

练迪, 王京晶, 王宁. 缺资料流域中小河流洪水预报研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 244-249.

LIAN Di, WANG Jingjing, WANG Ning. Flood forecasting for small and medium-sized rivers in ungauged basins[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 244-249.

# 缺资料流域中小河流洪水预报研究

练迪<sup>1</sup>, 王京晶<sup>2</sup>, 王宁<sup>3</sup>

(1. 广东省水文局广州水文分局, 广东 广州 510150; 2. 广东省水文局, 广东 广州 510150;  
3. 广东省水文局清远水文分局, 广东 清远 511800)

**摘要:** 缺资料流域中小河流洪水预报研究是目前水文研究的重难点问题。以广州市派潭河流域为目标流域, 分别采用综合单位线法和水文相似参数移植法进行水文预报研究, 其中参数移植法将西福河流域作为参证流域, 基于西福河和派潭河流域地形指数频率分析结果, 表明两流域具有水文相似性, 将参证流域新安江模型参数直接移植到目标流域进行洪水模拟预报。对比分析两种方法在目标流域洪水模拟情况, 结果表明基于新安江模型的参数移植法需要较多参证流域和目标流域的水文地理资料, 较综合单位线法整体预报精度更高。综合单位线法所需的水文地理资料较少, 整体精度较低, 但随着洪水量级增大, 预报精度会显著提高。并综合以上两种方法的适用条件和应用效果, 提出一种缺资料中小河流的洪水预报方法。

**关键词:** 水文相似性; 地形指数; 参数移植; 综合单位线法; 新安江模型

**DOI:** 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S1.038

**中图分类号:** TV212

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0860(2025)S1-0244-06

## Flood forecasting for small and medium-sized rivers in ungauged basins

LIAN Di<sup>1</sup>, WANG Jingjing<sup>2</sup>, WANG Ning<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Hydrology Branch, Hydrological Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510150, Guangdong, China;  
2. Hydrological Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510150, Guangdong, China; 3. Qingyuan Hydrology Branch,  
Hydrological Bureau of Guangdong Province, Qingyuan 511800, Guangdong, China)

**Abstract:** The study of flood simulation and forecasting for small and medium-sized rivers with insufficient data is a key and difficult problem in hydrological forecasting research. Paitan River Basin in Guangzhou was taken as the target basin, and the synthetic unit hydrograph method and the hydrological similarity parameter transplantation method were applied for hydrological simulation and forecasting research. In the hydrological similarity parameter transplantation method, the Xifu River Basin is used as the reference basin. Based on the terrain index frequency analysis result of the Xifu River and Paitan River basins, it is considered that the two basins have hydrological similarity. The Xinanjiang model parameters of the reference basin are directly transplanted to the target basin for typical flood simulation and forecasting. The flood simulation result of the above two method in the target basin are compared and analyzed with the measured flood data. The result show that the parameter transplantation method based on the Xinanjiang model requires more hydrological and geographical data from the reference basin and the target basin, and has higher overall forecasting accuracy than the synthetic unit hydrograph method. The synthetic unit hydrograph

**收稿日期:** 2024-08-21

**基金项目:** 广东省水利科技创新项目(2025-23)

**作者简介:** 练迪(1991—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 422563264@qq.com

**通信作者:** 王京晶(1997—), 男, 硕士, 主要从事城市水文学研究。E-mail: wangjingjing@mail.bnu.edu.cn

method requires less hydrological and geographical data and has lower overall accuracy, but as the flood magnitude increases, the forecasting accuracy will significantly improve. Based on the applicability conditions and application effects of the above two method, a flood forecasting method for small and medium-sized rivers with insufficient data is proposed.

