

朱畅畅,黄华平.基于VIC-BJP模型的黄河源区水文模拟及误差校正研究[J].人民珠江,2026,47(1):112-119.

基于VIC-BJP模型的黄河源区水文模拟及 误差校正研究

朱畅畅¹,黄华平²

(1.水利部珠江水利委员会技术咨询(广州)有限公司,广东 广州 510611;2.中水珠江规划勘测设计有限公司,广东 广州 510610)

摘要:黄河源区是黄河流域重要产流区,对其开展水文模拟研究以准确评估地区水资源量对于保障流域水安全稳定具有重大意义。研究采用VIC(Variable Infiltration Capacity)模型对唐乃亥站2013—2022年逐日/月径流过程进行模拟,在其基础上耦合BJP(Bayesian Joint Probability)模型对模拟结果进行误差校正,提升其模拟精度的同时并定量分析了模拟结果的不确定性。将其与传统误差自回归模型进行比较,得到以下结论:①VIC模型对于唐乃亥站流量过程的模拟结果取得较高精度,说明该模型在黄河源区具有较好的适用性;②与模拟结果相比,BJP模型与误差自回归模型的校正结果精度均有所提升,较好地解决了部分丰水年水量峰值的低估问题,但前者校正精度要略优于后者;③基于BJP模型提取的90%不确定性区间以较窄的带宽覆盖了绝大多数的实测点据,且平均偏移幅度小于0.25,说明本次不确定性分析结果离散程度较低,校正结果可靠性高。

关键词:水文模拟;VIC模型;误差自回归模型;BJP模型;误差校正;不确定性分析;黄河源区

中图分类号:TV11;P333 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)01-0112-08

黄河源区是黄河流域重要产流区,其面积仅占黄河流域总面积的15%,但多年平均径流量却占总径流量的38%,是黄河清水的主要来源,被誉为“黄河水塔”^[1]。上游源区的径流稳定对水资源匮乏的黄河流域而言至关重要。因此,有必要开展水文模拟研究来评估黄河源区水资源稳定特征和生态环境安全,以便为全流域高质量发展提供水安全保障^[2]。

目前,关于黄河源区水文模拟及预测已有大量研究。如张磊磊等^[3]分析了多种卫星降水数据在黄河源区的降水信息捕捉能力,并结合VIC(Variable Infiltration Capacity)模型比较了不同数据在水文模拟中的应用潜力。王思媛等^[4]分别将HBV模型与新安江模型应用至黄河源区径流模拟中,并结合遗传算法估计了模型最优参数以比较两种模型的模

拟精度。庄稼成等^[5]通过耦合融雪模块与abcd模型模拟了黄河源区1980—2018年的逐月径流过程,并对径流变化成因开展了定性分析。刘义花等^[6]将CMIP6气候模式与HBV模型及SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型相结合,分析了黄河源区未来40 a流量变化趋势。考虑到水文模拟过程中包括输入变量、模型结构及参数等因素不确定性导致模拟结果与真实值间存在偏差,一般会对模拟结果进行误差校正,常用方法包括误差自回归模型^[7]、卡尔曼滤波方法^[8]、动态系统响应曲线法^[9]及人工智能算法^[10]等。然而,上述校正方法多数仅能得到确定性的校正结果,缺乏对模拟结果不确定性方面的考虑。

针对已有校正方法的不足,本次将贝叶斯联合概率模型(Bayesian Joint Probability, BJP)与VIC模

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3208800)

收稿日期:2025-01-01 **修回日期:**2025-02-07 **网络首发日期:**2025-02-25

作者简介:朱畅畅(1994—),女,硕士,主要方向为水文水资源及水利规划。E-mail:2980454989@qq.com

型进行耦合,对唐乃亥站2013—2022年逐日/月径流过程进行模拟计算,在其基础上推导了实际流量在原始预测流量条件下的概率密度函数,对模拟结果进行误差校正的同时,还定量评估了模拟结果的不确定性,并将其精度与传统误差自回归模型进行对比分析。

