

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2026.01.009

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:余忠全,杨雪,王盼,杨晨,潘鑫.耦合不同融雪方法的黄河源区径流模拟与评估[J].西安理工大学学报,2026,42(1):93-100.

Yu Zhongquan, Yang Xue, Wang Pan, Yang Chen, Pan Xin. Simulation and evaluation of runoff in the Yellow River source region by coupling different snow melting methods[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2026, 42(1):93-100.

耦合不同融雪方法的黄河源区径流模拟与评估

余忠全¹, 杨雪², 王盼³, 杨晨², 潘鑫²

(1. 国家电投集团黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810001; 2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 黄河源区是黄河流域的重要产流区, 对其进行积雪融雪模拟很有必要且效果显著, 为丰富黄河水文预报系统的模型库, 促进高寒区水文模型研究, 本文将一个简单的 GR4J 模型与三种不同的融雪模拟方法耦合, 开展了唐乃亥水文站以上流域的日径流模拟研究。结果表明: ①GR4J 模型适用于黄河源区的水文模拟; ②积雪融雪模拟方法的加入能够有效提高黄河源区径流模拟的精度; ③WASMOD-GR4J 模型对黄河源区径流模拟的改进效果最明显, 而 CemaNeige-GR4J 模型对气候变化的响应最稳健。研究结果不仅为黄河流域的径流模拟提供了更简单的模型选择, 也为模型综合决策提供了重要支撑。

关键词: 积雪融雪模拟; 黄河源区; GR4J; 模拟与评估

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2026)01-0093-08

Simulation and evaluation of runoff in the Yellow River source region by coupling different snow melting methods

Yu Zhongquan¹, Yang Xue², Wang Pan³, Yang Chen², Pan Xin²

(1. Qinghai Upper Yellow River Hydropower Development Co., Ltd., Xining 810001, China;

2. Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: The Yellow River source region is an important runoff producing area in the Yellow River Basin, and it is necessary and effective on which to simulate snow melting. In order to enrich the model library of the Yellow River hydrological forecast system and promote hydrological model research in alpine areas, a simple GR4J model is coupled with three different snowmelt simulation methods here to simulate the daily runoff of the region above Tangnaihaid hydrological station. The results show that: ①The GR4J model is suitable for hydrological simulation in the source region of the Yellow River; ②The inclusion of snowmelt simulation method can effectively improve the accuracy of runoff simulation in the source region of the Yellow River; ③The WASMOD-GR4J model has the most significant improvement effect on runoff simulation in the Yellow River source region, while the CemaNeige-GR4J model has the most robust response to the climate change. The results not only provides a simpler model selection for runoff simulation

收稿日期: 2024-01-09; 网络首发日期: 2024-04-01

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.n.20240329.1717.010>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52209035); 陕西省教育厅重点科学研究计划资助项目(21JT032); 西安理工大学博士科研启动项目(256082016)

第一作者: 余忠全, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水电工程管理、水资源模拟与管理。E-mail: 282881279@qq.com

通信作者: 杨雪, 女, 博士, 讲师, 研究方向为水文预报。E-mail: xue.yang@xaut.edu.cn

in the Yellow River Basin, but also provides an important support for model comprehensive decision-making.

Key words: snow melting simulation; Yellow River source region; GR4J; simulation and evaluation

黄河源区是黄河流域的重要产流区,其年径流量占到总径流量的 38%,素有“黄河水塔”之称^[1-2]。黄河源区的径流模拟对黄河流域水资源管理及梯级水库群调度具有举足轻重的作用^[3-4]。水文模型是进行径流模拟的重要工具,也是构建黄河水文预报系统的核心基础^[4-5]。

黄河源区位于我国西北的高寒山区,山区地形及高寒气候下的融冰融雪形成了该地特有的水文循环。部分学者针对我国典型实验流域和高寒地区,分析了地形和融雪在水文模拟中的作用^[6-7]。例如,郝振纯等^[7]利用 SWAT 模型在黄河源区进行水文模拟,通过对子流域运用融雪模块,发现融雪对高寒地区的径流模拟至关重要;田明珠等^[8]采用 UEB 模型对黄河沿一达日区间进行融雪径流模拟,发现融雪对高寒地区的径流模拟有不可忽视的作用。因此,开展黄河源区的积雪融雪模拟研究具有重要意义。