**Keywords:** Hydrological similarity; Terrain index; Parameter transplantation; Synthetic unit hydrograph; Xinjiang model

## 0 引言

随着经济社会的高速发展,洪水预报的任务也由大江大河延伸至中小流域,同时气候变化和强人类活动导致水文系列的一致性遭到严重破坏,缺资料流域的精准水文预报继而成为近年来水文预报的重难点问题<sup>[1]</sup>。目前缺资料地区的水文预报方法常见的有综合单位线法、水文相似理论的参数移植法等<sup>[1-2]</sup>。王国安等<sup>[3]</sup>对广东省综合单位线的基本原理和适用条件进行了分析研究,张徐杰等<sup>[4]</sup>以深圳茅洲河流域为例,对广东省综合单位线的适用性进行验证。基于水文相似理论的参数移植法主要是结合水文模型、遥感技术、应用统计等,通过寻找流域间水文相似性特征,构建有资料区域水文模型,并将其经率定后的参数移用到与该区域相似的缺资料流域并进行水文模拟预报<sup>[5]</sup>。目前主要的水文相似概念有3种,分别是地形指数特征相似、水文响应相似和地貌与瞬时单位线的关系相似<sup>[6]</sup>。金亦等<sup>[7]</sup>认为地形指数相似则流域水文相似,分析了地形指数与流域退水指数之间的关系。姚成等<sup>[2]</sup>将新安江模型的参数移植至地形指数分布曲线相似的流域进行水文模拟预报,结果表明参数移植应用效果较好。赵文举等<sup>[8]</sup>结合SWAT模型,将参证流域的模型参数移植至目标流域进行径流模拟,模拟结果满足精度要求。但是目前大多数研究局限于单一方法的应用探讨,缺乏对综合单位线法和基于水文相似理论的参数移植法适用性分析研究。

本文以广州市增江支流派潭河流域为例,分别应用综合单位线法和基于新安江模型的参数移植法对多场次历史典型洪水预报研究。其中参数移植法以派潭河流域为目标流域,以西福河流域作为参证流域,提取该流域地形指数栅格数据并进行频率统计分析,进而判断两流域间水文相似性。结合参证流域实测水文资料率定新安江模型参数,并直接移植至目标流域新安江模型,模拟目标流域洪水过程。并分析以上两种方法预报的精度和适用性,以期对缺资料地区水文模拟预报提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 地形指数

地形指数  $\ln(\alpha/\tan\beta)$  由 Kirkby 和 Weyman 等率先

提出,当流域以栅格数字高程模型表示时, $\alpha$ 为通过单位等高线长度进入网格单元的汇水面积, $\tan\beta$ 为网格单元的坡度。地形指数反映了径流在流域中任一点的累积趋势(以 $\alpha$ 表示)以及重力使径流顺坡移动的趋势(以 $\tan\beta$ 表示)。该地形指数常被用来作为一个水文相似指数,认为所有具有相同地形指数值的点对降雨具有相同的水文响应,因此通常认为具有相同地形指数频率分布的流域具有水文相似性。地形指数的具体原理与计算方法详见文献[9],此处不再赘述。

### 1.2 综合单位线

广东省综合单位线目前广泛应用于解决广东省内水文资料短缺中小流域的设计洪水计算问题<sup>[10-12]</sup>。该方法通过对纳希瞬时单位线方法的延伸拓展,并汲取国内外经验,提出的一套具有广东地理特色的综合单位线法,选用集水面积为2.30~950 km<sup>2</sup>的50个水文站共639场雨洪过程对资料分析综合而成的。具体公式及原理可详见《广东省暴雨径流查算图册》。

### 1.3 新安江模型

三水源新安江模型是蓄满产流的概念模型。模型原理是将流域分为若干个单元,再将每个单元计算的流量过程演算到流域出口,最后叠加起来即为整个流域的流量过程<sup>[13-15]</sup>。新安江模型主要参数有15个,一般分为四类,分别是蒸散发参数、产流参数、水源划分参数、汇流参数。所有参数都具有明确的物理意义和定义,并且参数都有其合理的取值范围,模型涉及的参数及经验取值范围如表1所列。

### 1.4 参数率定

采用流域出口断面实测流量过程资料来率定模型,应用单纯形法<sup>[16]</sup>来调整新安江模型参数,目标函数为确定性系数。公式如下

$$R^2 = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [Q_{obs,i} - Q_{sim,i}]^2}{\sum_{i=1}^N [Q_{obs,i} - Q_{obs}]^2} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, $Q_{obs}$ 为实测流量数据; $Q_{sim}$ 为模拟流量数据。

