

## 基于改进广义单位线模型的中小流域洪水预报\*

董玮捷<sup>1, 2</sup>, 刘智勇<sup>1, 2\*\*</sup>, 陈晓宏<sup>1, 2</sup>, 林凯荣<sup>1, 2</sup>, 涂新军<sup>1, 2</sup>, 葛阳<sup>1, 2</sup>, 颜宇<sup>1, 2</sup>

(1: 中山大学土木工程学院水资源与环境研究中心, 广州 510275)

(2: 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082)

**摘要:** 传统的产汇流模型进行洪水预报需要大量的参数与数据。为了简化模型参数与降低洪水预报的复杂度, 本研究构建了一种考虑降雨损失与降雨前期流域流量的简易广义单位线(GUH)模型, 采用多目标粒子群算法优化参数, 以岳城流域、九洲流域为研究区域, 根据改进GUH模型、SCS-CN模型、Nash单位线构建不同洪水预报组合进行对比分析, 并对改进GUH模型在中小流域洪水预报的适用性进行评估, 探讨了不同预见期下改进GUH模型的预报精度。研究表明: (1) 改进GUH模型预报精度优于另外两个洪水预报组合; (2) 改进GUH模型在岳城流域、九洲流域都达到了乙等预报水平, 确定性系数均值分别为0.79、0.84, 合格率分别为90.91%、83.33%; (3) 改进GUH模型的预报精度随着预见期的增加逐渐下降, 当预见期小于4h时仍能保持一定的预测水平。考虑降雨损失和前期流域流量的改进GUH模型参数少、结构简单, 具有一定洪水预报潜力, 为中小流域的洪水预报提供新思路。

**关键词:** 广义单位线; 洪水预报; 降雨-径流关系; 粒子群算法; 中小流域

## Flood Forecasting in Small and Medium-Sized Watershed Using an Improved General Unit Hydrograph Model

DONG Weijie<sup>1,2</sup>, LIU Zhiyong<sup>1,2\*\*</sup>, CHEN Xiaohong<sup>1,2</sup>, LIN Kairong<sup>1,2</sup>, TU Xinjun<sup>1,2</sup>, GE Yang<sup>1,2</sup>, YAN Yu<sup>1,2</sup>

(1: Center for Water Resources and Environment, School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, P.R.China)

(2: Southern Marine Science And Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, P.R.China)

**Abstract:** The unit hydrograph is a simplified way to understand how a watershed responds to rainfall and offers a practical approach for flood forecasting. By approximating real-world watershed processes as a time-invariant linear hydrologic system, Guo turns the unit hydrograph to General Unit Hydrograph (GUH). The traditional runoff hydrological models for flood forecasting require a large number of parameters and datasets. In order to reduce the complexity of flood forecasting and model parameters, a simple GUH model considering rainfall loss and pre-flow is constructed in this study, combining with the Multiple Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithm for parameters optimization. Taking Yuecheng Basin and Jiuzhou Basin as the study basins, different combinations of flood forecasting are constructed according to the improved GUH model, SCS-CN model and Nash unit hydrograph for comparison. The applicability of the model in flood forecasting in small and medium-sized basins is evaluated, and the forecasting accuracy of the improved GUH model at different lead

\* 2024-06-14 收稿; 2024-11-28 收修改稿。

广东省杰出青年基金(2023B1515020116)、国家自然科学基金项目(52179031)、国家重点研发计划项目(2021YFC3001000)和珠江人才计划团队项目(2019ZT08G090)联合资助。

\*\* 通信作者: E-mail: [liuzhiy25@mail.sysu.edu.cn](mailto:liuzhiy25@mail.sysu.edu.cn)。

times is discussed. The results showed that: (1) The improved GUH model's forecasting accuracy was superior to two other runoff hydrological models. (2) The improved GUH model reached a Category II forecast level at both the Yuecheng Basin and Jiuzhou Basin, with mean coefficients of determination for Yuecheng and Jiuzhou Basin were 0.79 and 0.84, and pass rates of 90.91% and 83.33%, respectively. (3) The forecasting accuracy of the improved GUH model gradually decreased with an increase in lead times, but it still maintained a certain level of predictive performance when the lead times was less than four-hour. The improved GUH model, considering rainfall loss and pre-flow, had fewer parameters and simpler structure. It showed the potential for flood forecasting and provided new insights for flood forecasting in small and medium-sized watersheds.

**Key words:** general unit hydrograph; flood forecasting; rainfall-runoff relationship; Particle Swarm Optimization; small and medium-sized watersheds

在全球气候变化的影响下, 极端降水与洪水灾害的频率不断上升<sup>[1,2]</sup>, 对人类社会<sup>[3]</sup>和生态环境<sup>[4,5]</sup>造成巨大破坏。研究表明, 近年来, 洪水风险不断增加, 同时受到洪水影响的人口比例也出现上升趋势, 而气候变化可能会导致未来遭受洪水影响的人口比例进一步扩大<sup>[6,7]</sup>, 这将严重影响社会可持续发展。有效的洪水防治措施能够加强社会的抗灾能力, 并减少灾害造成的损失<sup>[8]</sup>。而洪水预报是洪水防治的重要工具, 不仅可以为防洪抗灾提供科学依据, 还能为相应的决策制定提供有力支持。

中小流域暴雨洪水模拟与预报是国家防汛减灾工作的重难点<sup>[9,10]</sup>。现阶段多数中小流域水文站点匮乏, 相应的实测水文资料不足, 难以准确地建立传统的洪水预报模型<sup>[11]</sup>。单位线因所需参数与资料较少, 广泛用于地表汇流计算。Sherman<sup>[12]</sup>最早提出洪水单位线的概念。Nash 假设流域内部由无数个连续相等的线性水库串联, 推导出伽马瞬时单位线的方程<sup>[13]</sup>, 这一方法被广泛应用。此后, 众多学者提出各类单位线计算方法, 如地貌瞬时单位线<sup>[14,15]</sup>、地貌气候瞬时单位线<sup>[16]</sup>、时变分布单位线<sup>[17]</sup>等, 这些方法充分考虑并应用了流域的下垫面特征、非线性特征以及土壤含水量的变化, 使得单位线在实际应用中更加灵活和精准。Guo<sup>[18]</sup>于 2022 年提出了一种基于负指数函数分布的广义单位线 (General Unit Hydrograph, GUH), 仅需 3 个参数, 在英国与美国数十个流域的降雨径流模拟中表现出色<sup>[19-21]</sup>, 并在风速模拟<sup>[22]</sup>、淮河流域和长江流域的洪水预报<sup>[23]</sup>中得到应用。参数区域化方法也是目前中小流域缺资料地区洪水预报的有效手段之一<sup>[24]</sup>。侯东儒等<sup>[25]</sup>采用文献分析和统计方法总结了 Nash 单位线的参数取值与流域特征因子的相关方程; 王怀军等<sup>[26]</sup>构建了我国 340 个中小河流域的气候和下垫面因子, 分析产汇流因子与环境因子的关系, 为水文模型参数移植提供参考。

