

半分布式新安江模型应用研究

朱子唯, 杨侃

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在利用数字高程模型技术 (DEM) 的基础上提取数字流域, 将分布式单位线模型应用于新安江模型汇流计算模块, 构建基于分布式单位线模型的半分布式新安江模型预报方案。在河南省竹竿河流域的应用结果表明: 率定期洪峰流量合格率为 88.24%, 洪峰时间合格率为 94.12%; 检验期洪峰流量合格率为 85.71%, 洪峰时间合格率为 85.71%。因此, 将该模型应用于新安江模型汇流计算模块切实可行, 且得出的半分布式新安江模型模拟精度较高, 具有一定的实际应用价值。

关键词: 数字高程模型; 分布式单位线模型; 半分布式新安江模型; 竹竿河流域

中图分类号: TV122+.5 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2018) 11-0046-07

Application research of semi-distributed Xin'anjiang model

ZHU Ziwei, YANG Kan

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 211098, Jiangsu)

Abstract: On the basis of digital elevation model technology (DEM), the digital watershed was extracted, and the distributed unit hydrograph model was applied to the Xin'anjiang model convergence calculation module to construct a semi-distributed Xin'anjiang model prediction scheme based on the distributed unit hydrograph model. The application results in Zhugan River Basin of Henan Province showed that in the calibration period, the qualified rate of flood peak discharge was 88.24% and the qualified rate of flood peak time was 94.12%. In the verification period, the qualified rate of flood peak discharge was 85.71% and the qualified rate of flood peak time was 85.71%. Therefore, it was feasible to apply the model to the Xin'anjiang model confluence calculation module, and the semi-distributed Xin'anjiang model has higher simulation accuracy, which had certain practical value.

Key words: digital elevation model; distributed unit hydrograph model; semi-distributed Xin'anjiang model; Zhugan River Basin

1 概述

按照水文过程的离散情况来分类, 可以将流域水文模型分为: 集总式、分布式、半分布式。传统的水文模型大多是集总式模型, 它高度概化了流域的产汇流机制, 忽略了流域水文要素还有空间分布的特性, 用平均值代替模型中的变量和参

数, 未考虑将流域划分为自然地理及水文要素相对均匀的计算单元来处理。随着地理信息、遥感、雷达测雨、计算机等技术的发展, 分布式水文模型恰好弥补了集总式模型的这一缺陷。但因分布式模型要有大量高精度的数据, 而且计算复杂, 故很难将其应用于大流域。

半分布式模型具有计算简单、方法明了、参数

收稿日期: 2018-03-28

作者简介: 朱子唯 (1994—), 男, 硕士, 研究方向为水文学及水资源。

明确和应用灵活的优点。胡春歧等^[1]采用了半分布式河北雨洪模型在黄壁庄以上的流域进行了洪水预报, 解决了大流域预报难的问题。张洪光等^[2]将半分布式模型结合了两参数月水量平衡模型, 在分析气候变化对汉江流域水资源的影响中取得了令人满意的结果。基于此, 本文考虑以 DEM 为资料来源, 利用分布式单位线模型, 将地貌单位线应用于新安江模型汇流计算模块, 构建半分布式新安江模型预报方案。通过本文研究, 希望达到更为简单和精准地完成洪水预报的目的。

2 模型介绍

2.1 模型原理

分布式单位线, 在分析流域(小流域或计算单元)单位线时, 充分考虑了流域内地形、植被等空间分布的特点。其理论依据与地貌单位线类似, 基本原理是利用流域的时间—面积关系分析单位线, 关键内容是计算流域中的每一点到达该流域出口所需要的汇流时间。在 DEM 中, 某一个格网内的径流沿坡度最大方向流向其周围相邻的格网, 可以得到该格网内的径流向出口汇集的路径^[3], 具体示意图见图 1。

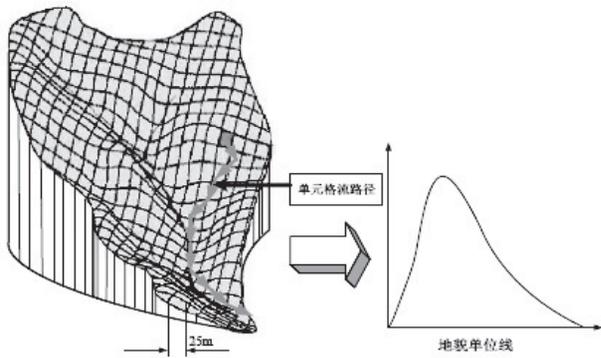


图 1 径流路径示意图

半分布式新安江模型是在利用数字高程模型技术 (DEM) 的基础上提取数字流域, 将分布式单位线模型应用于新安江模型汇流计算模块, 构建半分布式新安江模型预报方案。