## 2 流域概况

选择广州市派潭河流域作为目标流域,西福河流域作为参证流域,流域及站点分布如图1所示,两流

表 1 新安江模型参数及意义

参 数	意 义	用 途	参 考 范 围
一、蒸散发参数			
CKE	蒸散发能力折算系数	控制总水量平衡	0.01~1.5
X	上层蓄水容量系数		0~1
Y	下层蓄水容量系数		0~1
C	深层蒸散发系数	深根植物面积比率	0.01~0.2
二、产流量参数			
WM	流域蓄水容量	流域干湿程度指标	80~280 mm
B	蓄水容量曲线指数	反映流域蓄水容量不均匀	0~0.5
CIMP	不透水面积比率		0~0.1
三、水源划分参数			
SM	流域平均自由水蓄水容量	决定地面径流	10~80 mm
EX	自由水蓄水容量曲线指数	表征自由水蓄量不均匀性	1~2
CI	壤中流出系数		0~1
CG	地下水流出系数		0~1
四、汇流参数			
CKI	壤中流消退系数		0~1
CKG	地下径流消退系数		0~1
CN	流域调蓄能力	影响洪峰胖瘦	
CNK	线性水库	影响洪峰的时间	

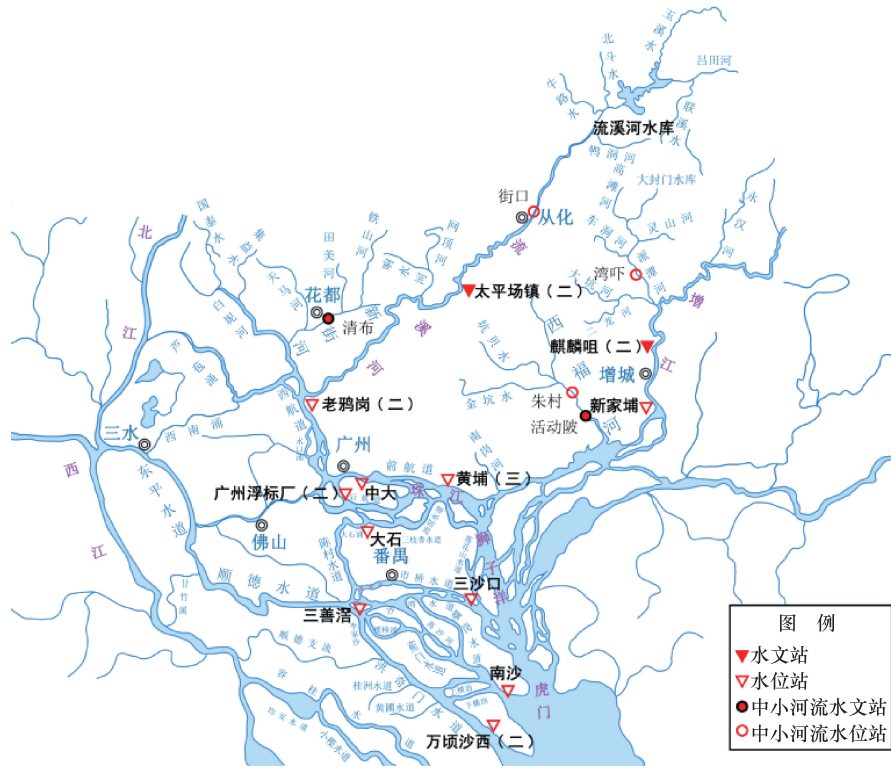


图 1 广州市水文站点分布

域地理位置相邻,均属于增江一级支流区域,气候特征相似,多年平均降雨量约 1 900 mm,且降雨主要集中在 3 至 9 月,洪水暴涨陡落,峰高量大。西福河流域集水面积为 598 km<sup>2</sup>,比降 0.91‰,河长 55 km,流域内设有朱村、活动陂水文站。派潭河集雨面积 303 km<sup>2</sup>,比降 5.45‰,河长 38 km,流域内设有湾吓水文站。水文站均有近年来的洪水过程资料,本文假定派潭河为缺资料流域,模拟派潭河流域洪水过程。