尽管以上研究为中小流域洪水预报提供了有力的参考, 但现有研究需要对产汇流过程进行细致分析, 且所需参数与数据众多, 运用到缺资料的中小流域洪水预报仍受限。为了简化产汇流过程, 减少模型所需参数, 使得洪水模拟更为简便, 本文构建一种考虑降雨损失与降雨前期流域流量的简易广义单位线 (GUH) 模型。此外, 虽然广义单位线所需参数较少, 但传统的率定方法依赖经验或者人工<sup>[27]</sup>, 存在费时费力、具有主观性和不确定性等问题, 降低了该模型在洪水预报方面的可行性, 因此本文采取优化算法代替人工率定。水文模型中常用的参数优化算法有遗传算法、SCE-UA 算法、贝叶斯算法和改进粒子群算法等, 改进粒子群算法相较之下更具稳定性<sup>[28]</sup>。多目标粒子群算法 (Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO) 是一种基于群体智能优化算法的多迭代优化算法, 相比于改进粒子群算法, 可有效求解多个优化目标, 具有较强的局部和全局搜索及寻优能力<sup>[29,30]</sup>。

本研究结合具体的工程应用需求, 构建了一种考虑降雨损失与降雨前期流域流量的简易广义单位线 (GUH) 模型, 采用多目标粒子群算法优化参数, 并以东江支流两个中小流域岳城流域和九洲流域为主要研究对象, 对改进 GUH 模型在洪水预报中的适用性进行评估, 以为中小流域洪水预报提供一种简单而准确的方法。

## 1 研究方法与数据

### 1.1 研究区域与数据来源

选取珠江水系东江支流新丰江岳城水文站（图 1(a)）与安墩水九洲水文站（图 1(b)）控制流域（以下简称为：岳城流域和九洲流域）进行场次洪水的研究。

岳城流域地处亚热带季风气候区，流域面积为 531.1km<sup>2</sup>，多年平均降雨量为 2034mm，降雨集中在 4-9 月，约占全年降雨的 80%以上。收集到 2007 年-2021 年汛期数据，包括 5 个雨量站的逐时降雨量、岳城水文站的逐时降雨量和流量数据。选取 11 场洪水，其中 8 场率定，3 场验证。

九洲流域地处亚热带季风气候区，流域面积为 385.6 km<sup>2</sup>，多年平均降雨量为 1685mm，降雨主要集中在 4-9 月，约占全年降雨量的 80%。收集整理了 2008 年-2019 年汛期数据，包括 5 个雨量站的逐时降雨量、九洲水文站的逐时降雨量和流量数据。选取 12 场洪水，其中 9 场率定，3 场验证。

两个流域的面平均降雨量均采用泰森多边形法计算，各站点的信息和面积权重系数见表 1。降雨和流量数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》。

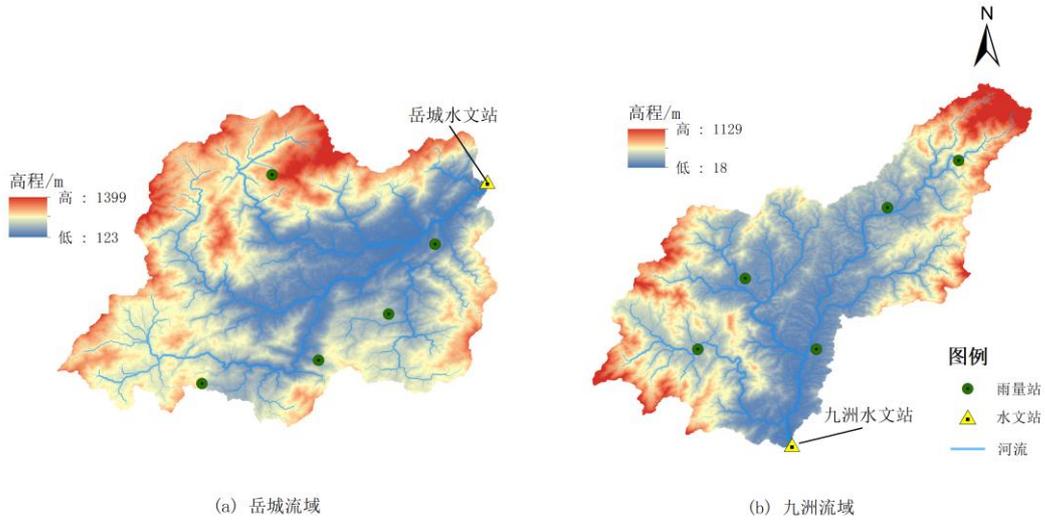


图 1 研究区域及站点分布

Fig.1 Distribution map of the study area and stations

表 1 研究流域各站点面积权重系数

Tab.1 Weighting coefficients of each station in the study area

流域	站点	集水面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	流域	站点	集水面积/km <sup>2</sup>	百分比/%
岳城	长坪	121.1	22.81	九洲	梅子坪	55.1	14.29
	梅坑	160.0	30.13		洋潭	84.8	21.99
	板岭	82.3	15.50		安墩	49.8	12.92
	潭公洞	69.7	13.12		仓下	85.7	22.22
	黄磔	72.3	13.62		松坑	89.0	23.07
	岳城	25.6	4.83		九洲	21.2	5.51
		531.1	100			385.6	100