高寒区水文模型的构建是黄河水文预报系统的短板,我国学者也在积极开展高寒区水文模型的研究与实践。例如,康尔泗等^[9]基于 HBV 模型构建了一个适用于西北干旱区内陆河的概念性水文模型,通过将黑河山区流域划分为高山冰雪冻土带和山区植被带,对莺落峡上游的月出山径流进行了模拟预报。目前,结合融雪模拟方法改进水文模型是开展高寒区水文模拟的重要方式。例如,关志成^[10]针对中国东北寒区的产汇流特点,通过引入气温因子实现了融雪过程模拟,并基于改进的新安江模型,实现了牡丹江上游季节性冻土流域的水文模拟;俞鑫颖等^[11]基于 DEM 数据与 GIS 技术改进了新安江模型,并利用不同网格的热量和水分状态计算产汇流,构建了分布式冰雪融水-雨水混合水文模型,该模型在乌鲁木齐河山区流域的应用效果良好。

模型是径流模拟的重要工具,模型的复杂程度会直接影响其应用效率。然而,现有模型大多较为复杂,需要输入的数据或模型参数较多,因此应用难度较大。而概念性水文模型(GR4J)结构简单、参数明确,在国际上得到了广泛应用,在国内的应用也在逐渐增加^[12-13](在黄河源区的应用未见报道),因此,本文拟采用 GR4J 模型开展高寒区水文模拟。

进行积雪融雪模拟是构建高寒区水文模型的核

心环节之一,但当前的积雪融雪模拟主要以单个模型的适用性验证为主,缺乏对比评估。为此,本文将 GR4J 模型与 3 种不同的融雪模拟方法分别耦合,对黄河源区唐乃亥水文站的日径流过程进行综合模拟评估。研究结果可为丰富和改进黄河水文预报系统的模拟模型提供重要支撑。

1 研究区域及数据来源

黄河源区是指黄河上游唐乃亥水文站以上区域,集水面积约 $1.2 \times 10^5 \text{ km}^2$,平均海拔约 4 300 m,属于典型的高原大陆性气候区,其流域示意及高程分布见图 1。根据 2000—2020 年观测资料,黄河源区年平均降雨量 44.5 mm,年内降雨分布极不均匀,其中 5~9 月的降雨量占全年降雨量的 83%;平均气温为 0.3℃,最低气温为 -13.3℃,最高气温为 12.7℃。流域地形地貌以山地、丘陵和盆地为主,土地覆盖以草地为主。

本研究的气象资料为黄河源区及其周边共 19 个气象站点的逐日降水及温度资料,数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);水文资料为唐乃亥水文站的逐日流量,数据来自黄河水利委员会编撰的《黄河流域水文年鉴》;研究的时间范围为 2000 年 1 月至 2020 年 10 月。

2 研究方法

2.1 GR4J 模型

GR4J 模型为集总式概念性水文模型,它使用两个非线性水库进行产流、汇流计算,仅包含 4 个模型参数,分别为产流水库容量(X_1)、地下水交换系数(X_2)、汇流水库容量(X_3)和单位线汇流时间(X_4)^[14]。本研究将基于 GR4J 模型模拟黄河源区的日径流过程,模拟结果记为 Q_{sim1} 。

2.2 积雪融雪径流模拟

黄河源区存在季节性积雪,而 GR4J 模型未考虑积雪融雪,为此,本研究将三种不同的积雪融雪径流模拟方法与 GR4J 模型耦合,以改进黄河源区的逐日径流模拟,并综合评估不同模型的改进效果。

本文积雪融雪径流模拟主要考虑三种模拟方法,即 CemaNeige 模型、HBV 模型和 WASMOD 模型中的积雪融雪模拟模块。HBV 模型采用的是度-

日方法,也称温度指标法,该方法认为超过一定温度阈值后就会发生融雪。CemaNeige 模型是一种改进的度-日方法,包含 θ_{G1} 和 θ_{G2} 两个参数。WASMOD 模型的原理与度-日方法不同,该方法认为积

雪与融雪在两个阈值温度之间服从指数变化,当气温高于 a_2 时开始融雪,当气温高于 a_1 时停止降雪^[15]。三种方法的表达式及参数说明见表 1,更多变量信息请参考文献原文。

