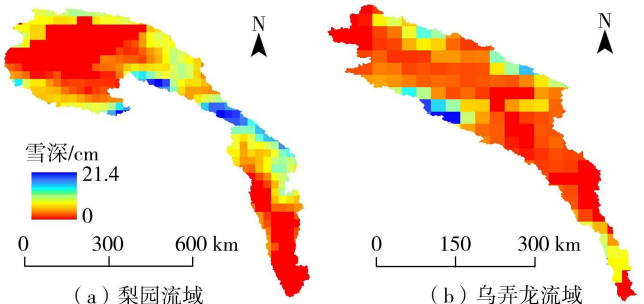


图 5 初始雪深数据

Fig. 5 Initial snow depth data

2.5 模拟效果评价与比较

对于梨园流域,基于 2014 年 1 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日的历史逐日降水和气温数据,分别采用 iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型对径流进行模拟。其中,两个模型均以 2014 年 1 月 1 日至 2015 年

4 月 30 日为预热期,2015 年 5 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日为率定期,2021 年 1 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日为验证期。对于乌弄龙流域,基于 2018 年 1 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日的历史逐日降水和气温数据,分别采用 iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型对径流进行模拟。其中,两个模型均以 2018 年 1 月 1 日至 2019 年 4 月 30 日为预热期,2019 年 5 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日为率定期,2022 年 1 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日为验证期。iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型对两个流域的模拟结果如图 6、表 1 所示。由图 6 和表 1 可知,iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型在梨园流域和乌弄龙流域均呈现了良好的模拟效果,无论是率定期还是验证期, R^2 和 NSE 均大于 0.8,PBIAS 的绝对值均小于 10%。此外,iRainSnowHydro 模型对两个流域日径流量的整体模拟效果均优于 Hydromad 模型,且在梨园流域的优越性更为显著。