1 研究区概况及方法

1.1 研究区概况

黄河源区是指位于青藏高原东北部唐乃亥水文站以上的集水区域,该地区位于 $95^{\circ}55' \sim 102^{\circ}30'E$ 、 $32^{\circ}10' \sim 36^{\circ}15'N$ 。全流域面积约为12.2万 km^2 ,占黄河流域总面积的15%,干流长达270 km,地势起伏平缓,河道平均比降较小,约为1.2‰,具体见图1。

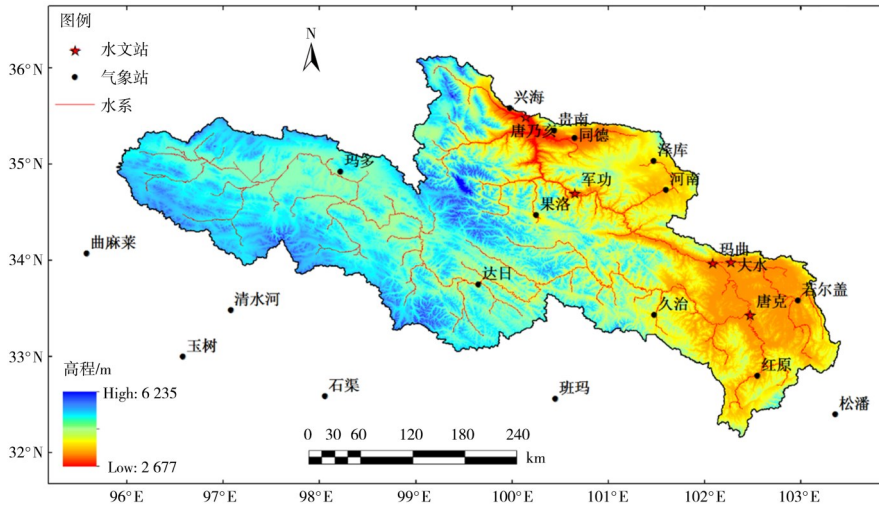


图1 研究区位置及水文、气象站点分布

Fig. 1 Research area and distribution of hydrological and meteorological stations

本次采用黄委水文局及国家气象数据网提供的黄河源区2012—2022年的气象及水文数据,包括源区内及附近区域的17个气象站和5个水文站的日降水数据,17个气象站日最高/最低温度和日平均风速的实测资料和唐乃亥水文站2012—2022年的逐日流量资料。针对流域内的植被参数,采用了Maryland大学提供的全球1 km植被分类数据,其包含了14种陆面覆盖类型,土壤参数则采用了联合国粮农组织提供的全球土壤数据集(空间分辨率约9.26 km)来确定土壤分类,该数据集包含了16种土壤类型。

1.2 VIC模型

VIC模型也称为“可变下渗容量模型”,属于流域大尺度分布式水文模型^[11]。该模型通过控制每个网格内植被层和土壤层的含水量及热通量过程,

实现流域内陆气系统的水量及热量平衡,具体原理如下。

a)水量平衡过程。作为大尺度陆面模型,VIC模型在模拟过程中始终遵循水量平衡原则,见式(1):

$$\frac{\partial S}{\partial t} = P - E - R \quad (1)$$

式中: $\frac{\partial S}{\partial t}$ 为单位时间内区域储水量变化; P 、 E 、 R 分别为单位时间内降水量、蒸散发量及径流量。

b)能量平衡过程。VIC模型采用了与大部分陆面模型相似的能量平衡方程用于描述各个网格内不同陆面类型的能量收支状况,见式(2):

