

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20212388

# 基于地貌单位线汇流的新安江模型在洛阳河流域中的应用

钟 粟,汪院生,秦 灏,刘 鹏,沙 鹏,夏 熙,闵 勇

(江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司,江苏 苏州 215000)

**摘要:** 针对无资料地区的洪水预报和设计洪水计算常受到降雨流量等资料制约的问题,以洛阳河流域无资料地区为例,通过 DEM 数据提取洛阳河流域霍顿地貌参数,计算洛阳河流域地貌单位线,从而建立起流域汇流与地貌参数之间的响应关系,并采用三层蒸散发和蓄满产流模型,构建基于地貌单位线汇流的新安江模型,同时结合遗传算法和客观优选法思路对洛阳河流域洪水进行模拟演算,并与传统的新安江模型结果进行对比分析。结果表明,基于地貌单位线汇流的新安江模型能取得较理想的模拟结果,可为中小河流无资料地区的水文分析计算提供可靠的技术支撑。

**关键词:** 客观优选法;地貌单位线;霍顿地貌参数;新安江模型;遗传算法

**中图分类号:** TV122<sup>+</sup>.1; P338

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)01-0014-04

## 1 概况

洛阳河流域位于太湖流域湖西茅山山区低矮丘陵地,是通胜地区骨干河道通济河的上游重要山区,平均高程 45 m,面积 147 km<sup>2</sup>,全年平均气温 15 ℃,年平均降水量 1 107.9 mm,主要水系有洛阳胜利河、光明河、靡市河等。洛阳河流域基本属于无资料地区,实测洪水资料匮乏。新安江模型<sup>[1]</sup>是我国最具代表性的概念性水文模型,在我国洪水预报中已取得广泛应用。将新安江模型用于流域洪水模拟和预报时,汇流阶段常采用线性水库或滞后演算法,其参数在很大程度上依赖于实测水文资料,且模型模拟效果对参数取值十分敏感,对于无资料地区水文模拟应用往往效果不佳,目前量化研究线性水库或滞后演算法的参数与地貌特征之间关系的方法尚不成熟,存在较大不确定性。当降雨条件一定时,流域汇流响应主要受流域大小、形状、水系分布、地形坡度等地形地貌特征的影响。RODRIGUEZ-ITURBE I 等<sup>[2,3]</sup>认为在流域瞬时注入分布均匀的降雨是由诸多微小的且呈弱相关关系的雨滴组成,并应用统计物理学方法证明了流域瞬时单位线与雨滴汇流时间的概率密度函数相等价,从而创建了地貌单位线(GIUH)理论,从地貌学角度解释了流域

汇流响应机理,为无资料地区水文汇流研究提供了新的方法。文康等<sup>[4]</sup>利用地貌单位线对水文资料依赖性少的特点,将其应用于浙江省小水电站网规划研究中;芮孝芳<sup>[5]</sup>通过流路长度分布律和坡度分布律确定地貌单位线,并将其应用于沿渡河流域中,效果较好;吴志勇等<sup>[6]</sup>结合地貌单位线和 VIC 模型产流原理应用于中小水库预报,结果具有较高精度;童冰星等<sup>[7]</sup>采用基于地貌单位线的汇流模型在陈河流域的模拟演算取得理想结果。为此,本文考虑到洛阳河流域观测站网偏稀,次洪流量资料匮乏,通过地貌单位线建立流域汇流与地貌因子关系,构建了基于地貌单位线汇流的新安江模型模拟分析洛阳河流域洪水,以期为中小河流无资料地区洪水预报模拟提供技术支撑。

## 2 资料来源及研究方法

### 2.1 资料来源

雨量资料、流量资料和蒸发资料源于江苏省水文水资源勘测局。其中雨量资料采用东昌街雨量站 2016~2017 年实测 5 场洪水逐时降水量;流量资料采用 2016~2017 年实测 5 场洪水逐时流量;蒸发资料由于该流域内无蒸发站,采用临近小河新闸 2016~2017 年逐日水面蒸发量(E601 型),由于模型计算运行时段为 1 h,需将蒸发量按照

收稿日期: 2021-09-15,修回日期: 2022-04-05

基金项目: 江苏省水利科技项目(2015007,2017016)