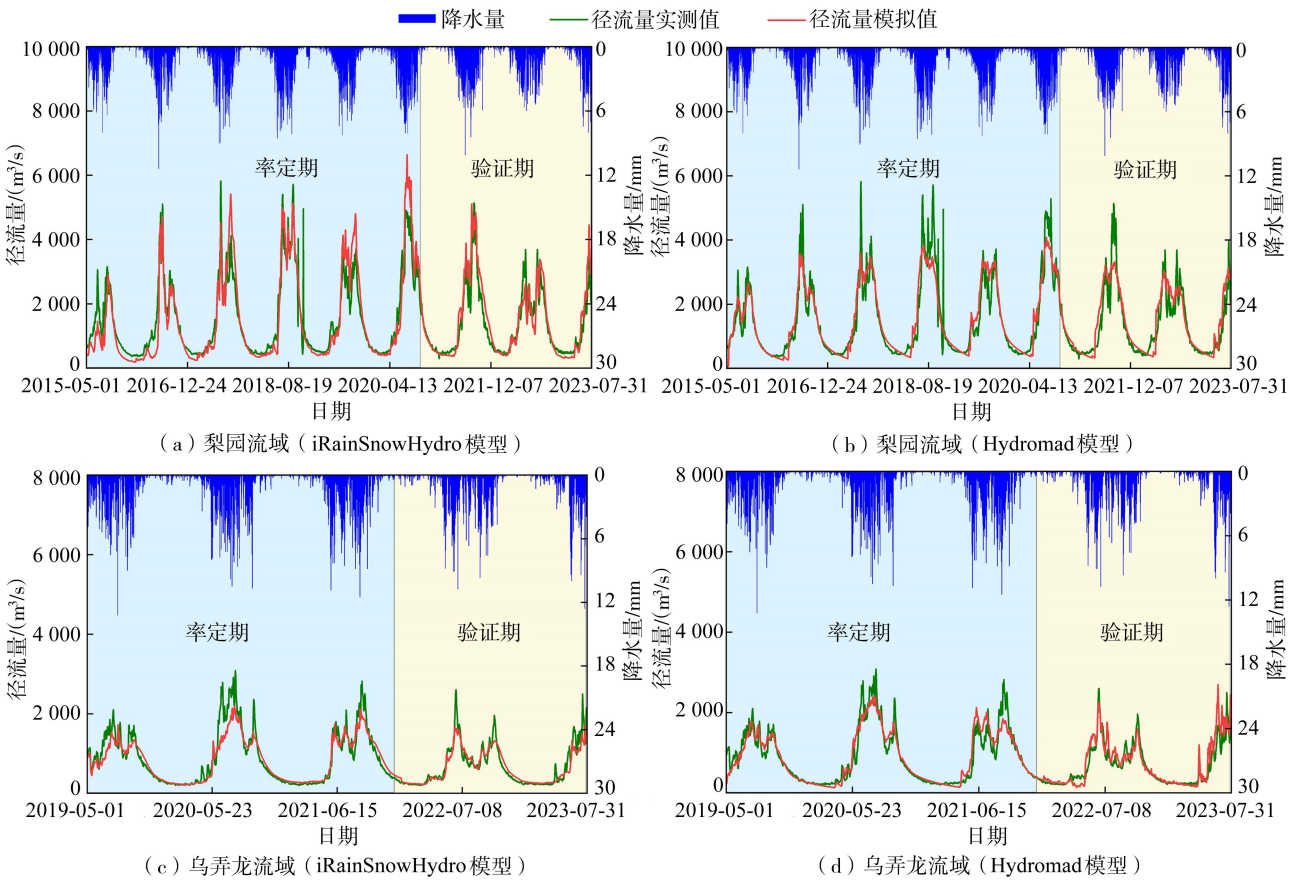


图 6 iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型梨园流域和乌弄龙流域的模拟结果

Fig. 6 Simulation results of iRainSnowHydro model and Hydromad model in Liyuan and Wunonglong basins

表 1 iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型的性能评价指标

Table 1 Performance evaluation indicators of iRainSnowHydro model and Hydromad model

流域	模型	率定期			验证期		
		R^2	NSE	PBIAS/%	R^2	NSE	PBIAS/%
梨园流域	iRainSnowHydro 模型	0.90	0.89	-1.80	0.89	0.85	3.81
	Hydromad 模型	0.88	0.88	-0.69	0.83	0.82	-4.56
乌弄龙流域	iRainSnowHydro 模型	0.90	0.88	-4.86	0.86	0.85	2.46
	Hydromad 模型	0.87	0.87	0.87	0.83	0.81	-5.79

以梨园流域为例,基于 iRainSnowHydro 模型得到 2017 年 3 月网格的融雪液态水出流量,如图 7 所示。2017 年 3 月的融雪液态水出流量呈现显著的空间异质性,流域中部地区较大,西北地区 and 东南地区较小,和雪深的分布规律基本一致。相比于 Hydromad 模型,iRainSnowHydro 模型可以呈现任意时刻雪深,融雪液态水出流量的空间分布。吴南等^[33]的研究表明,高山流域汛期的主导径流成分为降雨径流,非汛期则以河道基流与融雪径流为主。基于 iRainSnowHydro 模型对梨园流域不同季节径流组分的划分结果显示:春季融雪径流占比最高,多年平均占比达 27.04%;冬季融雪径流占比次之,但受冬季径流量偏小影响,其实际贡献可

基本忽略;秋季融雪径流多年平均占比为 5.55%,而夏季融雪径流占比均低于 2%。

3 结 语

iRainSnowHydro 模型在梨园流域和乌弄龙流域的日径流模拟效果均良好,率定期和验证期的 R^2 和 NSE 均超过了 0.85,PBIAS 绝对值均小于 10%。iRainSnowHydro 模型的模拟性能优于 Hydromad 模型,且其分布式的结构具有显著优势,可以为我国高寒山区地径流预报提供技术支撑。梨园流域春季融雪径流占比为四季中最大且相对稳定,多年平均占比为 27.04%,表明春季融雪径流的准确模拟和预测对于水资源管理和旱涝灾害防治尤为重要。

参考文献:

[1] 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))

[2] 郭帅帅. 寒区积雪融雪变化及其对径流影响模拟研究:以呼兰河流域为例[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2022.