$$R_n = H + \rho_w \lambda_v E + G \quad (2)$$

式中: R_n 为网格内净辐射量; H 为感热通量; $\rho_w \lambda_v E$ 为潜热通量(ρ_w 为液态水密度, λ_v 为蒸发潜热, E 为

蒸发量); G 为地表热通量。

1.3 误差自回归模型

误差自回归模型是一种基于自相关性分析的终端误差校正方法,其依据历史预报流量与实测流量间的误差残差系列,建立自回归模型来对未来流量的预报误差进行预测,以实现误差校正^[12],具体步骤如下。

a)建立自回归方程,见式(3):

$$e_{t+L} = c_1 e_t + c_2 e_{t-1} + \dots + c_p e_{t-p+1} + \xi_{t+L} \quad (3)$$

式中: e_t 为 t 时刻流量误差; p 为自回归阶数; c_1, c_2, \dots, c_p 为回归系数; ξ_{t+L} 为校正后的系统残差。

b)最小二乘法参数估计,见式(4):

$$C = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

式中: C 为回归系数矩阵; Y 为预报误差矩阵; X 为实测误差矩阵。

c)预报误差校正,见式(5):

$$Q_{t+L}^* = Q_{t+L} + e_{t+L} \quad (5)$$

式中: Q_{t+L} 为预报流量; Q_{t+L}^* 为校正流量; e_{t+L} 为估计的预报误差。

1.4 BJP模型

Wang等^[13]于2009年提出了贝叶斯联合概率模型(BJP),最早用于解决季度性径流预报问题,模型逐步完善后被广泛应用于数值天气预报及气候预报产品后处理领域,取得了较高校正精度,模型具体原理如下。

a)数据正态变换。该模型采用一种两参数log-sinh转换方法对待处理变量进行正态化,记实测流量过程为 y ,预报流量过程为 x ,则按式(6)分别进行正态变换。

$$\begin{cases} \hat{x} = \frac{1}{\beta_x} \ln(\sinh(\alpha_x + \beta_x x)) \\ \hat{y} = \frac{1}{\beta_y} \ln(\sinh(\alpha_y + \beta_y y)) \end{cases} \quad (6)$$

b)建立联合分布函数。经转换后,假设两者遵循二元正态分布,具体分布及参数见式(7):

$$\hat{F} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} \sim N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) \quad (7)$$

式中: $\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_{\hat{x}} \\ \mu_{\hat{y}} \end{bmatrix}$ 为变量均值向量; $\boldsymbol{\Sigma} =$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\hat{x}}^2 & \rho\sigma_{\hat{x}}\sigma_{\hat{y}} \\ \rho\sigma_{\hat{x}}\sigma_{\hat{y}} & \sigma_{\hat{y}}^2 \end{bmatrix}$$
为两者协方差矩阵。

c)模型参数估计。上述模型参数集合 θ 中包含转换参数 $\alpha_x, \beta_x, \alpha_y$ 和 β_y ,以及分布参数 $\mu_{\hat{x}}, \mu_{\hat{y}}, \sigma_{\hat{x}}, \sigma_{\hat{y}}$ 和 ρ 共计9个参数。采用Gibbs抽样方法,依据贝叶斯推断对模型参数进行估计。记 Y, X 为历史数据集,则 θ 的后验分布见式(8):

$$p(\theta|Y, X) = \frac{p(\theta)p(Y, X|\theta)}{p(Y, X)} \propto p(\theta)p(Y, X|\theta) = p(\theta) \prod_{t=1}^T p(Y, X|\theta) \quad (8)$$

式中: $p(\theta)$ 为参数的先验分布; $p(Y, X|\theta)$ 为似然函数。

d)后处理校正及逆正态变换。

基于Gibbs抽样方法获取的参数组合,可推导实际序列在预测序列条件下的概率密度函数,见式(9):

$$p(\hat{y}|\hat{x}, \theta) \sim N\left(\mu_{\hat{y}} + r \frac{\sigma_{\hat{y}}}{\sigma_{\hat{x}}} (\hat{x} - \mu_{\hat{x}}), (1 - r^2) \sigma_{\hat{y}}^2\right) \quad (9)$$