作者简介: 钟粟(1990-),男,硕士、工程师,研究方向为水文预报与水文模型,E-mail:1085313168@qq.com

5 场洪水发生时间线性插值换算成逐小时资料。

## 2.2 模型简介

### 2.2.1 霍顿定律

(1)河数定律。令水系中  $\omega$  级河道的数目为  $N_\omega$  条,  $\omega=1, 2, \dots, \Omega$ ,  $\Omega$  为水系中最高级河流的级。水系中  $\omega$  级河流数目  $N_\omega$  与高一级即  $(\omega+1)$  级河流总数目  $N_{\omega+1}$  的比值称为分叉比, 用  $R_B$  表示, 对于自然水系,  $R_B$  近似为一个常数。即:

$$R_B = N_\omega / N_{\omega+1} \quad \omega = 1, 2, \dots, \Omega \quad (1)$$

(2)面积定律。水系中  $\omega$  级河流的平均流域面积  $\overline{A_\omega}$  与低一级即  $(\omega-1)$  级河流平均流域面积  $\overline{A_{\omega-1}}$  的比值称为面积比, 用  $R_A$  表示, 对于自然水系,  $R_A$  近似为一个常数。即:

$$R_A = \overline{A_\omega} / \overline{A_{\omega-1}} \quad \omega = 2, 3, \dots, \Omega \quad (2)$$

(3)河长定律。水系中  $\omega$  级河流的平均长度  $\overline{L_\omega}$  与低一级即  $(\omega-1)$  级河流平均流长度  $\overline{L_{\omega-1}}$  的比值称为河长比, 用  $R_L$  表示, 对于自然水系,  $R_L$  近似为一个常数。即:

$$R_L = \overline{L_\omega} / \overline{L_{\omega-1}} \quad \omega = 2, 3, \dots, \Omega \quad (3)$$

### 2.2.2 地貌单位线

地貌单位线是以 Horton-Strahler 河流分级理论<sup>[8]</sup>为基础, 借用统计物理学处理大量“粒子”运动宏观表现的方法来建立。1979 年, RODRIGUEZ-ITURBE I 等<sup>[2]</sup>利用概率论研究流域上水滴的运动, 推导出地貌单位线公式:

$$u(t) = f_B(t) = \sum_{s \in S} f_{x_1} f_{x_2} \dots f_{x_k}(t) p(s) \quad (4)$$

式中,  $f_{x_k}(t)$  为水滴从一个状态转移到下一个状态的滞留时间概率密度函数;  $p(s)$  为水滴路径概率函数;  $s$  为某条路径, 由状态  $x_1, x_2, \dots, x_k$  按流域汇流物理顺序集合而成;  $S$  为路径的集合, 记作  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{2\Omega-1}\}$ ,  $\Omega$  为流域的级别。

$f_{x_k}(t)$  采用指数函数进行拟合。即:

$$f_{x_i}(t) = e^{-t/K_i} / K_i \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

其中  $K_i = L_i / V$  (6)

式中,  $K_i$  为水滴在状态  $x_i$  的平均滞留时间;  $i$  为河流级别;  $L_i$  为第  $i$  级河流河长;  $V$  为平均流速。

路径概率  $p(s)$  为:

$$p(s) = \theta_i p_{ij} p_{jk} \dots p_{ik} \quad (7)$$

式中,  $\theta_i$  为水滴随机降落到流域上各级坡面的概率, 即水滴在流域上开始传播时的概率, 即初始概率;  $p_{ij}$  为从  $i$  级河流状态转移到  $j$  级河流状态的转移概率。

RODRIGUEZ-ITURBE I 等<sup>[2]</sup>指出  $\theta_i$ 、 $p_{ij}$  均与水系结构有关, 如对于 3 级流域<sup>[9]</sup>有:

$$\begin{cases} p_{12} = (R_B + 2R_B - 2) / [R_B(2R_B - 1)] \\ p_{13} = (R_B^2 - 3R_B + 2) / [R_B(2R_B - 1)] \\ p_{23} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \theta_1 = R_B^2 / R_A^2 \\ \theta_2 = \frac{R_B}{R_A} - \frac{R_B^3 + 2R_B^2 - 2R_B}{R_A^2(2R_B - 1)} \\ \theta_3 = 1 - \frac{R_B}{R_A} - \frac{R_B^3 - 2R_B^2 + 2R_B}{R_A^2(2R_B - 1)} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $R_B$ 、 $R_A$ 、 $R_L$  分别为 Horton 定律中的分叉比、面积比、河长比<sup>[9]</sup>。

### 2.2.3 基于地貌单位线汇流的新安江模型

新安江模型的结构设计一般为蒸散发计算、产流计算、分水源计算和汇流计算四个层次。通过沿用新安江模型中的蒸散发和产流计算模块, 并结合地貌单位线进行汇流, 构建基于地貌单位线汇流的新安江模型, 模型结构见图 1, 模型主要参数见表 1。