## 1.2 研究方法

1.2.1 广义单位线 Guo<sup>[18]</sup>利用时不变线性水文系统来近似流域，用蓄水方程代替非线性动量守恒方程，提出了用于描述流域汇流过程的 GUH 理论，并对瞬时单位线进行以下假设：上升和下降部分遵循增长和下降的“指数”模式；随着时间接近无穷大，瞬时单位线趋于零，与此同时一般单位线趋于 1。故得出流域的一般单位线  $g(t)$ ：

$$g(t) = 1 - (1 + mx)^{-1/m} \quad (1)$$

式中， $m$  为单位线上升常数与下降常数之比，也代表下游水面条件； $x(t)$  代表流域特征，表示为：

$$x(t) = \exp[\mu(t/t_p - 1)] \quad (2)$$

式中， $\mu$ 为单位线上升常数； $t_p$ 为洪峰滞时， $h$ 。

对  $g(t)$ 求导可得瞬时单位线  $u(t)$ ：

$$u(t) = dg/dt = \mu x(1 + mx)^{-(1+1/m)} / (t_p/3600) \quad (3)$$

至此，式 (1) - (3) 形成了一组包含三个参数 ( $t_p$ ,  $\mu$ ,  $m$ ) 的单位线，即广义单位线 (GUH)。

1.2.2 考虑降雨损失和降雨前期流域流量的广义单位线 (GUH) 模型构建 一般而言，分析流域的汇流过程，首先需要分析产流过程，即求出经包气带再分配后的净雨量；接着需要对汇流过程进行水源划分<sup>[31]</sup>，可采用二水源模型、三水源模型等方法；最后计算出口断面的实际流量。然而，这种方法所需的参数和数据较多，为了简化计算方法，可以综合考虑降雨损失和前期流域流量，并结合 Guo<sup>[19]</sup>的方法，进一步给出流域出口断面流量过程的计算方法：

$$Q(t) = \sum_{\tau} \begin{cases} R(\tau) - I_a & \cdot A \cdot \frac{[g(t-\tau) - g(t-\tau-\Delta\tau)]}{\Delta\tau} + Q_0, R(\tau) \geq I_a \\ 0 & R(\tau) < I_a \end{cases} \quad (4)$$

式中， $R(\tau)$ 为单位时间内的降雨量，mm； $I_a$ 表示单位时间内的降雨损失量，mm，本文中取其在一次场次洪水中为恒定值； $Q_0$ 表示为降雨前期流域流量（包括地下径流、壤中流、非本次降水形成径流等）， $m^3/s$ ，简称为前期流量； $A$ 为流域面积， $m^2$ ； $\tau$ 是时间上的变量，s。降雨损失  $I_a$ 和前期流量  $Q_0$ 为拟合过程的一部分，具体方法为：从预报时刻  $t$  开始，不考虑未来降雨资料，将模型参数值、已观测到的实测降雨和流量资料输入到改进 GUH 模型中；采用非线性最小二乘法对降雨损失  $I_a$ 与前期流量  $Q_0$ 进行拟合，直到取得合适的  $I_a$ 与  $Q_0$ ，使得模拟流量  $Q(1)$ 、 $Q(2)$ .....  $Q(t)$ 与对应的实测流量拟合最佳（进而基于公式 (4) 去预报未来时刻的流量  $Q(t+1)$ 、 $Q(t+2)$ ..... $Q(end)$ ）。本文将这种可同时计算降雨损失、前期流量及出口断面流量的广义单位线法称为改进 GUH 模型，并将其应用于东江支流岳城流域和九洲流域的洪水预报。

1.2.3 洪水精度评价指标 根据《水文情报预报规范 (GB/T 22482-2008)》<sup>[32]</sup>的规定，选用洪量相对误差、洪峰流量相对误差、峰现时间误差及确定性系数  $DC$  对场次洪水预报结果进行精度评价。并选取洪量许可误差和洪峰流量许可误差为实测值的 20%，峰现时间误差的许可误差为 3h。当一次预报的误差小于许可误差时，为合格预报。合格预报次数与预报总次数之比的百分数为合格率，表示多次预报总体的精度水平。

1.2.4 MOPSO 参数优化算法 MOPSO 优化算法是由鸟类捕食进化而来的粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 应用于多目标优化问题 (multi-objective optimization problems, MOPs) 求解时提出的，能通过当前最优解共享信息，加速粒子的收敛速度，快速找到全局最优解<sup>[33]</sup>。

根据洪峰预报精度和确定性系数  $DC$ ，本文将参数优化的目标函数构建为：

$$\min F = x \sum_{i=1}^j |(Q_{pi} - Q_{si}) / Q_{pi}| + y \sum_{i=1}^j (1 - DC_i) \quad (5)$$

式中， $i$ 代表第  $i$  场次洪水， $j$ 代表场次洪水总数； $Q_p$ 和  $Q_s$ 分别为实测和模拟的洪峰流量， $m^3/s$ ； $x$ ,  $y$ 代表不同优化目标的权重系数，其中  $x + y = 1$ ，取  $x = 0.5$ ,  $y = 0.5$ 。当目标函数  $\min F$  经过多次计算仍无法提高模拟精度的 0.1%或达到最大迭代次数时停止迭代。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同模型洪水预报结果对比

选取预见期为 1h，对不同模型的洪水预报效果进行探究。根据改进 GUH 模型、SCS-CN 模型、Nash 单位线构建了不同的洪水预报组合，对岳城流域、九洲流域共 23 场次洪水进行预报，洪水预报组合见表 2。

表 2 洪水预报组合

Tab.2 Combinations of flood forecasting

组合	产流	地表汇流	降雨前期流域流量
组合 1	改进 GUH 模型	改进 GUH 模型	改进 GUH 模型
组合 2	改进 GUH 模型	Nash 单位线	改进 GUH 模型
组合 3	SCS-CN 模型	改进 GUH 模型	改进 GUH 模型