### 3 综合单位线法应用分析

根据目标流域集水面积、比降及河长等河流特征,设计计算时段  $\Delta t = 3 \text{ h}$ ,单位线滞时  $m_1 = 4.3$ ,目标流域综合单位线如图 2 所示。根据广东省综合单位线法,模拟目标流域 2019—2023 年的 5 场暴雨洪水过程结果如图 3 所示。综合单位线预报洪峰流量与实测洪峰流量对比如图 4 所示,从图中可以看出综合单位线法整体预报精度不高,实测流量 167 m<sup>3</sup>/s 时误差最大可达到 300%,实测流量 911 m<sup>3</sup>/s 时误差最小为 12%,且呈现洪峰流量越大误差越小的趋势。因此,综合单位线法对于无资料地区中小流域较大洪水的预报可作为有效参考。

### 4 参数移植法应用分析

#### 4.1 流域相似性识别

基于数字高程模型(DEM)提取目标流域和参证流域的地形指数栅格数据如图 5 所示,并进行地形指数频率统计分析,结果如图 6 所示。两流域的地形指数频率分布相似度较高,可认为两流域具有较佳的水文相似性。

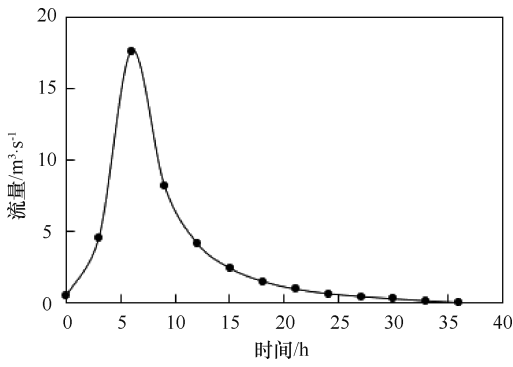
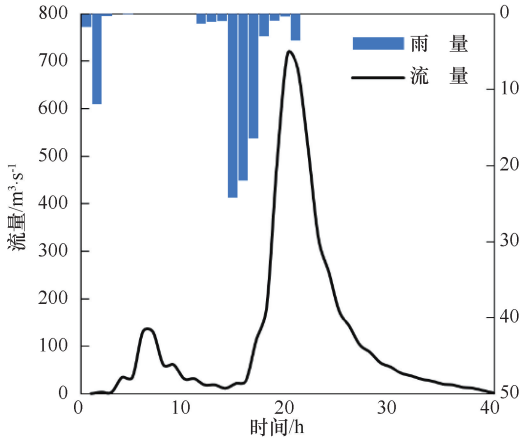
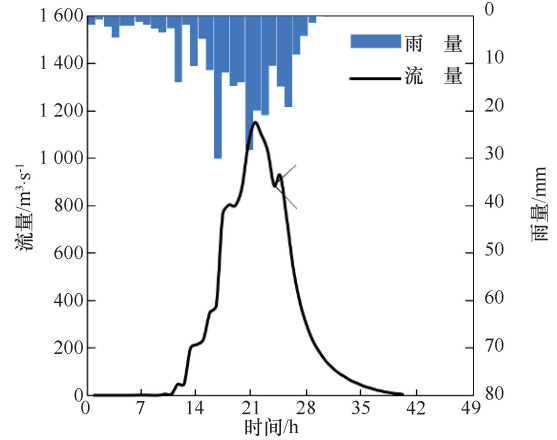