对上述条件分布函数进行随机抽样后,采用正态逆变换方法对样本进行处理,即得到真实空间内预报流量的校正样本集合。

2 结果分析

2.1 模拟与计算

本次将黄河源区划分为245个 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的空间网格,依据水文站的降水资料及气象站的降水、温度及风速资料,采用双线性空间插值方法,确定各网格气象数据,并制备对应“forcing_纬度_经度”的气象文件,其中经纬度分别对应各网格中心点的经纬度,该数值需要与土壤参数文件中的经纬度相一致,且精度达到小数点后4位。

研究选取2012年作为模型预热期,2013—2018年作为模型率定期,2019—2022年作为模型验证期。模拟过程中,考虑VIC模型参数众多,难以实现

对所有参数进行逐一率定。因此挑选了其中敏感性较高的 6 种土壤参数进行率定,采用 SCE-UA 算法^[14]对模型参数进行优化率定,各参数物理含义、参数范围及率定后参数值见表 1。本次选取了偏差值(BIAS)、相关系数(CC)以及纳什效率系数(NSE)对模拟精度进行评价,具体见表 2。结果表明,针对流量过程的模拟来看,率定期水量偏差绝对值均小于 6%,验证期水量误差稍大,但也不超过 15%,模拟系列与实测系列间的相关系数较高,均大于 0.9;纳什效率系数均大于 0.8。整体上,月流量过程的模拟精度均略优于日流量过程。

表 1 VIC 模型参数率定结果

Tab. 1 Calibrated parameters for VIC model

参数	参数意义	参数范围	率定参数
B	可变下渗率曲线参数	[0, 0.4]	0.32
D_s	非线性增长时流速与最大基流速比值	[0, 1.0]	0.38
D_{max}	最大基流速	[0, 30]	20
W_s	非线性增长时下层土壤含水量比例系数	[0, 1]	0.85
D_2	第二层土壤厚度	[0.1, 2.5]	0.40
D_3	第三层土壤厚度	[0.1, 2.5]	2.35

图 2、3 分别提供了唐乃亥站日/月流量过程的实测与模拟结果对比,其结果表明:在率定期, VIC 模型的模拟结果普遍较好,仅对部分水量峰值的模拟结果存在低估;在验证期,模拟流量的偏小程度要大于率定期,但除 2019 年模拟结果的偏差程度较大外,其他年份模拟精度均处于合理范围之内。此外,根据实测与模拟流量的散点图可以看出,率定及验证期对应散点均匀分布在 45° 线两侧,验证期在中、高水位置略微存在下偏现象,但整体趋势仍在合理范围内。因此,上述结果均说明 VIC 模型在黄河源区能取得较好的模拟精度。

表 2 水文模拟结果在率定及验证期精度评价

Tab. 2 Accuracy evaluation of hydrological simulation results during calibration and validation periods

评价指标	率定期(2013—2018)		验证期(2019—2022)	
	日过程	月过程	日过程	月过程
BIAS/%	-5.7	-6.0	-11.4	-10.1
CC	0.90	0.93	0.90	0.92
NSE	0.85	0.87	0.82	0.85