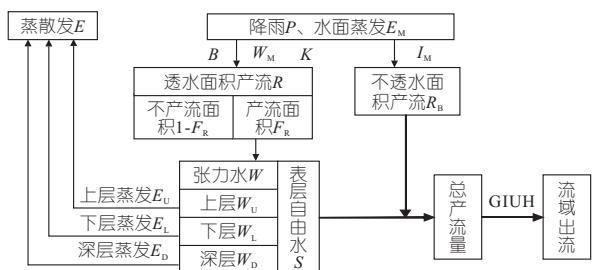


图 1 模型结构

Fig. 1 Hydrologic model structure

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

参数符号	参数意义	新安江模型参数取值	基于地貌单位线汇流的新安江模型参数取值
$K$	流域蒸散发折算系数	1.11	1.11
$W_{UM}$	上层张力水容量/mm	20	20
$W_{LM}$	下层张力水容量/mm	60	60
$W_M$	流域平均张力水容量/mm	120	120
$C$	深层蒸散发折算系数	0.15	0.15
$B$	张力水蓄水容量曲线次方	0.1	0.1
$I_M$	不透水面积占全流域面积比例	0.01	0.01
$S_M$	表层自由水蓄水容量/mm	22.7	—
$E_X$	表层自由水蓄水容量曲线次方	1.5	—
$K_1$	表层自由水蓄水库对壤中流的日出流系数	0.38	—
$K_G$	表层自由水蓄水库对地下水的日出流系数	0.32	—
$C_S$	地面径流消退系数	0.87	—
$C_1$	壤中流消退系数	0.90	—
$C_G$	地下水消退系数	0.92	—
$L$	滞时/h	0	—
$K_E$	马斯京根法演算参数	1	—
$X_E$	马斯京根法演算参数	0.23	—
$V$	流域平均流速/( $m \cdot s^{-1}$ )	—	0.35

注: — 表示模型没有该参数。

### 2.3 基于遗传算法的客观优选法

按照客观优选法<sup>[10]</sup>基本思路,基于地貌单位线汇流的新安江模型可分为蒸散发、产流、汇流三个层次,每层间的水文参数均具备一定的物理意义,且相互间独立性较强,从而将参数分层次进行优化率定,并相应采用合适的目标函数,可有效提高参数率定的准确性。

通过遗传算法改进客观优选法参数分层率定的人机交互方式,提高参数的率定效率。该算法是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的一种计算模型,它将问题的求解过程转换成类似生物进化中的染色体基因的交叉、变异等过程<sup>[11]</sup>。在求解较为复杂的参数优化问题时,通常能够较快地获得较好的优化结果。遗传算法参数为群体大小  $M=20$ ,交叉概率  $P_c=0.8$ ,变异概率  $P_m=0.1$ ,终止代数  $T=100$ 。

参数率定产流阶段采用水量平衡为目标函数,汇流阶段采用确定性系数为目标函数<sup>[12]</sup>:

$$\Delta R = |R_{\text{计算}} - R_{\text{实测}}| \quad (10)$$

式中,  $\Delta R$  为径流深绝对误差;  $R_{\text{计算}}$  为计算径流深;  $R_{\text{实测}}$  为实测径流深。

$D_c$  为确定性系数:

$$D_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_c(i) - y_0(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [y_0(i) - \bar{y}_0]^2} \quad (11)$$

式中,  $n$  为序列长度;  $\bar{y}_0$  为实测值的均值;  $y_0(i)$ 、 $y_c(i)$  分别为实测值、预报值。

## 3 应用

### 3.1 地貌单位线计算

采用 ArcGIS 水文分析模块对洛阳河流域 DEM 进行洼地填平、确定流向、汇流累积量计算、出口点设置、河网分级、生成流域等处理,统计洛阳河流域霍顿地貌参数<sup>[13-14]</sup>,见表 2。

表 2 洛阳河地貌参数

Tab. 2 Geomorphic parameters of Lyanghe basin

河流级别	$N_w$	$\bar{L}_w/\text{m}$	$\bar{A}_w/\text{km}^2$	$R_B$	$R_L$	$R_A$
1	10	3 136.4	9.9	3.162	2.117	3.861
2	3	4 259.5	40.7	3.162	2.117	3.861
3	1	14 058.3	146.9	3.162	2.117	3.861