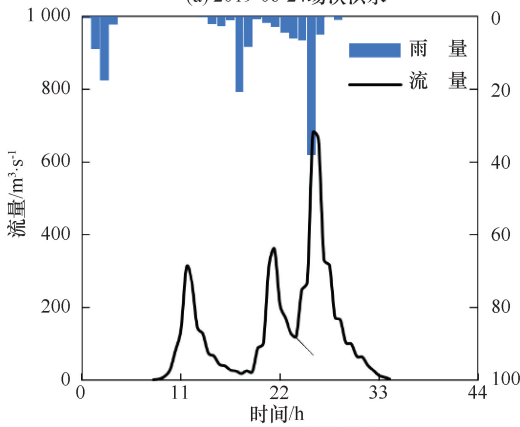
图2 目标流域单位线



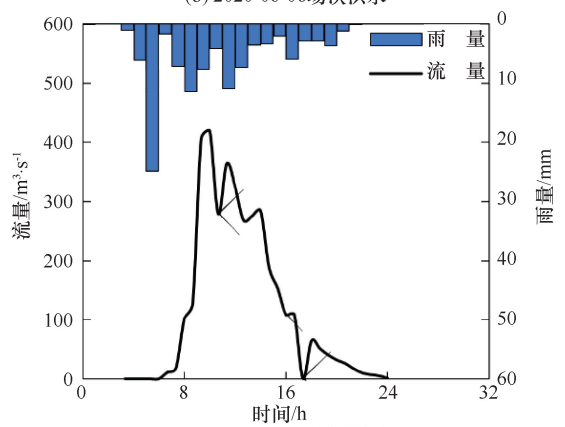
(a) 2019-06-24场次洪水



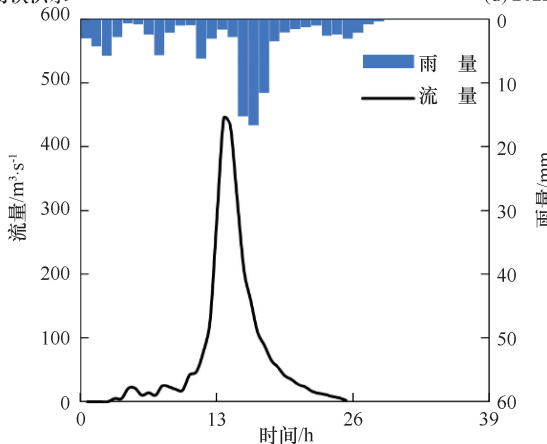
(b) 2020-06-08场次洪水



(c) 2021-08-09场次洪水



(d) 2022-06-09场次洪水



(e) 2023-09-08场次洪水

图3 目标流域5场洪水模拟预报结果

## 4.2 新安江模型参数率定

基于单纯形法展开新安江模型参数率定, 选取参证流域历史实测洪水过程进行率定, 获取最优新安江模型参数, 如表2所列。对预报洪水过程和实测洪水过程的洪峰流量、峰现时间、洪水总量、确定性系数进行对比分析。结果可知, 根据公式(1)计算预报洪水的确定性系数大于0.6的达到83%, 表明率定的新安江模型效果较好。