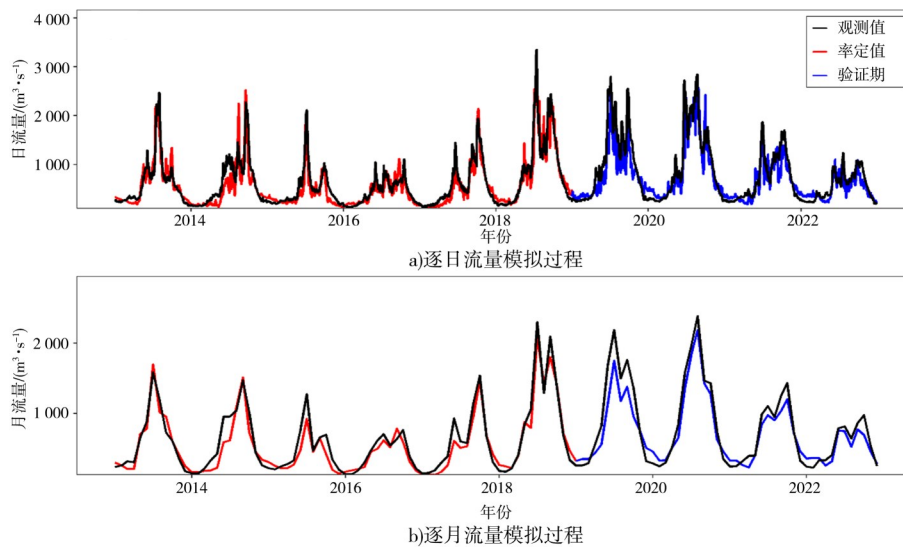


图 2 唐乃亥站 2013—2022 年逐日/月流量模拟过程

Fig. 2 Daily/monthly flow simulation from 2013 to 2022 at TNH hydrological Station

2.2 误差校正及不确定性分析

为与模拟过程保持一致,本次将 2013—2018 年

实测与模拟流量数据用于 BJP 模型参数率定,将 2019—2022 年数据用于模型验证。考虑各月份因流

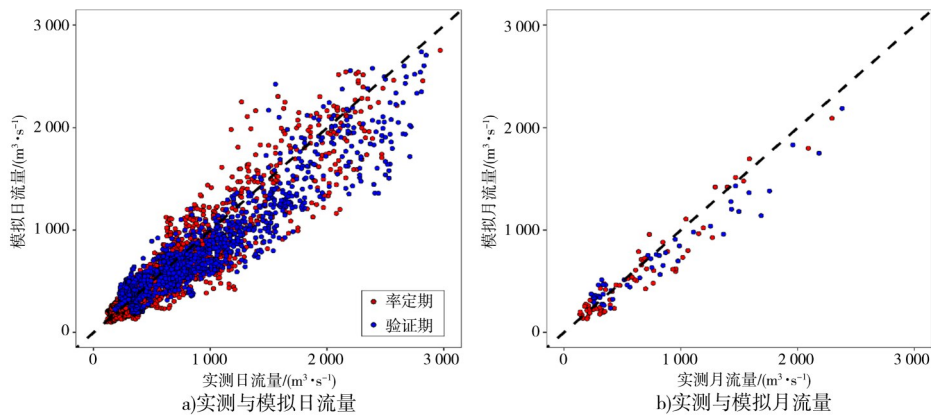


图3 唐乃亥站实测与模拟日/月流量散点图

Fig. 3 Scatter plot of measured and simulated daily/monthly flow at TNH hydrological station

量大小不同导致模拟精度存在显著差异,故分别对不同月份建立校正模型,以提高校正结果的精度。

基于实际流量在预测流量条件下的概率密度函数,研究分别推求了50%分位数流量(Q50值)及90%置信区间。同时为与BJP模型进行对比,本次还采用误差自回归模型对VIC模型模拟结果进行误差校正,2种误差校正方法在验证期的校正结果精度见表3。

表3 不同误差校正技术在验证期精度比较

Tab. 3 Accuracy comparison for different error correction methods during calibration and validation periods

评价指标	误差自回归模型		BJP模型	
	日过程	月过程	日过程	月过程
BIAS/%	-6.5	-6.1	-5.4	-5.0
CC	0.92	0.94	0.93	0.95
NSE	0.85	0.87	0.86	0.89