2.2 模型计算

2.2.1 产流计算

(1) 蒸散发计算

在新安江模型中, 计算流域蒸散发量考虑土壤垂向分布不均匀性, 将其分为 3 层, 计算公式如

下:

$$E_p = K \times E_0 \quad (1)$$

式中:

E_p —蒸散发能力;

E_0 —实测蒸发量;

K —蒸发折算系数。

$$E_p = \begin{cases} E_p & \text{当 } P+WU \geq E_p \text{ 时} \\ (E_p - WU - P) \frac{WL}{WLM} & \text{当 } P+WU < E_p \text{ 且 } \frac{WL}{WLM} > C \text{ 时} \\ C(E_p - WU - P) & \text{当 } P+WU > E_p \text{ 且 } \frac{WL}{WLM} \leq C \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

C —深层蒸发折算系数;

WU 、 WL —上、下层土壤含水量;

WLM —下层张力水容量;

P —降水量;

E —计算蒸发量。

(2) 产流计算公式

用流域蓄水容量曲线来考虑土壤缺水分布不均的问题。设流域单点需水量为 W_m , 流域单点需水量最大值为 W_{mm} , 又设流域蓄水容量—面积分配曲线是一条抛物线, 其指数为 b , 则该曲线可以用下式表示:

$$\frac{f}{F} = 1 - \left(1 - \frac{WL}{WLM}\right)^b \quad (3)$$

据此可求得流域平均蓄水容量为 W_m :

$$W_m = \frac{W_{mm}}{1+b} \quad (4)$$

某个土壤需水量 W 所对应的纵坐标值 a 为:

$$a = W_{mm} \left[1 - \left(1 - \frac{W}{WLM}\right)^{\frac{1}{1+b}}\right] \quad (5)$$

PE 是扣除雨期蒸发后的降雨量, 当 $PE+a < W_{mm}$ 时, 局部产流量为:

$$R = PE - W_M + W + W_M \left(1 - \frac{PE+a}{W_{mm}}\right)^{1+b} \quad (6)$$

当 $PE+a \geq W_{mm}$ 时, 全流域产流量为:

$$R = PE - (W_M - W) \quad (7)$$

如流域不透水面积比 IMF 不等于 0 时, 只要

取式 $W_M = \frac{W_{mm}(1-MP)}{1+b}$ 即可, 这时各式也会有相应的变化。

(3) 水源划分

蓄满产流计算出的径流量 R 中一般包含各种径流成分, 因为各种径流成分的汇流规律和汇流速度不同, 不能用相同方法来计算, 因此要进行水源划分。在本模型中, 水源划分是采用自由水蓄水库解决这一问题。由蓄满产流模型计算出的产流量 R , 首先进入自由水蓄水库进行调蓄, 再划分水源^[4], 子流域划分示意图见图 2。自由水蓄水库有两个出口, 分别形成壤中流 RS , 地下径流 RG 。由于产流面积随着蓄水量的变化而变化, 所以自由水蓄水库底宽 F_R 也在不断变化。

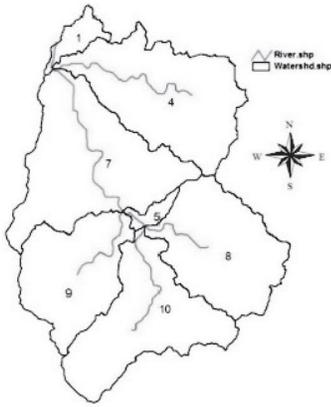


图 2 子流域划分示意图

各种水源的径流量的计算公式如下:

当 $S+R \leq SM$ 时:

$$\begin{cases} RS=0 \\ RI=(S+R) \times KI \times F_R \\ RG=S+R \times KG \times F_R \end{cases} \quad (8)$$

当 $S+R > SM$ 时:

$$\begin{cases} RS=(S+R-SM) \times F_R \\ I=SM \times KI \times FR \quad RI=SM \times KI \times F_R \\ RG=SM \times KG \times F \end{cases} \quad (9)$$

引入 EX 为其幂次, 则有:

$$\frac{f}{F} = 1 - \left(1 - \frac{S_m}{S_{mm}}\right)^{EX} \quad (10)$$

$$SSM = (1+EX) SM \quad (11)$$

$$AU = SSM \left[1 - \left(1 - \frac{S}{SM}\right)^{\frac{1}{1+EX}}\right] \quad (12)$$

当 $PE+AU < SSM$ 时:

$$RS = \left[PE - SM + S + SM \left(1 - \frac{PE+AU}{SMM}\right)^{1+EX}\right] \quad (13)$$

当 $PE+AU \geq SSM$ 时:

$$RS = (PE + S - SM) F_R \quad (14)$$

2.2.2 汇流计算

(1) 流速计算公式

SCS 于 1972 年提出了坡面流流速的计算公式为:

$$V = kS^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式中:

S —地面坡度;

K —流速系数。

(2) 汇流时间计算

$$\Delta\tau = L/V \text{ 或 } \Delta\tau = 2L/V \quad (16)$$

式中:

L —网格的边长。

$$\sum_{i=1}^m \Delta\tau \quad (17)$$

式中:

m —径流路径上网格的数量。

汇流时间分布图见图 3。

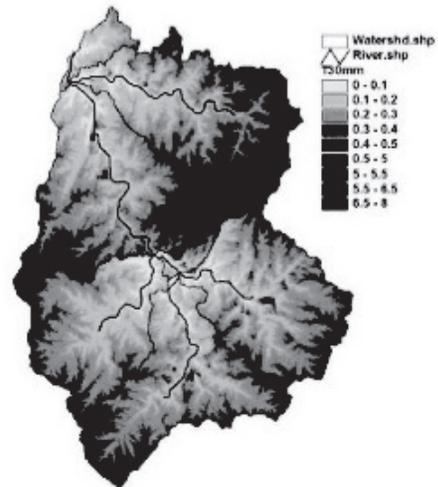


图 3 汇流时间分布图

(3) 时间—面积关系计算

计算出流域上的各点到出口所用的汇流时间, 然后得出汇流时间—面积关系, 绘制时间—面积关系图见图 4。

(4) 单位线分析

单位线分析就是把过程线转换为所需时段单位线。

2.3 模型结构与精度评定

2.3.1 模型结构

半分布式新安江模型结构应用示意图见图 5。模型主要由 4 个部分组成, 即蒸散发计算、产流量计算、水源划分和汇流计算^[5]。分布式单位线

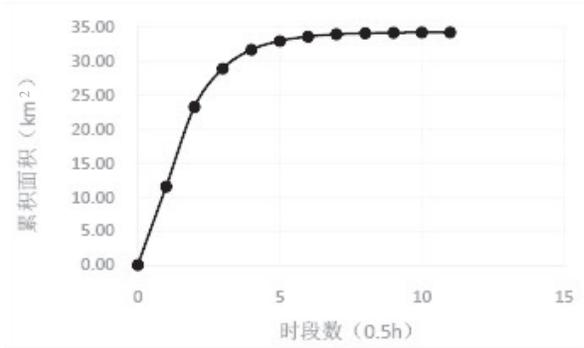


图 4 时间—面积关系图

法的建模思路是利用 DEM, 得出流域的数字水系, 建立预报方案, 保留新安江模型的前三个部分, 应用三水源的蓄满产流模型来计算该流域的产流, 第四部分汇流演算再利用地貌单位线来完成。

2.3.2 精度评定

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n [y_{ci} - y_{oi}]^2}{\sum_{i=0}^m [y_{ci} - \bar{y}_o]^2} \quad (19)$$

式中:

- y_{ci} —预报值;
- y_{oi} —实测值;
- y_{σ} —实测值的均值;
- n —资料系列长度。

表 1 精度等级表

精度等级	甲	乙	丙
合格率	$QR \geq 85.0$	$85.0 > QR \geq 70.0$	$70.0 > QR \geq 60.0$
确定性系数	$DC > 0.9$	$0.9 \geq DC \geq 0.7$	$0.7 > DC \geq 0.5$

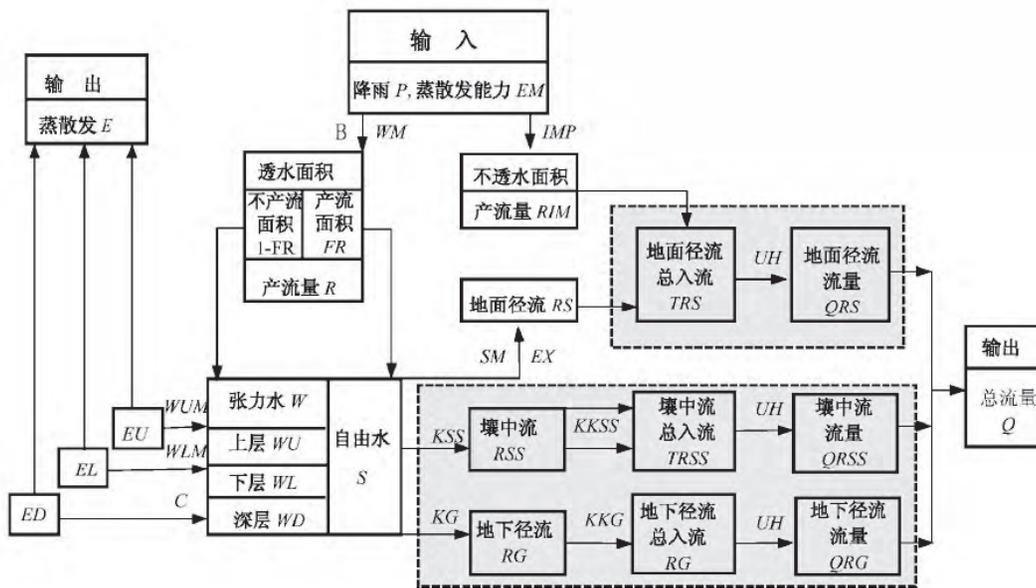


图 5 半分布式新安江模型结构应用图 (改进的汇流部分用阴影表示)