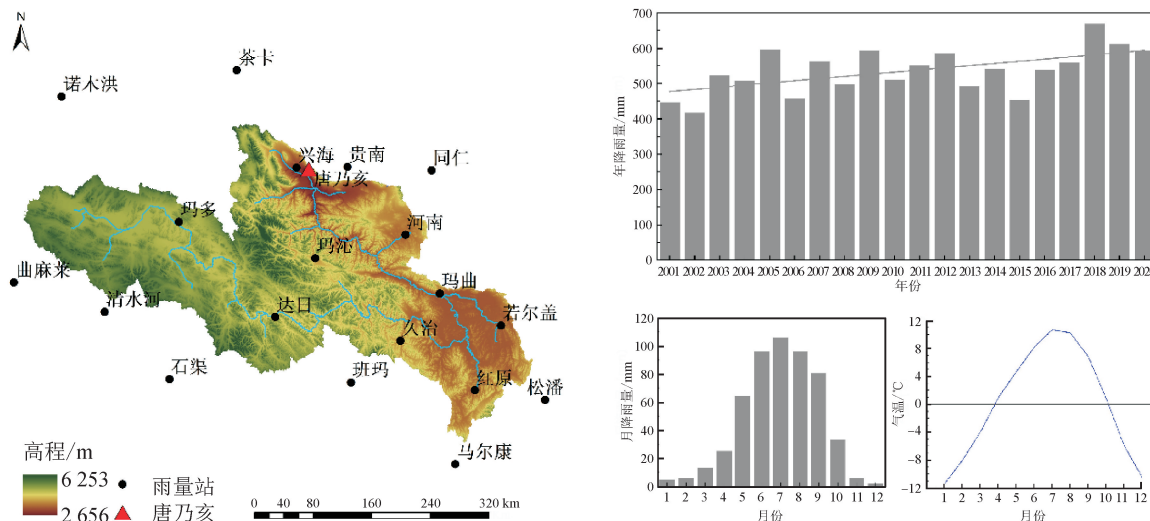


图 1 研究区域站点分布及气象信息

Fig.1 Distribution of observing stations in study area and the meteorological characteristics
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2020)4619 的标准地图制作,底图无修改。

表 1 积雪融雪径流模拟方法

Tab.1 Simulation method for snow melting runoff

方法	表达式	参数	模拟结果
CemaNeige	${}^e T_{Gr=T} = (1 - \theta_{G2}) \times T_{mean,t=T} + \theta_{G2} \times {}^e T_{Gr=T-1}$ $IF({}^e T_{Gr=T} = 0) \& T_{mean,t=T} > 0; PS_{m,t=T} = \theta_{G1} \times T_{mean,t=T}$ $S_{m,t=T} = \min\left(1, \frac{SP_{t=T-1} + S_{t=T}}{S_{pth}} \times PS_{m,t=T}\right)$	θ_{G1} :度-日系数,表征在温度高于 0°C 时的每日融雪量 ^[16] , $\theta_{G1} \in (0,10)$ 。 θ_{G2} :积雪热状态的权重系数,考虑了当日气温与前一日积雪热因素的影响, $\theta_{G2} \in (0,1)$ 。	Q_{sim2}
HBV	$M_{ELT} = C_{MELT} \cdot (T - T_T)$	T_T :融雪的阈值温度, $T_T \in (-1.5, 1.2)$ 。 C_{MELT} :度-日系数,表示温度超过阈值温度 1°C 时每天的融雪量 ^[17] , $C_{MELT} \in (1,8)$ 。	Q_{sim3}
WASMOD	$s_{n,t} = p_t \{1 - e^{-\frac{c_t - a_1}{a_1 - a_2}}\}^+$ $r_t = p_t - s_{n,t}$ $m_t = s_{p,t-1} \{1 - e^{-\frac{c_t - a_2}{a_1 - a_2}}\}^+$ $s_{p,t} = s_{p,t-1} + s_{n,t} - m_t$	a_1 :降雪的阈值温度, $a_1 \in (1.5, 3.5)$ 。 a_2 :融雪的阈值温度, $a_2 \in (-3.5, -1.5)$ 。 $a_1 \geq a_2$	Q_{sim4}

2.3 模型构建及精度评估

综合考虑径流拟合精度及水量平衡误差,本研究以 F_{obj} 为目标函数,采用洗牌复合形进化(shuffled complex evolution, SCE-UA)算法来率定模型参数,以构建黄河源区径流模拟模型^[18]。

$$F_{obj} = E_{NS} - 5 \times \left| \ln\left(1 + \frac{B}{100}\right) \right|^{2.5} \quad (1)$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

$$B = \frac{\overline{Q_{sim}} - \overline{Q_{obs}}}{\overline{Q_{obs}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中： E_{NS} 为纳什效率系数，无量纲； Q_{obs} 为径流的实测值， m^3/s ； Q_{sim} 为径流的模拟值， m^3/s ； $\overline{Q_{obs}}$ 为时段实测值的平均值， m^3/s ； $\overline{Q_{sim}}$ 为时段模拟值的平均值， m^3/s ； B 为相对误差率， $\%$ 。