各项指标均表明,误差自回归模型与BJP模型均有效提高了水文模拟结果的精度,特别是在水量偏差校正方面。与前者相比,BJP模型的校正精度要略优,但两者差异并不特别显著。为进一步比较两者精度差异,研究分别统计了验证期内各月经流量的实测值与模拟值,见图4。结果表明:与实测流量过程相比,VIC模型模拟流量在枯水期(12月至次年3月)偏大,在丰水期(6—10月)略微偏小。而校正后的流量过程在枯水期及丰水期的水量偏差均

得到不同程度改善,尤其是丰水期的7—9月,校正结果与实测流量的水量差异显著减少,有效解决了部分丰水年水量峰值存在低估的问题。与误差自回归模型相比,BJP模型在7—10月的水量校正精度要优于前者,但在其他月份与前者差异不大或略差于前者。

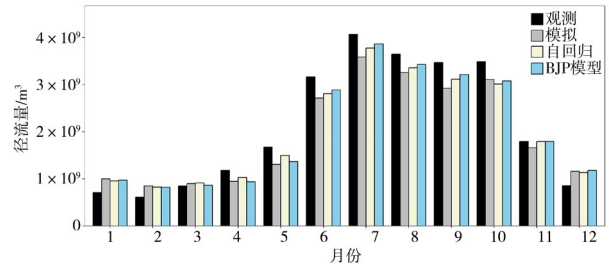


图4 验证期各月经流量实测值与模拟值对比

Fig. 4 Comparison between measured and simulated values of runoff for each month during verification period

图5提供了Q50值过程、实测流量过程以及90%置信区间。本次选取了覆盖率(Coverage Rate, CR)、相对带宽(Relative Bandwidth, RB)及平均偏移幅度(Range Deviation, RD)作为不确定性分析评价指标,计算公式可参考文献[15],统计结果见表4。其结果表明:90%置信区间在率定期与验证期的覆盖率值均大于0.9,相对带宽小于0.9,平均偏移幅度小于0.25,其说明本次估计的不确定性区间以较窄带宽覆盖了超过90%的实测点据,且其上下区间均值与实测值间的平均偏差不得超过25%。整体来

看,本次不确定性分析结果离散程度低、校正结果 可靠性高。

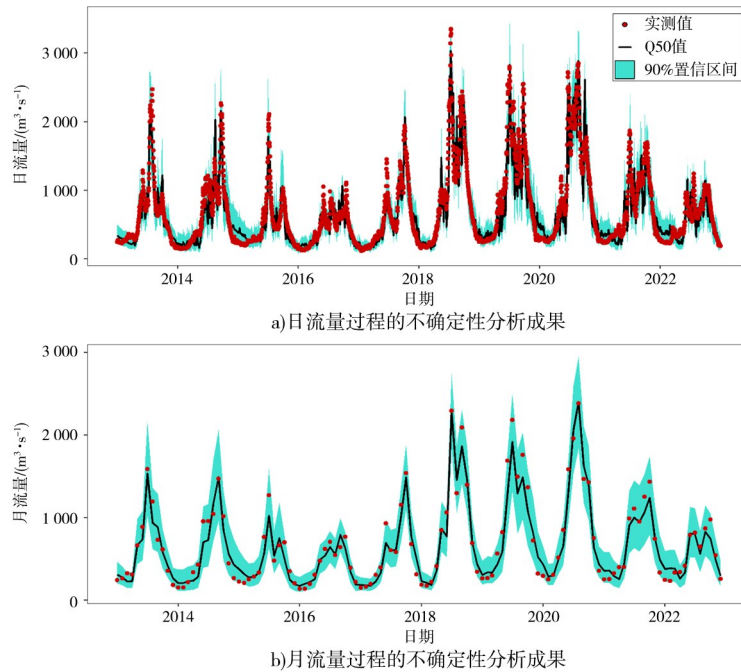


图 5 唐乃亥站日/月流量过程的不确定性分析成果

Fig. 5 Uncertainty analysis results of the daily/monthly flow at TNH hydrological station