对于改进 GUH 模型和 Nash 单位线,用率定期的场次洪水及 MOPSO 优化算法进行参数率定,参数取值见表 3;对于 SCS-CN 模型,通过计算流域的各土地利用类型和各土壤水文分组所占的面积权重,并根据场次降雨前 5 天的降雨总量,求得干旱、正常、湿润情况下对应的  $C_{N1}$ 、 $C_{N2}$ 、 $C_{N3}$ ,  $C_N$  值见表 3。基于改进 GUH 模型求得的各场次降雨损失和前期流量如图 2。

表 3 模型参数值

Tab.3 The value for model parameters

流域	改进 GUH 模型			Nash 单位线		SCS-CN 模型		
	$t_p/h$	$\mu$	$m$	$k$	$n$	$C_{N1}$	$C_{N2}$	$C_{N3}$
岳城流域	3.47	5.13	7.34	1.73	3.91	51.7	71.8	85.4
九洲流域	5.05	5.32	5.36	1.37	6.09	51.4	71.6	85.3

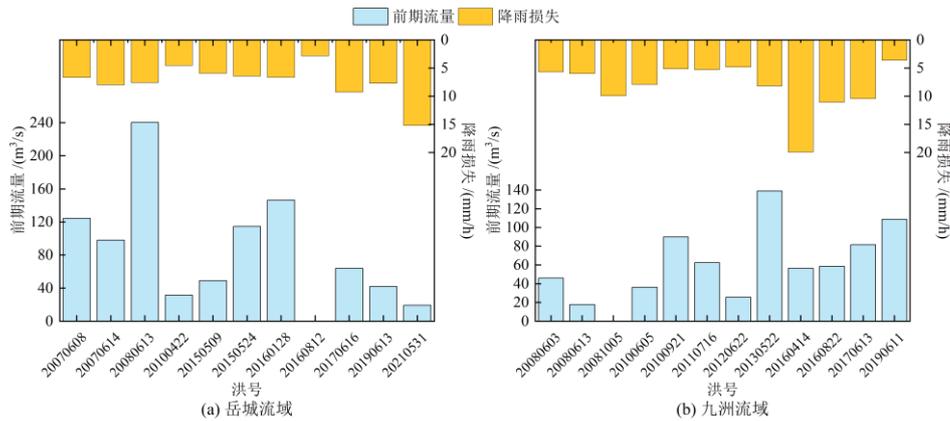


图 2 各场次洪水的降雨损失值和前期流量

Fig.2 The rainfall loss and pre-flow of each flood

各场次洪水的洪峰流量相对误差如图 3,各组合的预报精度见表 4。比较三种组合的洪峰相对误差发现,组合 1 与组合 2 的相对误差较小;组合 3 由于产流阶段采用原始 SCS-CN 模型,只简单概括了前期产流的三种土壤条件(干旱、正常、湿润),因此出现较多场次洪水洪峰相对误差偏大,但当组合 1 与组合 2 预报效果较差时,组合 3 时而能取得较好的预报效果,如岳城 20080613 场次洪水、九洲 20190611 场次洪水。分析组合的预报精度可知,组合 3 预报精度一般,但在九洲流域的洪量预报中表现最好,组合 1 与组合 2 预报精度较好,组合 2 在平均峰现时间误差上略优于组合 1,其值为 0.08~0.46h,但组合 1 在确定性系数、合格率上表现更优,总体来说,组合 1 的预报效果最好。这表明改进 GUH 模型通过综合考虑降雨损失与前期流量,利用广义单位线进行汇流计算,在洪峰流量预报与洪水过程模拟上表现更出色,能更好地预报场次洪水。

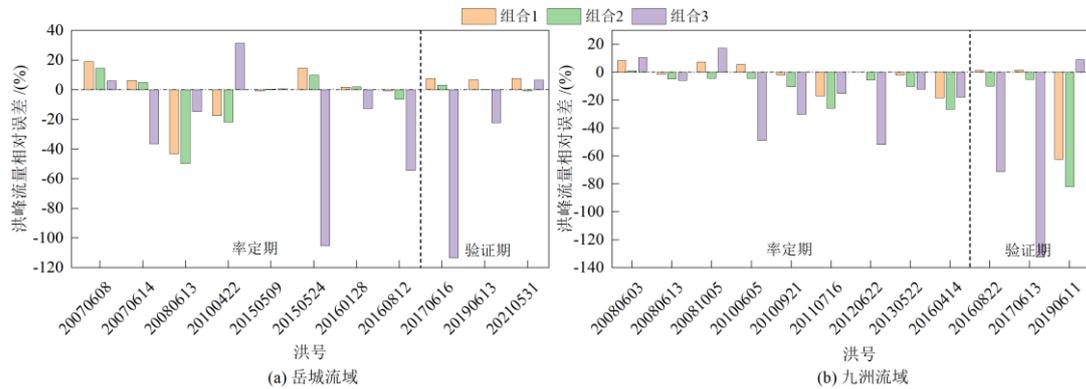


图3 场次洪水洪峰流量相对误差

Fig.3 The relative error of peak flow in flood events

表4 三种组合预报精度对比

Tab.4 Comparison of forecasting accuracy of three combinations

流域	组合	洪量相对误差 均值/%	洪峰流量相对 误差均值/%	峰现时间 误差均值 /h	确定性系数 DC 均值	合格率
岳城	组合 1	7.23	11.45	1.55	0.79	90.91
	组合 2	10.57	10.38	1.09	0.79	72.73
	组合 3	24.62	36.67	1.18	0.43	36.36
九洲	组合 1	16.27	10.65	0.75	0.84	83.33
	组合 2	20.07	15.78	0.67	0.81	66.67
	组合 3	6.98	29.39	1.08	0.65	58.33

注：相对误差均值为各相对误差绝对值的均值，下同。

## 2.2 改进 GUH 模型洪水预报效果评估

三种组合中，组合 1 的洪水预报效果最好，故进一步对改进 GUH 模型在岳城流域、九洲流域的场次洪水预报效果进行评估，场次洪水预报精度评定见表 5。

在岳城流域，率定期 8 场洪水中有 7 场在误差允许范围内，洪量相对误差均值、洪峰相对误差均值、峰现时间误差均值、确定性系数 DC 均值、合格率分别为 7.20%、12.97%、1.5h、0.77、87.50%；验证期 3 场洪水均合格，洪量相对误差均值、洪峰相对误差均值、峰现时间误差均值、确定性系数 DC 均值、合格率分别为 7.33%、7.39%、1.67h、0.83、100.00%。预报精度达到乙级。