本研究中，以 2000 年 1 月至 2001 年 10 月为模型预热期，以 2001 年 11 月至 2010 年 12 月为模型率定期，以 2011 年 1 月至 2020 年 10 月为模型验证期，通过纳什效率系数(NSE)及其平方根(NS-

Esqrt)和相对误差率 B 对模型精度进行评估。

3 结果及分析

3.1 逐日径流模拟

唐乃亥水文站日径流过程的模拟结果及其评价指标如图 2、表 2 所示，总体来看，所有模型均可较好地反映径流的变化趋势。分析表 2 的评价指标发现，GR4J 模型的 NSE(日尺度)最小为 0.73、NS-Esqr(日尺度)最小为 0.75，均优于 TOPMODEL 等多参数模型的拟合结果^[19]。

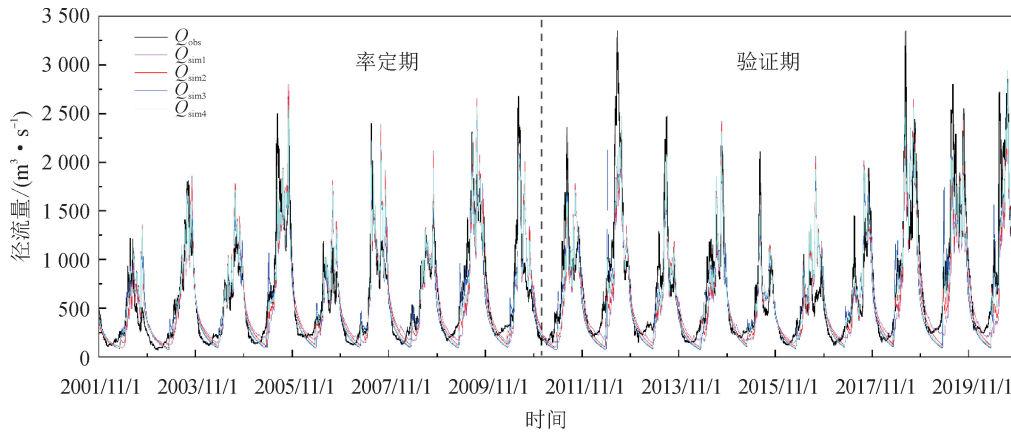


图 2 逐日径流模拟结果

Fig. 2 Hydrograph of the daily runoff simulation

表 2 径流模拟评价指标

Tab. 2 Evaluation indicators of runoff simulation

模型	NSE		NSEsqr		B/%	
	率定期 日/月径流	验证期 日/月径流	率定期 日/月径流	验证期 日/月径流	率定期 日/月径流	验证期 日/月径流
文献[19] TOPMODEL	0.78/—	0.57/—	—	—	—	—
文献[20] ABCD	—/0.81	—/0.70	—	—	—	—
GR4J	0.77/0.83	0.73/0.75	0.79/0.82	0.75/0.77	0.05/0.05	-13.14/-13.10
CemaNeige-GR4J	0.80/0.85	0.77/0.80	0.83/0.86	0.80/0.82	-0.04/-0.06	-12.79/-12.77
HBV-GR4J	0.84/0.89	0.80/0.84	0.84/0.88	0.80/0.84	-0.16/-0.22	-10.29/-10.33
WASMOD-GR4J	0.83/0.88	0.81/0.83	0.86/0.89	0.82/0.85	-0.43/-0.47	-11.40/-11.41

而且，将日尺度转换成月尺度，GR4J 模型的 NSE 值均高于 0.75，同样优于 4 参数的简单月尺度 ABCD 模型^[20]，说明 GR4J 模型在黄河源区适用性好，可推荐为黄河水文预报系统的模拟模型。

虽然 GR4J 模型在黄河源区的径流模拟精度能够满足应用需求，但考虑积雪融雪后其精度还可大幅提升。从图 2 的日径流过程可以看出，在积雪融雪的低水时段， Q_{sim1} (GR4J 模型的模拟结果)与观测流量有较大偏差，总体偏差也大于耦合模型的结果。此外，由表 2 可知，耦合了 WASMOD 及 HBV 的积