[3] Zhao Hongling,Li Hongyan,Xuan Yunqing,et al. Investigating the critical influencing factors of snowmelt runoff and development of a mid-long term snowmelt runoff forecasting[J]. Journal of Geographical Sciences,2023,33(6):1313-1333.

[4] 余其鹰,胡彩虹,白云岗,等. 新疆洪水预报预警中融雪径流模型应用进展[J]. 干旱区地理,2023,46(12):1951-1962. (Yu Qiyang,Hu Caihong,Bai Yungang,et al. Application of snowmelt runoff model in flood forecasting and warning in Xinjiang[J]. Arid Land Geography,2023,46(12):1951-1962. (in Chinese))

[5] 张海川,尤洋,乔长录,等. HBV 模型在玛纳斯河流域的适用性[J]. 长江科学院院报,2023,40(12):37-44. (Zhang Haichuan,You Yang,Qiao Changlu,et al. Applicability of HBV model in the Manas River basin[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2023,40(12):37-44. (in Chinese))

[6] 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))

[7] 邢贞相,金超群,纪毅,等. 基于 SWAT 模型与 Copula 修正的融雪径流模拟[J]. 东北农业大学学报,2020,51(6):79-87. (Xing Zhenxiang,Jin Chaoqun,ji Yi,et al. Study on snowmelt runoff simulation based on SWAT model and Copula correction [J]. Journal of Northeast Agricultural University,2020,51(6):79-87. (in Chinese))

[8] Zhang Yixin,Liu Gengwei,Dai Changlei,et al. Simulation and prediction of snowmelt runoff in the Tangwang River Basin based on the NEX-GDDP-CMIP6 climate model[J]. Water,2024,16(15):2082.

[9] 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))

[10] Zhou Gang,Zhao Qiudong,Zhang Shiqiang,et al. Rolling forecast of snowmelt floods in data-scarce mountainous regions using weather forecast products to drive distributed energy balance hydrological model[J]. Journal of Hydrology,2024,637:131384.

[11] Wang Guoyu,Hao Xiaohua,Yao Xiaojun,et al. Simulations of snowmelt runoff in a high-altitude mountainous area based on big data and machine learning models:taking the Xiyang River basin as an example[J]. Remote Sensing,2023,15(4):1118.

[12] 李福威,孙凯昕,丁伟. 基于多模型融合的中期径流预报[J]. 中国农村水利水电,2023(2):9-15. (Li Fuwei,Sun Kaixin, Ding Wei. Medium-term runoff forecasting based on information fusion models[J]. China Rural Water and Hydropower,2023 (2):9-15. (in Chinese))

[13] 李晶,刘时银,张世强,等. 中国西北山区融雪径流模拟研究回顾与展望[J]. 冰川冻土,2022,44(3):1029-1040. (Li Jing, Liu Shiyin,Zhang Shiqiang,et al. Review on snowmelt runoff simulation in mountain regions, Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2022,44(3):1029-1040. (in Chinese))

[14] 闻昕,陈然,谭乔凤,等. 基于多因素相似性的融雪径流预报方法研究[J]. 水力发电学报,2022,41(3):46-59. (Wen Xin, Chen Ran,Tan Qiaofeng,et al. Study on forecasting method of snowmelt runoff based on multi-factor similarity[J]. Journal of

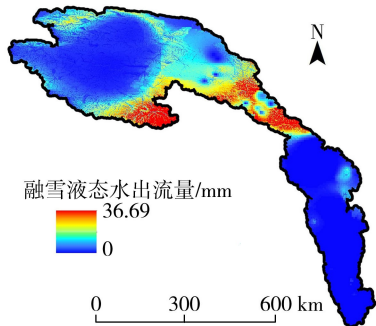


图7 2017年3月梨园流域网格融雪液态水出流量
Fig.7 Gridded snowmelt liquid water outflow in Liyuan Basin in March 2017

Hydroelectric Engineering,2022,41(3):46-59. (in Chinese))

[15] 王国宇. 基于机器学习的融雪径流模拟:以西营河流域为例[D]. 兰州:西北师范大学,2023.