将  $R_B$ 、 $R_A$ 、 $R_L$  代入式(7)~(9),计算得到路径概率  $p(s)$ ,并根据式(4)~(6)计算得到洛阳河流域的瞬时地貌单位线为:

$$u(t) = 0.172 3e^{-0.401 7t} - 0.310 2e^{-0.295 8t} + 0.145 2e^{-0.089 6t} \quad (12)$$

洛阳河流域地貌单位线见图 2。

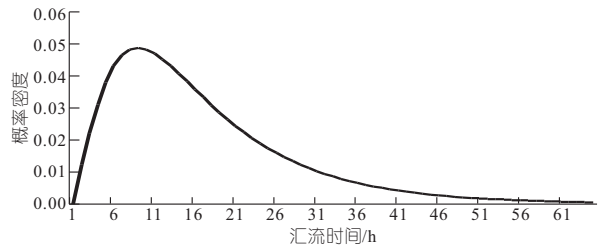


图 2 洛阳河流域地貌单位线

Fig. 2 GIUH of Luoyanghe basin

### 3.2 参数分析及率定

以洛阳河流域 4 场洪水资料来率定参数,1 场洪水来验证,其中参数率定采用遗传算法对新安江模型和基于地貌单位线汇流的新安江模型进行参数率定,以提高参数率定的客观性和准确性。考虑到新安江模型参数较多,根据新安江模型参数的分析<sup>[1,15]</sup>,参数  $W_{UM}$ 、 $W_{LM}$ 、 $C$ 、 $I_M$  一般均不敏感,取一般经验值,  $W_{UM}=20 \text{ mm}$ 、 $W_{LM}=60 \text{ mm}$ 、 $C=0.15$ 、 $I_M=0.01$ ;  $W_M$  与  $B$  有关,据物理概念和经验,取  $W_M=120 \text{ mm}$ 、 $B=0.1$ ;  $E_x$  反映自由蓄水分布不均匀程度,取  $E_x=1.5$ ;  $K$ 、 $S_M$ 、 $K_1$  ( $K_G+K_1=0.7$ ),  $C_s$ 、 $C_1$ 、 $C_G$  参数较为敏感,需优化率定;地貌单位线中的流域平均流速  $V$  需优化率定。

依据基于遗传算法的客观优选法<sup>[10]</sup>多层次多目标率定模型参数,首先以水量平衡为目标函数(式(10)),优化率定参数  $K$  并固定,然后以确定性系数为目标函数(式(11))率定模型剩余敏感参数,保证两个模型计算产流量一致,重点对比分析汇流模型的优劣性。新安江模型和基于地貌单位线汇流的新安江模型参数见表 1。

### 3.3 模型结果分析

通过构建基于地貌单位线汇流的新安江模型模拟计算洛阳河流域 5 场洪水,同时对比分析新安江模型计算结果,考虑到两个模型均采用同样的蒸散发及产流参数,故本次分析 5 场洪水的洪峰部分,比较模型汇流阶段的模拟精度,见表 3。

表 3 洛阳河流域洪水模拟结果

Tab. 3 Simulation results of Luoyanghe basin

洪水	实测 洪峰	新安江模型				基于地貌单位线汇流 的新安江模型			
		模拟 洪峰	洪峰相对 误差/%	峰现 时差/h	确定性 系数	模拟 洪峰	洪峰相对 误差/%	峰现 时差/h	确定性 系数
		160701	161.5	143.2	-11.3	0	0.79	152.2	-5.7
160915	43.2	40.4	-6.6	-1	0.83	44.9	3.9	-2	0.82
170610	196.4	184.1	-6.3	2	0.95	212.2	8.0	0	0.97
170923	194.2	179.2	-7.7	4	0.71	202.8	4.4	2	0.73
170812*	50.9	53.7	5.5	-2	0.85	55.2	8.4	-1	0.95

注:实测洪峰、模拟洪峰单位均为  $\text{m}^3/\text{s}$ ;带\*洪水为验证期洪水。

由表 3 并参照《水文情报预报规范》<sup>[16]</sup>可知:

①两种模型模拟 5 场洪水的洪峰相对误差均小于 20%,合格率为 100%,达到甲级精度;②新安江模型的洪峰平均相对误差为 7.5%,峰现平均时差为 1.8 h,平均确定性系数为 0.83;基于地貌单位线汇流的新安江模型的洪峰平均相对误差为 6.1%,峰现平均时差为 1.0 h,平均确定性系数为 0.84。由此可见在洛阳河流域 2016~2017 年 5 场洪水模拟中,基于地貌单位线汇流的新安江模型取得较为理想的效果,且其洪峰平均相对误差、峰现平均时差及平均确定性系数均优于新安江模型。