## 4.3 参数移植结果分析

将参证流域的新安江水文模型参数移植到目标流

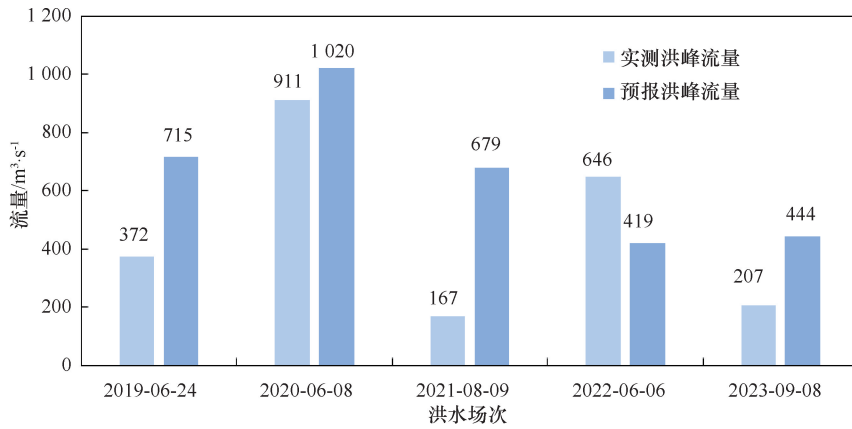


图4 综合单位线法预报洪峰与实测洪峰对比

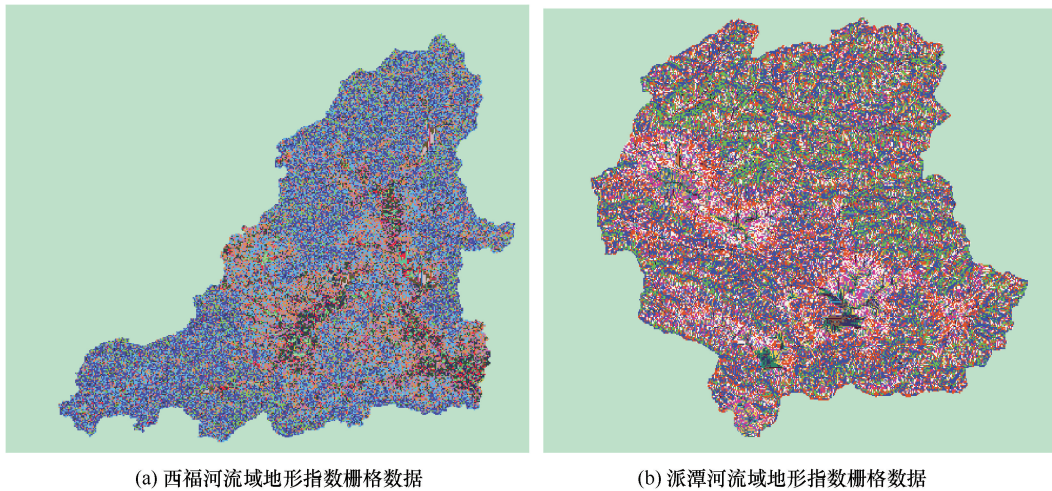


图5 流域地形指数栅格数据

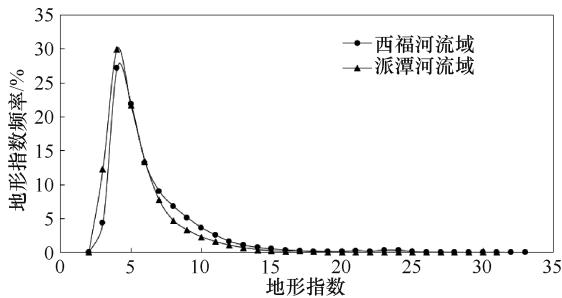


图6 地形指数频率对比图( $\ln(\alpha / \tan \beta)$ )

域, 对比分析目标流域实测洪峰流量资料和模拟计算结果, 统计洪峰流量和峰现时间的误差。结果表明, 近3年来洪水预报峰现时间均在许可误差内, 洪峰流量预报范围从  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  至  $640 \text{ m}^3/\text{s}$ , 相对误差均在30%内, 2场洪水相对误差小于20%, 基本可为目标流域的洪水预报提供参考。

#### 4.4 缺资料地区洪水预报方法

基于以上2种预报方法的适用情况及预报精度,

表2 新安江模型率定参数

CKE	X	Y	C	WM	B	CIMP	SM	EX	CG	CI	CKI	CKG	CN	CNK
0.1	0.1	0.1	0.15	100	0.3	0.1	12	1.3	0.04	0.02	0.914	0.914	1.649	1.844

表3 参证流域新安江模型预报结果精度统计

洪号	实测洪峰流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	计算洪峰流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	相对误差/%	峰现时间误差/h	确定性系数
20190528	233	299	28.236	0	0.636
20190601	160	151	5.625	3	0.808
20190611	294	296	0.680	0	0.894
20190624	410	529	29.024	3	0.707
20200522	457	769	68.271	6	0.448
20200608	264	280	6.061	3	0.695

表4 目标流域新安江模型预报结果精度统计

洪号	实测洪峰流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	计算洪峰流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	相对误差/%	峰现时间误差/h
20220614	646	475	26.471	3
20230507	69.8	80.6	15.473	0
20230820	119	150	26.050	3
20240428	304	316	3.947	3
20240520	242	310	28.099	3

提出一种缺资料地区的洪水预报方法。

(1) 获取流域基础信息资料。收集流域各项地理参数(包括流域的集水面积、干流河长坡降、平均高程等地理信息)、水文站点布设监测情况、相似流域水文气象基础信息等。

(2) 根据水文资料选取预报方法。针对仅获取部分地理参数的缺资料流域,综合单位线法仅适用于较大洪水预报;针对有相似流域地理参数和水文资料的缺资料流域,可采用水文相似参数移植法用于洪水预报。