[16] Pham L T,Luo Lifeng,Finely A. Evaluation of random forests for short-term daily streamflow forecasting in rainfall- and snowmelt-driven watersheds[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2021,25(6):2997-3015.

[17] 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))

[18] 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))

[19] 张珂,张企诺,陈新宇,等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护,2021,37(5):94-101. (Zhang Ke,Zhang Qينو,Chen Xinyu, et al. Gridded Xin' anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):94-101. (in Chinese))

[20] Wang Yuanheng, Gupta H V, Zeng Xubin, et al. Exploring the potential of long short-term memory networks for improving understanding of continental- and regional-scale snowpack dynamics [J]. Water Resources Research, 2022, 58(3): e2021WR031033.

[21] 师俞晨. 基于 MODIS 长时序数据分析青藏高原东部融雪速率变化[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.

[22] He M X,Hogue T S,Franz K J, et al. Corruption of parameter behavior and regionalization by model and forcing data errors: a Bayesian example using the SNOW17 model[J]. Water Resources Research,2011,47:W07546.

[23] 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))

[24] 韩文彪,姚成,李致家,等. 考虑水库泄水影响的逐网格汇流演算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):34-41. (Han Wenbiao,Yao Cheng,Li Zhijia, et al. Routing method of confluence considering the influence of reservoir drainage at grid scale[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(3):34-41. (in Chinese))

[25] 汪昊燃,王容,黄鹏年,等. 水文水力学结合的秦淮河流域洪水模拟与实时校正[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):25-30. (Wang Haoran,Wang Rong,Huang Pengnian, et al. Research on flood simulation and real-time correction of Qinhuai River Basin combined with hydrology and hydraulics[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):25-30. (in Chinese))

[26] 姚成,纪益秋,李致家,等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):42-47. (Yao Cheng, Ji Yiqiu, Li Zhijia, et al. Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2012,40(1):42-47. (in Chinese))

[27] Yao Cheng, Li Zhijia, Bao Hongjun, et al. Application of a developed grid-Xinanjiang model to Chinese watersheds for flood forecasting purpose[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2009,14(9):923-934.

[28] Andrews F T,Croke B F W,Jakeman A J. An open software environment for hydrological model assessment and development[J]. Environmental Modelling & Software,2011,26(10):1171-1185.

[29] 龙笛,韩忠颖,王一鸣. 变化环境下澜沧江-湄公河流域干旱趋势[J]. 水科学进展,2022,33(5):766-779. (Long Di, Han Zhongying, Wang Yiming. Projection of future droughts across the Lancang-Mekong River under a changing environment[J]. Advances in Water Science,2022,33(5):766-779. (in Chinese))

[30] 罗煜宁,张珂,吴南,等. 梨园水电站径流分析与模拟[J]. 云南电力技术,2023,51(3):7-12. (Luo Yuning,Zhang Ke,Wu Nan, et al. Runoff analysis and simulation of Liyuan hydropower station[J]. Yunnan Electric Power,2023,51(3):7-12. (in Chinese))

[31] 张金萍,王宇昊. 基于 SWAT 模型和降水随机模拟的径流预测[J]. 中国农村水利水电,2021(7):12-18. (Zhang Jinping, Wang Yuhao. Runoff prediction based on SWAT model and stochastic simulation of precipitation[J]. China Rural Water and Hydropower,2021(7):12-18. (in Chinese))

[32] 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))

[33] 吴南,张珂,管晓祥,等. 1979—2018 年雅砻江中上游积雪时空变化及影响因素分析[J]. 水资源保护,2022,38(5):151-158. (Wu Nan,Zhang Ke,Guan Xiaoxiang, et al. Spatiotemporal variations of snow cover and its influencing factors in upper-middle reaches of the Yalong River from 1979 to 2018[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):151-158. (in Chinese))