雪融雪模型的模拟结果在验证期的 NSE 均高于 0.8，与文献[7]的发现一致，这说明黄河源区的径流模拟考虑积雪融雪过程很有必要。

3.2 积雪融雪季节径流模拟

由于积雪融雪过程对黄河源区径流模拟具有显著影响，本文结合研究区温度的年内分布，认为 10 月~次年 4 月的水循环中存在积雪融雪，故积雪融雪模型的分析将在积雪融雪季节开展。

图 3 为不同积雪融雪耦合模型的模拟结果，总体来讲，所有模型都存在一定程度的低估现象，低估

程度从率定期到验证期呈增加趋势,但各模型之间存在一定差异。从率定期结果来看,基于 WASMOD 的模拟结果与观测结果最为接近,其决定性

系数 R^2 为 0.86,结果最优,其余两种方法的结果较为接近。从验证期结果来看,基于 WASMOD 及 CemaNeige 方法的 R^2 相似,约为 0.84。

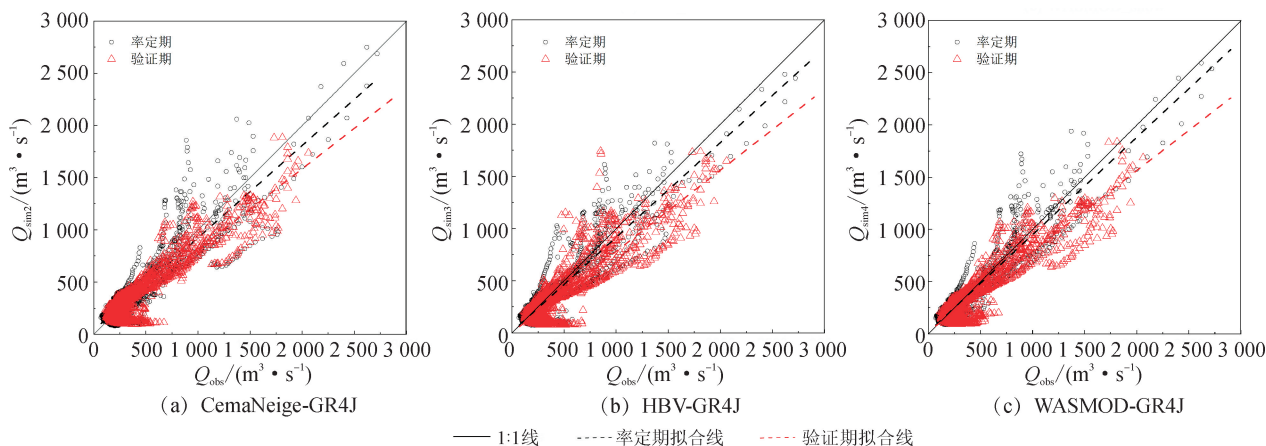


图 3 不同积雪融雪耦合模型的径流模拟散点图

Fig. 3 Scatterplots of runoff simulation by different snow melting coupling models

从率定期到验证期,基于 HBV 方法的模拟结果变化最大, R^2 变化了 0.035,说明该结果对气候条件更加敏感。考虑到模型之间存在模拟差异,而融雪季节的模拟径流均偏小,该结果可能与研究所采用的优化目标有关^[21],因为本研究的目标函数包含了 NSE,而该指标对较大流量更为敏感。

图 4 展示了积雪融雪季节内不同耦合模型的多年逐日平均模拟误差。

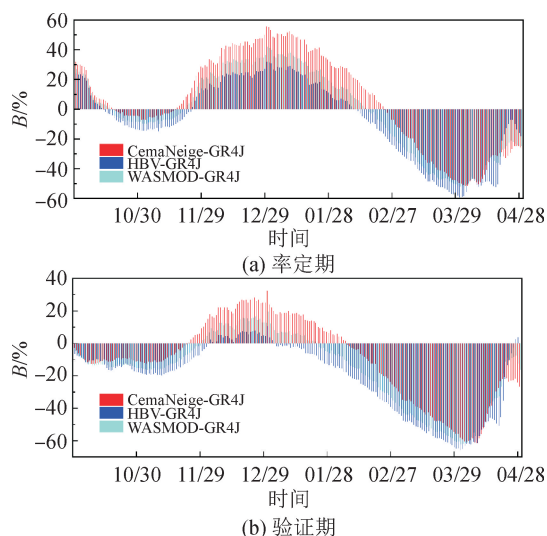


图 4 多年平均日径流模拟误差(10月~次年4月)

Fig. 4 Multi-year average daily runoff simulation errors (from Oct. to Apr.)