## 4 结论

a. 采用 90 m 分辨率的 DEM 数据提取了洛阳河流域霍顿地貌参数,通过概率论等方法计算得到洛阳河地貌单位线,并结合三层蒸散发和蓄满产流模型,构建了基于地貌单位线汇流的新安江模型,同时采用遗传算法和客观优选法思路对参数进行优化率定。

b. 洛阳河流域次洪模拟演算表明,基于地貌单位线汇流的新安江模型能取得较为理想的计算结果,且模型敏感参数较少,主要为蒸散发参数  $K$  和流域平均流速  $V$ ,可为中小河流无资料地区洪水模拟预报提供技术支撑。

c. 对比计算得到洪水过程线和实测流量发现,汇流计算的洪峰峰值拟合较好,但洪水涨落过于快速,可能由于采用新安江模型计算的产流量未进行径流分割,后续将进一步研究次洪径流深分割有关方法;在遗传算法参数率定时每层仅采用了单一目标函数,后续将进一步研究多目标优化算法以提高参数的客观准确性。

## 参考文献:

- [1] 包为民. 水文预报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [2] RODRÍGUEZ-ITURBE I, VALDÉS J B. The geomorphologic structure of hydrologic response[J]. Water resources research, 1979, 15(6):1409-1420.
- [3] GUPTA V K, WAYMIRE E, WANG C T. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology[J]. Water resources research, 1980, 16(5):855-862.
- [4] 文康,李琪,陆卫鲜,等. 地貌单位线在浙江省小水电站网规划中的应用[J]. 水文,1992(3):16-21.
- [5] 芮孝芳. 由流路长度分布律和坡度分布律确定地貌单位线[J]. 水科学进展,2003,14(5):602-606.
- [6] 吴志勇,郑宁,冒云,等. 基于 VIC 模型和地貌单位线的中小水库入库预报研究[J]. 水电能源科学,2017,35(10):21-24.
- [7] 童冰星,李致家,温娅惠,等. 基于地貌单位线的汇流模型在陈河流域的构建与应用[J]. 水力发电,2017,43(10):19-22.
- [8] 芮孝芳. 地貌瞬时单位线研究进展[J]. 水科学进展,1999,10(3):345-351.
- [9] 文康,李琪,陆卫鲜. R-V 地貌单位线通用公式及其应用[J]. 水文,1988(3):20-25.
- [10] 王佩兰,赵人俊. 新安江模型(三水源)参数的客观优选方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),1989,17(4):65-70.
- [11] 李明. 遗传算法的改进及其在优化问题中的应用研究[D]. 长春:吉林大学,2004.
- [12] 钟粟,汪院生,唐仁,等. 变化环境下水文模型在洛阳河流域中的应用[J]. 水电能源科学,2017,38(9):20-23.
- [13] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:水利水电出版社,2004.
- [14] 耿兵,张行南,夏达忠,等. 传统单位线和地貌瞬时单位线在腰古流域的对比研究[J]. 水力发电,2016,42(5):12-15.
- [15] 赵人俊,王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文,1988(6):2-9.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水文情报预报规范:GB/T22482-2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

## Application of Xin'anjiang Model Based on Geomorphologic Unit Hydrograph in Luoyang River Basin

ZHONG Li, WANG Yuan-sheng, QIN Hao, LIU Peng, SHA Peng, XIA Xi, MIN Yong

(Jiangsu Taihu Planning Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

**Abstract:** Flood prediction and design calculation in ungauged region are often restricted by data of rainfall and runoff. Based on the DEM data extraction of Horton geomorphologic parameters in Luoyang river basin, geomorphic units line of Luoyang river was calculated, and the basin confluence and the response relation between geomorphic parameters was established. The three layers of evaporation and saturation excess runoff were used to construct Xin'anjiang model based on geomorphic unit line. Luoyang river basin flood simulation was carried out by combination of genetic algorithm with objective optimization. Compared with Xin'anjiang model, the results show that the Xin'anjiang model based on geomorphic unit line can obtain better simulation results, which can provide reliable technical support for hydrologic analysis and calculation of small and medium-sized rivers in ungauged region.

**Key words:** objective optimization method; geomorphologic unit hydrograph; Horton geomorphological parameters; Xin'anjiang model; genetic algorithm