在九洲流域，率定期 9 场洪水中 8 场洪水合格，验证期 3 场洪水中 2 场洪水合格，率定期与验证期的洪量相对误差均值分别为 10.68%、33.00%，洪峰相对误差均值分别为 6.89%、21.93%，峰现时间误差均值分别为 0.56h、1.33h，确定性系数 DC 均值分别为 0.90、0.68，合格率分别为 88.89%、66.67%，预报精度分别为乙级、丙级，总预报精度为乙级。

23 场洪水中有 2 场洪水洪峰流量、洪量模拟偏差均超出规定的许可误差，如岳城流域 20080613 场次洪水 (-43.10%、-31.50%)、九洲流域 20190611 场次洪水 (-62.50%、-88.40%)。分析岳城流域 20080613 场次洪水，此场降雨主要聚集在中上游，本文采用泰森多边形法计算流域面雨量，并未考虑降雨空间分布不均。分析九洲流域的 20190611 场次洪水可知，在洪水形成前期，九洲流域降水量相对较少，土壤含水率相对较低。而改进的 GUH 模型未能准确反映这些情况，其对降雨损失的求解是一种简化方法，不能准确模拟土壤的蓄水容量，使得汛期地表产流量模拟值偏大，进而导致场次洪水的洪峰流量模拟值高于实测值。此外，数据质量、参数的不确定性等也有可能影响模型的预报精度。

综上所述，改进 GUH 模型在岳城流域、九洲流域对场次洪水的洪量、洪峰流量、峰现时间和确定

性系数的预报效果较好。根据预报精度评价等级，可确定该预报精度为乙级。这表明改进 GUH 模型可为东江支流岳城流域、九洲流域的洪水预报提供重要参考依据，也说明其在中小流域的应用效果较好，可为模型进一步推广提供参考。

表 5 改进 GUH 模型的精度评定

Tab.5 Forecasting accuracy of improved GUH Model

流域	时期	洪水场次	洪量相对误差/%	洪峰流量相对误差/%	峰现时间误差	确定性系数 DC 均值	合格
岳城	率定期	20070608	-0.89	19.06	提前 1h	0.75	合格
		20070614	2.86	6.44	提前 1h	0.91	合格
		20080613	-31.50	-43.10	延迟 2h	0.56	不合格
		20100422	-5.10	-17.49	延迟 1h	0.91	合格
		20150509	-1.45	-0.68	0h	0.93	合格
		20150524	1.61	14.67	提前 3h	0.75	合格
		20160128	-0.25	1.77	提前 1h	0.58	合格
	20160812	13.93	-0.56	提前 3h	0.79	合格	
		均值	7.20	12.97	1.5h	0.77	
	验证期	20170616	8.63	7.64	提前 2h	0.69	合格
		20190613	6.22	6.84	提前 2h	0.90	合格
		20210531	-7.13	7.70	延迟 1h	0.91	合格
		均值	7.33	7.39	1.67h	0.83	
	九洲	率定期	20080603	5.00	8.55	0h	0.96
20080613			7.01	-1.50	0h	0.97	合格
20081005			9.18	7.56	提前 1h	0.92	合格
20100626			13.02	5.76	提前 1h	0.96	合格
20100921			-11.24	-1.80	0h	0.86	合格
20110716			-23.29	-16.72	0h	0.76	不合格
20120622			10.74	-0.01	延迟 1h	0.92	合格
20130522		-14.83	-1.95	提前 1h	0.76	合格	
20160414		-1.89	-18.16	延迟 1h	0.95	合格	
均值		10.68	6.89	0.56h	0.90		
验证期	20160802	-0.83	1.51	提前 1h	0.92	合格	
	20170613	-9.76	1.78	提前 1h	0.76	合格	
	20190611	-88.40	-62.50	延迟 2h	0.37	不合格	
	均值	33.00	21.93	1.33h	0.68		

### 2.3 不同预见期下改进 GUH 模型预报精度评定

选取 2h、4h、6h 预见期对岳城流域、九洲流域的场次洪水进行预报。图 4、图 5 展示了改进 GUH 模型在两个流域不同预见期下预报的场次洪水过程和流量散点图。岳城流域率定期 3 种不同预见期改进 GUH 模型的确定性系数 DC 均值分别为 0.51、0.29、-0.35，验证期分别为 0.81、0.71、-0.13；九洲流域率定期不同预见期确定性系数 DC 均值分别为 0.88、0.55、0.29，验证期分别为 0.69、0.80、0.67，可见随着预见期的增加，确定性系数 DC 均值有一定程度的下降。由流量散点图可知，在预见期为 2h 时，流量散点大部分在 45° 线两侧，随着预见期的增加，流量散点逐渐分散。由场次洪水流量结果可知，在预见期为 2h 和 4h 时，率定期和验证期的预测流量过程与实测流量过程大部分吻合，部分洪水存在预测洪峰流量过高的情况。当预见期延长为 6h 时，岳城流域洪水预测过程与实测流量存在较大差异，部分洪水无法成功预测；而在九洲流域中，9 场洪水的预测过程与实测流量存在一定的差距，其中 5 场洪水的预测流量偏低，4 场偏高。这可能是由于随着预见期的增加，输入的实测降雨和流量数据逐渐减少。在输入数据较少的情况下，为了使模拟流量与当前实测流量拟合最佳，改进 GUH 模型模拟的降雨损失值往往偏低，从而使得部分场次洪量模拟值过大，进而导致预测流量的偏高。