(3) 流域相似性判定。结合该流域及邻近流域的水文、气象信息,初步寻找相似流域。根据提取的两个流域的地形指数栅格数据进行频率统计分析,进而判断其水文相似性,确定参证流域。

(4) 水文相似参数移植法应用。根据参证流域历史资料率定新安江模型参数,直接移用到目标流域开展洪水预报。

## 5 结论

(1) 基于新安江模型的参数移植法较综合单位线法精度更高,随着参证流域实测资料的增多,新安江模型的参数可进一步优化,能有效提高预报精度。但是综合单位线法所需的地理资料较少,且在洪水量级较大时,误差较小,可用于缺资料地区较大洪水预报。

(2) 本文根据综合单位线法和新安江模型参数移植法的洪水预报精度和应用条件,提出一种缺资料中小河流预报的方法,说明了预报方法的选取及洪水预报的步骤,为缺资料地区的洪水预报提供参考。

(3) 地形指数分布曲线的相似性可作为流域参数移植的标准。通过对比流域间的地形指数分布曲线,可将与缺资料流域地形指数分布曲线相似度高的流域作为参证流域,并将参证流域率定的新安江模型参数

直接移植到缺资料流域进行水文预报。但目前基于地形指数分布曲线的相似性研判水文相似性定性判断,未来仍需深入研究水文相似性的定量判断标准,寻找最佳参证流域,提高模拟预报精度。

## 参考文献:

- [1] 夏军,谈戈. 无资料地区水文研究的途径探讨[C]//中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室. 水问题的复杂性与不确定性研究与进展: 第二届全国水问题研究学术研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 109-115.
- [2] 姚成,章玉霞,李致家,等. 无资料地区水文模拟及相似性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 108-113.
- [3] 王国安,贺顺德,李超群,等. 论广东省综合单位线的基本原理和适用条件[J]. 人民黄河, 2011, 33(3): 15-18.
- [4] 张徐杰,程开宇,岳青华,等. 广东省综合单位线在深圳茅洲河流域的应用与评价[J]. 水利水电快报, 2019, 40(5): 21-26.
- [5] RAGETTLI S, ZHOU J, WANG H, et al. Modeling flash floods in ungauged mountain catchments of China: A decision tree learning approach for parameter regionalization [J]. Journal of Hydrology, 2017, 555: 330-346.
- [6] 孙周亮,刘艳丽,舒章康,等. 水文相似理论研究进展[J]. 水利水电工程学报, 2023(3): 155-164.
- [7] 金亦,张文平,刘金涛,等. 地形指数与流域退水特征的关系分析[J]. 人民长江, 2017, 48(13): 23-25.
- [8] 赵文举,孙伟,李宗礼,等. 石羊河流域无观测资料地区径流模拟[J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(3): 70-75.
- [9] 孔凡哲,芮孝芳. 基于地形特征的流域水文相似性[J]. 地理研究, 2003(6): 709-715.
- [10] 广东省水利电力厅. 广东省暴雨径流查算图表使用手册[R]. 广州: 广东省水文总站, 1991.
- [11] 朱汝雄,刘霞,潘玉敏. 黄冈大堤设计洪水推算[J]. 甘肃水利水电技术, 2006(3): 253-254.
- [12] 马旭民,林凯荣,郭伟建,等. 城市化背景下广东省综合单位线法的评估与修正[J]. 中国农村水利水电, 2024(1): 142-149.
- [13] 石朋,丁松,司伟,等. 新安江模型敏感参数动态变化规律研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024(5): 1-8.
- [14] 李德清,石彬,李致家,等. 五强溪流域相似性研究及参数移植分析[J]. 水力发电, 2024, 50(4): 4-9.
- [15] 李致家,张珂,王栋,等. 现代水文模拟与预报技术[M]. 南京: 河海大学出版社, 2021.
- [16] 丁杰,何建华,谢红英. 基于单纯形法的新安江次洪模型的参数优化研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(11): 18-20.

(责任编辑 王海锋)