结果显示,模拟误差均存在显著的季节性特征,10~11月的模拟误差总体偏小,其中率定期月均误差最大值小于 7.5%,验证期小于 15%,而 3月的平均绝对模拟误差大于 30%。3~4月的模拟结果明

显低于观测径流,这可能与所用模型缺乏冰川模块及未考虑土层热量产生的积流有关^[8,22];而 12月至次年 1月的模拟误差普遍偏高,这与 12月的径流量极小、 B 指标比较敏感有关。此外,三种模拟方法之间也存在较大差异,总体来讲,基于 WASMOD 方法的模拟误差最小,其率定期的最小月均相对误差仅为 -1.2%,验证期为 2.8%。从率定期到验证期,因为气候条件不同,模拟结果发生了相应变化,变化越小,说明模型的稳健性越好。结果表明,基于 WASMOD 方法的模拟结果变化最小,而基于 CemaNeige 方法的模拟结果变化最大,这可能与温度参数的个数有关。

考虑到 10~11月的模拟误差较小,图 5 仅展示了 12月~次年 4月的模拟结果,该箱线图是基于多年日径流的集合结果。从观测流量的中值结果来看,积雪融雪季节的径流存在显著差异,如验证期 1月、2月的多年日径流中值约 $200 \text{ m}^3/\text{s}$,而 4月为 $345 \text{ m}^3/\text{s}$;同时,多年径流量也明显不同,如率定期 4月的第一、第三分位数日径流分别为 $233 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $328 \text{ m}^3/\text{s}$ 。比较不同积雪融雪模型的模拟结果发现,基于 CemaNeige 方法的模拟结果最高,而基于 HBV 方法的模拟结果最低。对比逐月结果发现,3~4月的模拟结果与观测值均存在显著差异,但 4月的多年径流量较 3月明显更加分散,所有模型的模拟差异也更加显著。这可能是因为 4月的温度位于融雪温度附近,白天因温度较高发生了融雪,而晚上温度较低发生了再结冰,从而导致径流变化较大,规律不明显,使得模拟差异较其他月份更加明显。

图 6 为积雪融雪季节不同耦合模型的精度评估

结果。由图可知,所有模型的率定期 NSE 均超过了 0.8, B 的绝对值均小于 6%, 模拟结果均表现为优秀^[23];各模型多年平均日径流的评估结果均优于逐日径流,主要原因是数值平均大大减小了异常值或波动的影响。对比三种耦合模型的评估结果, WASMOD-GR4J 的表现最优,而 HBV-GR4J 的精度最低,不同方法的差异在多年平均日径流模拟中有所减小。从率定期指标来看,基于 WASMOD 及 HBV 的耦合模型的逐日径流模拟的 NSEsqrt 分别为 0.80 和 0.72,而其多年平均日径流分别为 0.86 和 0.84。从水量平衡指标(B)来看,所有模型在率

定期都能将模拟误差控制在 5% 左右(绝对值),但对于气候条件不同的验证期,其模拟误差均超过了 10%(绝对值),且各模型之间的差异更加显著,说明各模型对气候变化的敏感程度不同。

针对不同气候条件的影响,结合率定期到验证期评估指标的变化,发现 HBV-GR4J 模型最敏感,其逐日径流模拟的 NSEsqrt 从 0.72 降至 0.58, B 从 -5.65% 降至 -20.88%;而 CemaNeige-GR4J 模型的表现最稳健,其逐日径流模拟的 NSE 仅下降 0.02, NSEsqrt 仅下降 0.04。