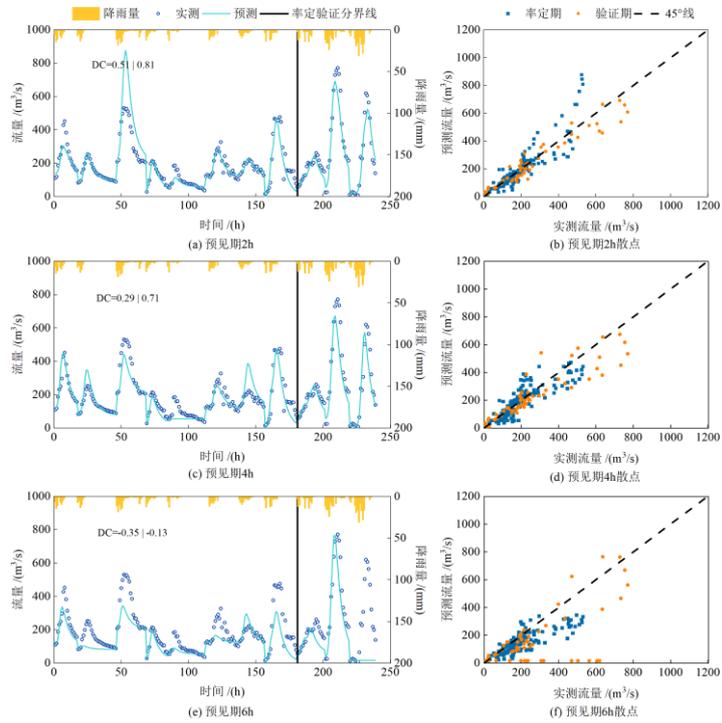


图 4 不同预见期下改进 GUH 模型预报岳城流域洪水流量结果  
 Fig.4 Flow forecasting at Yuecheng Basin by improved GUH model at different lead times

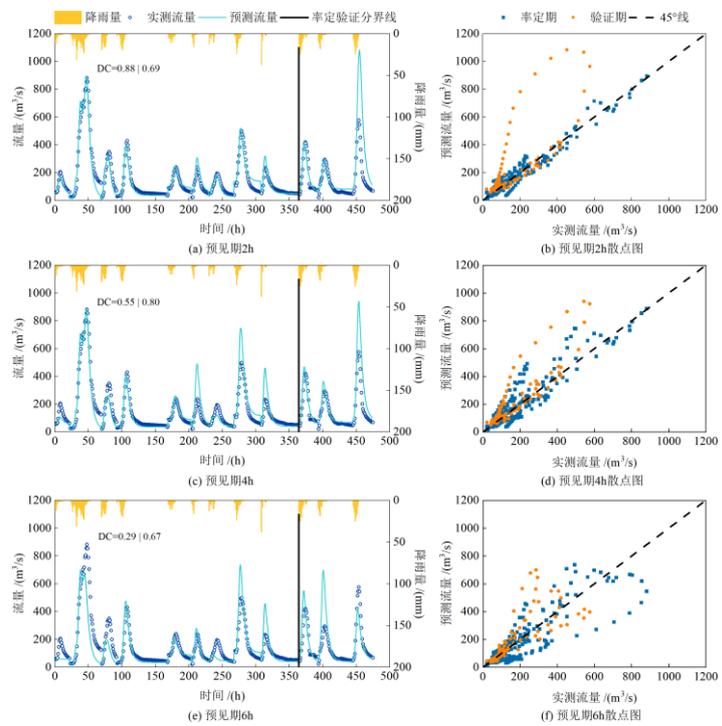


图 5 不同预见期下改进 GUH 模型预报九洲流域洪水流量结果  
 Fig.5 Flow forecasting at Jiuzhou Basin by improved GUH model at different lead times

表 6 列出了不同预见期下改进 GUH 模型对洪水预报效果的评价指标。随着预见期的增加，率定期和验证期的洪量相对误差均值、洪峰流量相对误差均值、峰现时间误差均值都有一定程度地增加，甚至超过许可误差，合格率也不断下降。虽然预报精度不断下降，但是在没有实时降雨和流量数据输入的情况下，改进 GUH 模型在预见期小于 4h 仍能保持一定的预测水平，在预见期为 2h 时预报精度较好，当预见期为 4h 时，两个流域峰现时间误差均值均在 3h 内，岳城流域洪量相对误差均值在 20% 以内、验证期的合格率达到 100%，但九洲流域洪峰流量、洪量相对误差均值较大，两个流域整体合格率无法达到精度要求。

表 6 不同预见期下改进 GUH 模型洪水预报效果评估  
Tab.6 Forecasting effect by improved GUH model at different lead times

流域	时期		洪量相对误差均值/%	洪峰流量相对误差均值	峰现时间误差均值	合格率/%
				/%	/h	
岳城	预见期 2h	率定期	11.74	19.75	1.25	62.50
		验证期	7.07	11.03	1.67	100.00
	预见期 4h	率定期	18.81	29.42	1.75	37.50
		验证期	10.15	7.29	1.67	100.00
	预见期 6h	率定期	25.96	37.15	2	12.50
		验证期	42.57	39.15	6.33	33.33
九洲	预见期 2h	率定期	12.41	12.37	0.56	77.78
		验证期	38.00	29.86	1.33	66.67
	预见期 4h	率定期	26.81	41.55	0.56	33.33
		验证期	29.69	33.27	1	33.33
	预见期 6h	率定期	22.33	40.60	3.44	33.33
		验证期	27.90	65.33	1	0.00

## 2.4 模型不确定性讨论

改进 GUH 模型在洪水预报中取得了较好的效果，但模型仍存在较多的不确定性因素影响了洪水预报的精度。

首先是降水数据的不确定性。一方面是缺乏更长时间序列的数据。本文只收集到了 2007-2021 年汛期降雨、流量数据，且部分年份数据缺失。研究表明当降水数据完整度低于 80% 时，纳什系数会持续下降，且枯水期降水数据缺失会大大增加模型的不确定性<sup>[34,35]</sup>。另一方面是本文采用泰森多边形法计算研究流域的面平均雨量，未考虑降雨空间不均匀性，此外有学者指出越靠近水文站的降水站点越有使用价值<sup>[36]</sup>，但本文中靠近水文站点的降水站点较少，一定程度上影响了模拟精度。