表 4 基于 BJP 模型的 90% 置信区间精度评价

Tab. 4 Accuracy evaluation for 90% confidential interval based on BJP model

评价指标	率定期(2013—2018年)		验证期(2019—2022年)	
	日过程	月过程	日过程	月过程
CR	0.90	0.97	0.90	1.00
RB	0.89	0.88	0.90	0.89
RD	0.25	0.21	0.25	0.22

综上,采用 BJP 模型对水文模型模拟结果进行误差校正,提取的 Q50 值过程较之原始模拟结果具有更高的精度,且其校正精度要优于误差自回归模型,同时依据贝叶斯方法的优点,能将模拟过程的不确定性以置信区间的形式进行展示,可为相关人员提供更为丰富的信息以供决策。

3 结论

本文采用 VIC 模型对黄河源区唐乃亥站 2013—2022 年流量过程进行模拟计算,在此基础上,结合 BJP 模型对模拟结果进行误差校正,并定量

分析了模拟结果的不确定性,主要结论如下。

a)与实测数据相比,VIC 模型模拟结果的水量偏差、相关系数及纳什效率系数等精度指标均处在合理范围内,说明该模型对于黄河源区水文模拟具有较好的适用性。

b)采用误差自回归模型与 BJP 模型对模拟结果进行误差校正,两者校正结果的精度均有所提升,有效解决了水量峰值低估的问题,且后者的校正精度要略优于前者,但差异并不显著。

c)依据 BJP 模型推求的 90% 置信区间能以较窄带宽覆盖绝大多数实测点据,经统计其覆盖率大于 0.9,相对带宽小于 0.9,平均偏移幅度小于 0.25,说明本次不确定性分析结果离散程度低、校正结果可靠性高。

参考文献:

[1] 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(1):52-58.
 JIA Y W, GAO H, NIU C W, et al. Impact of climate change on runoff process in headwater area of the Yellow River[J]. Journal