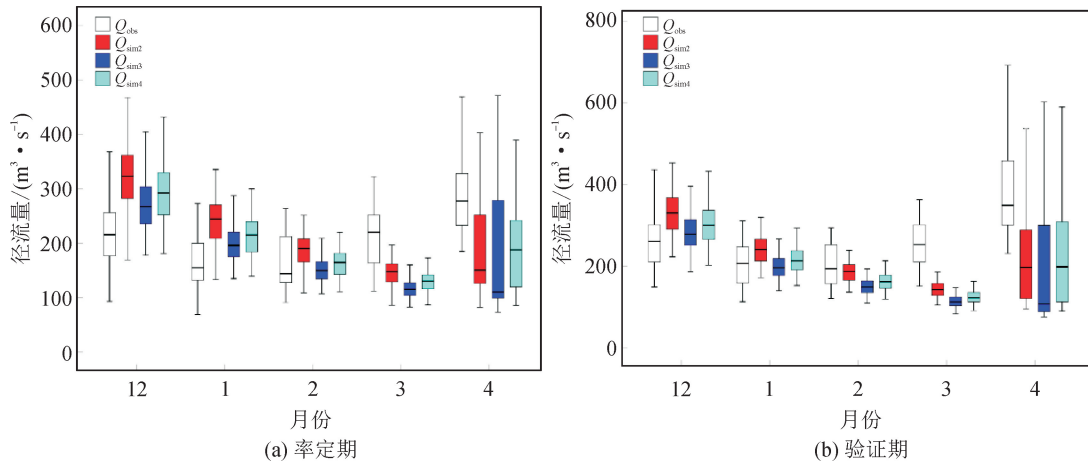


图 5 多年逐日径流模拟的箱线图(12 月~次年 4 月)
Fig. 5 Boxplot of multi-year daily runoff simulation (from Dec. to Apr.)

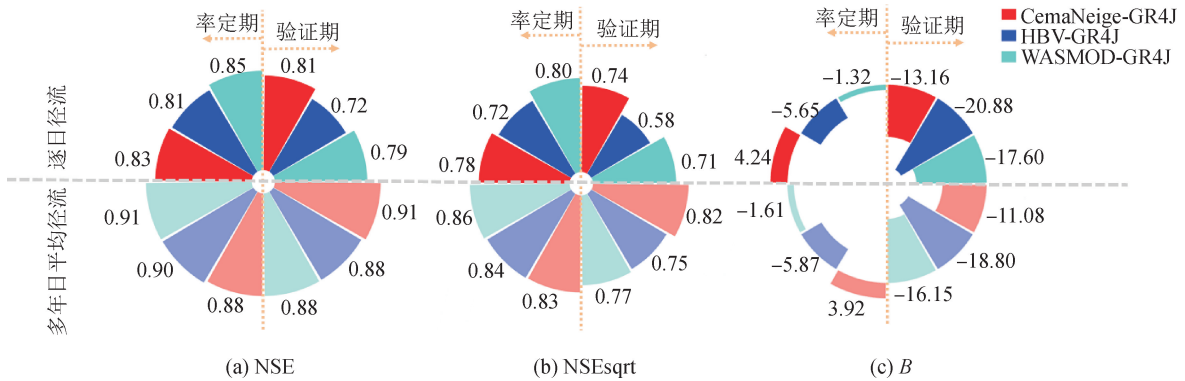


图 6 积雪融雪季节径流模拟评估指标
Fig. 6 Evaluation indicators for runoff simulation during snow melting season

4 结 论

为更好地模拟黄河源区的季节性积雪融雪径流,本研究将 CemaNeige、HBV、WASMOD 三种不同的积雪融雪径流模拟方法与简单的水文模型 GR4J 进行耦合,以唐乃亥水文站的逐日径流序列为基础,对模拟结果的改进效果进行评估。

1) GR4J 模型在黄河源区的日径流模拟中具有

较好的适用性,其率定期及验证期的 NSE 分别为 0.77 和 0.73,均优于 TOPMODEL 等较复杂模型。

2) 积雪融雪模拟对提高黄河源区水文模拟精度具有重要作用。通过耦合不同积雪融雪模拟方法,可将率定期及验证期的 NSE 平均值提高至 0.82 和 0.79,其月尺度结果为 0.87 和 0.82。

3) WASMOD-GR4J 模型对黄河源区的径流模拟改进效果最好,但 CemaNeige-GR4J 模型对气候

变化的响应最稳健。通过对积雪融雪季节的径流分析,WASMOD-GR4J模型的逐日径流模拟结果在率定期的NSE为0.85,而其多年平均日径流模拟NSE高达0.91。从率定期到验证期,CemaNeige-GR4J模型的逐日径流模拟NSE仅下降0.02。

参考文献:

- [1] 王春青,陈冬伶. 黄河水量调度径流预报方法研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(9): 20-25.
WANG Chunqing, CHEN Dongling. Study on runoff forecasting method for water regulation of the Yellow River[J]. Yellow River, 2019, 41(9): 20-25.
- [2] 贾仰文,高辉,牛存稳,等. 气候变化对黄河源区径流过程的影响[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 52-58.
JIA Yangwen, GAO Hui, NIU Cunwen, et al. Impact of climate change on runoff process in headwater area of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 52-58.
- [3] 张成凤,刘翠善,王国庆,等. 基于Budyko假设的黄河源区径流变化归因识别[J]. 中国农村水利水电, 2020(9): 90-94.
ZHANG Chengfeng, LIU Cuishan, WANG Guoqing, et al. Attribution of runoff variation for the Yellow River source region based on the Budyko hypothesis[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(9): 90-94.
- [4] 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.
- [5] 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, 95.
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, 95.
- [6] 李占玲,徐宗学. 黑河流域上游山区径流模拟及模型评估[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 344-349.
LI Zhanling, XU Zongxue. Assessment on hydrological models for runoff simulation in the upper reaches of the Heihe River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2010, 46(3): 344-349.
- [7] 郝振纯,张越关,杨传国,等. 黄河源区水文模拟中地形和融雪影响[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 311-318.
HAO Zhenchun, ZHANG Yueguan, YANG Chuanguo, et al. Effects of topography and snowmelt on hydrologic simulation in the Yellow River's source region[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 311-318.
- [8] 田明珠,赵杰,王金钊,等. 基于UEB模型的黄河源区黄河沿一达日区间融雪径流模拟[J]. 青海大学学报, 2021, 39(2): 98-104.
TIAN Mingzhu, ZHAO Jie, WANG Jinzhao, et al. Runoff simulation of snowmelt in the Huangheyuan-Dari district of the source region of the Yellow River based on UEB model[J]. Journal of Qinghai University, 2021, 39(2): 98-104.
- [9] 康尔泗,程国栋,蓝永超,等. 概念性水文模型在出山径流预报中的应用[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 18-26.
KANG Ersi, CHENG Guodong, LAN Yongchao, et al. Application of a conceptual hydrological model in the runoff forecast of a mountainous watershed[J]. Advances in Earth Science, 2002, 17(1): 18-26.
- [10] 关志成. 寒区流域水文模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.
GUAN Zhicheng. Hydrological simulation of cold zone in China[D]. Nanjing: Hohai University, 2002.
- [11] 俞鑫颖,刘新仁. 分布式冰雪融水雨水混合水文模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 23-27.
YU Xinying, LIU Xinren. Distributed hydrological model for watersheds supplemented with melted snow and glacier water and rainfall[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2002, 30(5): 23-27.
- [12] 崔震,郭生练,王俊,等. 基于GR4J-LSTM混合模型的洪水预报研究[J]. 人民长江, 2022, 53(7): 1-7.
CUI Zhen, GUO Shenglian, WANG Jun, et al. Research on flood forecasting based on GR4J-LSTM hybrid model[J]. Yangtze River, 2022, 53(7): 1-7.
- [13] 邓鹏鑫,王银堂,胡庆芳,等. GR4J模型在赣江流域日径流模拟中的应用[J]. 水文, 2014, 34(2): 60-65.
DENG Pengxin, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Application of GR4J in daily runoff simulation for Ganjiang River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(2): 60-65.
- [14] CHARLES P, CLAUDE M, VAZKEN A. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1): 275-289.
- [15] XU Chongyu. Testing the transferability of regression equations derived from small sub-catchments to a large area in central Sweden[J]. Hydrology and Earth Sys-

- tem Sciences, 2003, 7(3): 317-324.
- [16] ALEXIS V. Modélisation précipitations-débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassinsversants[D]. Paris: Agro Paris Tech, 2010.
- [17] SEIBERT J, VIS M J P. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2012, 16(9): 3315-3325.
- [18] VINEY N R, PERRAUD J, VAZE J, et al. The usefulness of bias constraints in model calibration for regionalisation to ungauged catchments[C]. 18th World Imacs Congress and Modsim09 International Congress on Modelling and Simulation; Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computationalences. 2009: 3421-3427.
- [19] 孙利敏, 王祥峰, 杨雯. 不同流域水文模型在黄河源区的应用比较[J]. 中国水运, 2023(1): 121-123.
- [20] 成硕, 李艳忠, 星寅聪, 等. 遥感降水产品对黄河源区水文干旱特征的模拟性能分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1063-1072.
- CHENG Shuo, LI Yanzhong, XING Yincong, et al. Simulation performance of remote sensing precipitation products on hydrological drought characteristics in the source region of the Yellow River[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1063-1072.
- [21] 王妍, 王义民, 周帅. 参数率定过程中目标函数选择的不确定性对径流模拟的影响[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(12): 34-39.
- WANG Yan, WANG Yimin, ZHOU Shuai. Influence of uncertainty in objective function selection in the process of parameter calibration on runoff simulation [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2020, 37(12): 34-39.
- [22] 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.
- [23] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.

(责任编辑 周 蓓)