其次是参数的不确定性。改进 GUH 模型最核心的参数为汇流阶段广义单位线中的  $t_p$ 、 $\mu$ 、 $m$ ，三个参数既考虑了降雨特性，又考虑了水系形状、流域坡度等流域特征<sup>[37]</sup>，但参数与降雨、流域特征之间的相关关系仍有待研究。本文利用 MOPSO 算法对参数进行率定，提高了参数取值的精准度，但在模拟不同时间和空间的流域时参数仍呈现动态变化和空间异质性<sup>[38]</sup>。比如当把九洲流域率定期的最优参数组合用于验证期时，存在某场次洪水洪峰流量相对误差较大。此外，虽然岳城流域和九洲流域同属于东江，但率定参数有一定的差别。因此，在时空变换情况下参数如何更好地取值仍有待探讨。

最后，改进 GUH 模型的结构相对简单，对降雨损失、前期流量和地表汇流的求解采取了简化方法。这种简化在提升计算效率和减少参数方面具有优势，但单一模型结构在刻画真实流域的水文过程时可能存在不充分性<sup>[39]</sup>，今后将把改进 GUH 模型与其他模型耦合，进一步提高模型预报的精度。

## 3 结论

本文以东江支流岳城流域、九洲流域为研究区域，构建了综合考虑降雨损失和降雨前期流域流量的改进 GUH 模型，并结合 MOPSO 参数优化算法，在不同预见期、不同模型下对改进 GUH 模型在洪水

预报中的适用性进行评估。结论如下:

a. 在预见期为 1h 的场次洪水预报中, 改进 GUH 模型在两个流域的合格率均值、确定性系数均值 (87.12%、0.82) 优于汇流采用 Nash 单位线的组合 2 (69.70%、0.81)、产流采用 SCS-CN 模型的组合 3 (47.35%、0.55), 具有更好的预报效果;

b. 改进 GUH 模型表现出良好的预报精度。预见期为 1h 时, 岳城流域、九洲流域的洪水预报都达到了乙等预报水平, 确定性系数均值分别为 0.79、0.84, 洪量合格率分别为 90.91%、83.33%, 洪峰流量合格率分别为 90.91%、91.67%, 峰现时间合格率均为 100%;

c. 改进 GUH 模型的预报精度随着预见期的增加逐渐下降, 但在没有实时降雨和流量数据输入的情况下, 当预见期小于 4h 时仍能保持一定的预测水平。

综上所述, 改进 GUH 模型在岳城流域、九洲流域的应用为我国中小流域的洪水预报提供了一种简单而相对准确的方法。尽管改进 GUH 模型目前的预报精度仍不及复杂水文模型、深度学习概率模型, 但与之相比, 改进 GUH 模型对参数和庞大基础数据的需求较少, 不需要分析产流过程与划分水源, 仅需降雨径流数据以及三个参数, 使得洪水预报更为简便。但是本文对模型参数与降雨特征、流域特征之间的相关关系仍不够深入, 在时空变化情况下参数如何更好地取值仍有待探讨, 今后也将把改进 GUH 模型与多模型耦合, 提高洪水预报的精度。

## 4 参考文献

- [1] Liu CJ, Guo L, Ye L et al. A review of advances in China's flash flood early-warning system. *Natural Hazards*, 2018, 92(2): 619-634.
- [2] Luo S, Xu YP, Wang Q et al. The evolution of annual maximum daily runoff and its influencing factors under the background of urbanization: An example of Qinhuai River Basin in the lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(6): 2123-2132. [罗爽, 许有鹏, 王强, 等. 城市化背景下年最大日径流演变及影响因素研究——以长江下游秦淮河流域为例. *湖泊科学*, 2023, 35(6): 2123-2132.]
- [3] Kotz M, Levermann A, Wenz L. The effect of rainfall changes on economic production. *Nature*, 2022, 601(7892): 223-227.
- [4] Li WX, Jiang ML, Xu LG et al. Spatial and temporal characteristics of phytoplankton in Lake Poyang and its response to extreme flood and drying events. *Journal of Lake Sciences*, 2024: 1-15. [李文轩, 蒋名亮, 徐力刚等. 鄱阳湖浮游植物时空变化特征及其对极端洪枯事件的响应. *湖泊科学*, 2024: 1-15.]
- [5] Ding MM, Li L, Gong LQ et al. Combined influence of extreme flooding-induced water level increase and N and P inputs on the submerged macrophyte *Vallisneria natans*. *Journal of Lake Sciences*, 2024: 1-12. [丁明明, 黎磊, 龚磊强等. 极端洪水导致的湖泊水位抬升和氮磷输入增加对苦草 (*Vallisneria natans*) 的复合影响. *湖泊科学*, 2024: 1-12.]
- [6] Tellman B, Sullivan J A, Kuhn C et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 2021, 596(7870): 80-86.
- [7] Rentschler J, Avner P, Marconcini Ma et al. Global evidence of rapid urban growth in flood zones since 1985. *Nature*, 2023, 622(7981): 87-92.
- [8] Kreibich H, Loon AFV, Schröter K et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. *Nature*, 2022, 608(7921): 80-86.
- [9] Zhai XY, Guo L, Liu RH et al. Development and Application of China Flash Flood Hydrological Model: Case Study in Small and Medium-sized Catchments of Anhui Province. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(5): 1018-1036. [翟晓燕, 郭良, 刘荣华等. 中国山洪水文模型研制与应用: 以安徽省中小流域为例. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(5): 1018-1036.]
- [10] Wang RK, Lian JJ, Yuan XM et al. Torrential flood risk assessment in small watershed based on Particle Swarm Optimization Vector Machine. *Water Resources Protection*, 2023: 1:13. [王如锴, 练继建, 苑希民, 等. 基于 PSO-SVM 的小流域山洪风险评价方法研究. *水资源保护*, 2023: 1:13.]