- of Hydraulic Engineering, 2008(1): 52-58. (in Chinese)
- [2] 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 B, ZHANG J Y, WANG G Q. 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)
- [3] 张磊磊, 康颖, 岳青华, 等. 四种卫星降水数据在黄河源区的适用性分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(3): 29-33.
ZHANG L L, KANG Y, YUE Q H, et al. Analysis of the Applicability of Various Satellite-Based Precipitation in the Source Region of Yellow River [J]. Yellow River, 2021, 43(3) : 29-33. (in Chinese)
- [4] 王思媛, 孙利敏, 胡高辉, 等. HBV模型与新安江模型在黄河源区的应用比较[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 41-45, 14.
WANG S Y, SUN L M, HU G H, et al. Comparison of HBV and Xin'anjiang Model's Application of Source Region of Yellow River [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(12) : 41-45, 14. (in Chinese)
- [5] 庄稼成, 星寅聪, 李艳忠, 等. 基于改进abcd模型的黄河源区径流变化与归因[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 953-965.
ZHUANG J C, XING Y C, LI Y Z, et al. Attribution analysis of runoff change based on the abcd model coupled with the snowmelt module in the source region of the Yellow River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5) : 953-965. (in Chinese)
- [6] 刘义花, 高歌, 翟建青, 等. 基于CMIP6气候模式和两种水文模型综合集成预估的黄河源区未来40年流量变化[J]. 冰川冻土, 2024, 46(2): 675-687.
LIU Y H, GAO G, ZHAI J Q, et al. The discharge change in the source region of the Yellow River in the next 40 years based on the CMIP6 and two hydrological models [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(2) : 675-687. (in Chinese)
- [7] 陈攀, 姜志群. AR模型在宝珠寺水库实时洪水预报校正中的应用[J]. 水利信息化, 2014(3): 41-44.
CHEN P, JIANG Z Q. Application of AR Model for Flood Forecasting Correction in Baozhusi Reservoir [J]. Water Resources Informatization, 2014(3) : 41-44. (in Chinese)
- [8] SI W, BAO W, GUPTA H V. Updating real-time flood forecasts via the dynamic system response curve method [J]. Water Resources Research, 2015, 51(7) : 5128-5144.
- [9] RAFIEEINASAB A, SEO D J, LEE H, et al. Comparative evaluation of maximum likelihood ensemble filter and ensemble Kalman filter for real-time assimilation of streamflow data into operational hydrologic models [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 2663-2675.
- [10] 包红军, 王莉莉, 李致家. 基于神经网络的水位预报多断面实时校正研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(8): 91-94, 99.
BAO H J, WANG L L, LI Z J. Real-time Correction of Multi-section Channel Waterlevel Forecasting Based on Artificial Neural Networks [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(8) : 91-94, 99. (in Chinese)
- [11] 吴志勇, 陆桂华, 张建云, 等. 基于VIC模型的逐日土壤含水量模拟[J]. 地理科学, 2007(3): 359-364.
WU Z Y, LU G H, ZHANG J Y, et al. Simulation of Daily Soil Moisture Using VIC Model [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007 (3) : 359-364. (in Chinese)
- [12] 李彬权, 朱畅畅, 梁忠民, 等. 融雪补给型河流径流概率预报方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(1): 123-132.
LI B Q, ZHU C C, LIANG Z M, et al. A Probabilistic Forecast Method for the Runoff of Snowmelt Rivers [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024, 32(1) : 123-132. (in Chinese)
- [13] WANG Q J, ROBERTSON D E, CHIEW F H S. A Bayesian joint probability modeling approach for seasonal forecasting of streamflows at multiple sites [J]. Water Resources Research, 2008, 45(5): 641-648.
- [14] DUAN Q, SOROOSHIAN S, GUPTA V. Optimal Use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models [J]. Journal of Hydrology, 1994, 158: 265-284.
- [15] 黄华平, 酆于杰, 王栋, 等. 三峡水库中长期径流预测及不确定性分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 80-85.
HUANG H H, LI Y J, WANG D, et al. Medium and Long term Runoff Forecasting and Uncertainty Analysis for the Three Gorges Reservoir [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(3) : 80-85. (in Chinese)

Hydrological Simulation and Error Correction in Source Area of Yellow River Based on VIC-BJP Model

ZHU Changchang¹, HUANG Huaping²

(1. Technology Consulting of The Pearl River Water Resources Commission (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou 510611, China;

2. China Water Resources Pearl River Planning, Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510610, China)

Abstract: The source area of the Yellow River is an important runoff-producing region throughout the Yellow River Basin. Accurate hydrological simulation results of the source area for evaluating regional water resources can provide valuable support to ensure water security and stability in the Yellow River basin. This study employed the VIC model to simulate the daily/monthly runoff process at the Tangnaihai station in the source area of the Yellow River from 2013 to 2022, and based on this, the BJP model was used to correct the errors of the simulation results. Thus, the accuracy of simulation results was improved, and the uncertainty was analyzed quantitatively. Through the comparison between it and the traditional error autoregressive model, some conclusions can be obtained as follows: ① The VIC model achieved high accuracy in simulating the flow process of Tangnaihai Station, which suggests that applying this model in the source area is reasonable. ② Compared with simulation results, the corrected results generated by both the BJP model and the error autoregressive model were improved significantly in accuracy, effectively solving the problem of underestimating the peak water volume in some high flow years. Besides, the accuracy of the BJP model was superior to that of the error autoregressive model. ③ The 90% uncertainty intervals extracted based on the BJP model covered most of the observation points with a narrow bandwidth, and the average bias was less than 0.25. It suggests that the uncertainty analysis results based on the BJP model have a low degree of dispersion, and its corrected results are reasonable and reliable.

Keywords: hydrological simulation; VIC model; error autoregressive model; Bayesian joint probability model; error correction; uncertainty analysis; source area of Yellow River

(责任编辑:程 茜)