- [11] Wu YT, Li ZJ, Qi ZY et al. Design flood calculation of watershed with lack of data based on hydrological model. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2023, 51(6): 1-8+17.[吴勇拓, 李致家, 戚振亚, 等. 基于水文模型的缺资料流域设计洪水计算. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 1-8+17. ]
- [12] Sherman LK. The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage-basins. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1932, 13(1): 332-339.
- [13] Nash J, Sutcliffe J. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, 10: 282-290.
- [14] Rodríguez-Iturbe Ignacio, VALDÉS Juan B. The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resources Research*, 1979, 15(6): 1409-1420.
- [15] Gupta Vijay K, Waymire Ed, Wang CT. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resources Research*, 1980, 16(5): 855-862.
- [16] Rodríguez-Iturbe Ignacio, GONZÁLEZ-SANABRIA Marcelo, BRAS Rafael L. A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph. *Water Resources Research*, 1982, 18(4): 877-886.
- [17] Yi B, Chen L, Zhang H et al. A time-varying distributed unit hydrograph method considering soil moisture. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(20): 5269-5289.
- [18] Guo J. General and Analytic Unit Hydrograph and Its Applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2022, 27(2): 04021046.
- [19] Guo J. General Unit Hydrograph from Chow's Linear Theory of Hydrologic Systems and Its Applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2022, 27(10): 04022020.
- [20] Guo J. Application of General Unit Hydrograph Model for Baseflow Separation from Rainfall and Streamflow Data. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2022, 27(11): 04022027.
- [21] Guo J. Design Hydrographs in Small Watersheds from General Unit Hydrograph Model and NRCS-NOAA Rainfall Distributions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2023, 28(5): 04023014.
- [22] Cai H, Wang Y, Zhao T et al. A general unit hydrograph distribution and its application on the marginal distribution of global wind speed. *Sustainable Horizons*, 2023, 6: 100056.
- [23] Xu Y, Liu C, Yu Q et al. Study on a Hybrid Hydrological Forecasting Model SCE-GUH by Coupling SCE-UA Optimization Algorithm and General Unit Hydrograph. *Water*, 2023, 15(15): 2783.
- [24] Sun ZL, Liu YL, Chen X, et al. Review of Hydrological Model Parameter Regionalization Method. *Journal of China Hydrology*, 2023, 43(4): 1-7.[孙周亮, 刘艳丽, 陈鑫, 等. 水文模型参数区域化方法研究进展. 水文, 2023, 43(4): 1-7. ]
- [25] Hou DR, Zhang YW, Wang JX, et al. Study on Parameter Estimation Method of Nash Instantaneous Unit Line in Ungauged Basin. *Journal of China Hydrology*, 2023, 43(6): 8-13.[侯东儒, 张怡雯, 王金星, 等. 无资料地区 Nash 瞬时单位线参数推求方法探究. 水文, 2023, 43(6): 8-13. ]
- [26] Wang HJ, Zhang JY, Wang GQ, et al. Relationships between climate, underlying surface and runoff yield and flow concentration processes in China's middle and small rivers. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(1): 109-120.[王怀军, 张建业, 王国庆, 等. 中国中小河流气候和下垫面与产汇流过程关系研究. 地理科学, 2021, 41(1): 109-120. ]
- [27] Ding YD, Jiang ML, Xu LG, et al. Flood forecasting method for reservoirs based on WOA-LSTM. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(1): 320-332.[丁艺鼎, 蒋名亮, 徐力刚, 等. 基于鲸鱼优化算法的长短期记忆模型水库洪水预报. 湖泊科学, 2024, 36(1): 320-332. ]
- [28] Xiang X, Ao TQ, Xiao XT. Comparative Study of Typical Parameter Optimization Algorithms in Xin'anjiang Model. *Journal of China Hydrology*, 2023, 43(3): 16-22.[向鑫, 敖天其, 肖钦太. 典型参数优化算法在新安江模型中的应用对比. 水文, 2023, 43(3): 16-22.]
- [29] Du YZ, Sun MY, Liu JY et al. Multi-objective Optimization of Parameters of Vertical Mixed Runoff Model Based on MOPSO Algorithm. *Water Resources and Power*, 2019, 37(6): 23-27. [杜彦臻, 孙梦瑶, 刘伽伊, 等. 基于 MOPSO 算法的垂向混合产流模型参数多目标优化. 水电能源科学, 2019, 37(6): 23-27.]

- [30] Feng Q, Li Q, Quan W et al. Overview of multiobjective particle swarm optimization algorithm. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(6): 745-753. [冯茜, 李擎, 全威, 等. 多目标粒子群优化算法研究综述. 工程科学学报, 2021, 43(6): 745-753.]
- [31] Chen YB, Zhu DH. Optimal Parameter Calibration Method and Its Application of Xin'anjiang Model for Small Basin Flood Forecasting. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005(3): 93-96. [陈洋波, 朱德华. 小流域洪水预报新安江模型参数优选方法及应用研究. 中山大学学报(自然科学版), 2005(3): 93-96.]
- [32] GB/T22482-2008,水文情报预报规范. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [33] Ye QL, Wang WL, Wang Z. Survey of multi-objective particle swarm optimization algorithms and their applications. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2024, 58(6): 1107-1120, 1232.[叶倩琳, 王万良, 王铮. 多目标粒子群优化算法及其应用研究综述. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(6): 1107-1120, 1232.]
- [34] Chen L, Xu J, Wang G et al. Influence of rainfall data scarcity on non-point source pollution prediction: Implications for physically based models. *Journal of Hydrology*, 2018, 562: 1-16.
- [35] Chen L, Xu J, Wang G et al. Comparison of the multiple imputation approaches for imputing rainfall data series and their applications to watershed models. *Journal of Hydrology*, 2019, 572: 449-460.
- [36] Tan ML, Yang XY. Effect of rainfall station density, distribution and missing values on SWAT outputs in tropical region. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124660.
- [37] Xu YY, Wang JX, Hou DR et al. Applicability Analysis of Generalized Unit Hydrograph in Flash Flood Simulation. *Journal of China Hydrology*, 2024, 44(1): 9-16.[许莹莹, 王金星, 侯东儒, 等. 广义单位线在山洪模拟中的适用性分析. 水文, 2024, 44(1): 9-16.]
- [38] Zhang J, Ma JF, Ma M. Research Process on Uncertainty of Watershed Hydrological Model. *Yellow River*, 2022, 44(7): 30-36, 43.[张京, 马金锋, 马梅. 流域水文模型不确定性研究进展. 人民黄河, 2022, 44(7): 30-36, 43.]
- [39] Liu S, She DX, Zhang LP et al. Impact of discharge data error on hydrologic modelling uncertainty estimation. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(1): 1-7.[刘松, 余敦先, 张利平, 等. 流量数据误差对水文模拟不确定性分析的影响. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(1): 1-7.]