精度等级可分为甲、乙、丙 3 个等级。其中甲等级和乙等级能够进行作业预报, 丙等级只能作为参考。精度等级见表 1。

(1) 合格率

合格率 QR 的计算式为:

$$QR = \frac{n}{m} \times 100\% \quad (18)$$

式中:

n —合格预报次数;

m —预报总次数。

(2) 确定性系数

确定性系数 DC 的计算式为:

3 实例应用

3.1 流域概况

3.1.1 流域自然地理特征

河南省竹竿铺水文站在淮河支流竹竿河上, 控制的流域面积约为 1639 km²。竹竿河呈南北走向, 在淮河息县站上游约 6 km 处汇入淮河。竹竿河上游支流有卡房河、九龙河, 属山溪性河流。流域内大部分属于深山丘陵区, 其河道特点是坡度大、流程短、集流快、水流急。遇干旱时, 竹竿河常断流。本流域多年平均降水量为 1300 mm 左右, 年内分配极不均匀, 主要集中在 6 ~ 8 月份, 以 7 月份为最多。

3.1.2 水利工程情况

上游湖北省境内建有丰店水库(中型)1座。

3.1.3 测站概况

竹竿河全长 101 km(入竹竿河口以上),集水面积 2610 km²,其河道特点是坡降大、流程短、集水快、水流湍急。竹竿河上游建有丰店中型水库 1 座。竹竿河上 1952 年设立有南李店水文站,集水面积 1434 km²,河道长度 70km。1987 年 1 月下迁 22 km 改为竹竿铺水文站,该站集水面积 1639 km²,河道长度 92 km,上游较大支流有卡房河、九龙河和养马河,其中养马河正对着竹竿铺水文站断面汇入竹竿河。1986 ~ 1988 年南李店和竹竿铺水文站有 3 年的水位对比观测资料,建有水位关系。历史最高水位 48.31 m(1996 年 7 月 17 日),最大流量 3180 m³/s(1987 年 8 月 28 日)。竹竿铺水文站流域边界图见图 6。

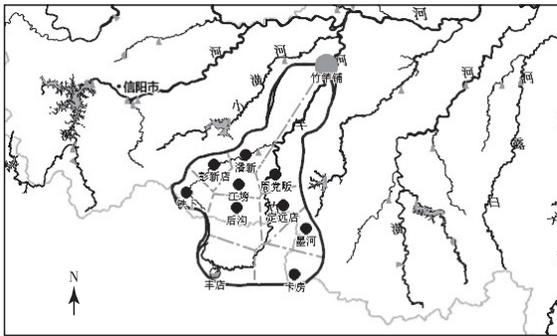


图 6 竹竿铺水文站流域边界图

3.2 参数率定及结果分析

根据资料分析,选用 1987 ~ 2003 年的洪水资料(17 场次洪)作为率定期进行参数率定,选用 2004、2007、2008、2010 年洪水资料(7 场次洪)作为校验期进行参数校验。根据上述率定参数成果:确定性系数率定期为 0.820,校验期 0.883,水量基本平衡,各参数合理且符合该流域的洪水特征。对 1987 ~ 2003 年的洪水资料共 17 场次洪水样本进行评定,结果为:率定期的洪峰流量和洪峰时间合格率分别为 88.24%、94.12%;对 2004、2007、2008、2010 年洪水资料共 7 场次洪样本进行检验,校验期的洪峰流量和洪峰时间合格率分别为 85.71%、85.71%。洪号 020722(左)和洪号 100716(右)的计算洪水过程与实测洪水过程比较见图 7,次洪评定检验结果见表 2 和表 3。

从图 7 可以看出,通过半分布式新安江模型预报的洪水过程,与实测洪水过程拟合程度较高。通过表 2 和表 3 可以得出率定期洪峰流量合格率为 88.24%,洪峰时间合格率为 94.12%;检验期洪峰流量合格率为 85.71%,洪峰时间合格率为 85.71%。确定性系数较高,率定期达到甲级为 0.877,校验期达到乙级为 0.841,评定等级基本在乙级以上,也有很多洪号的评定等级达到甲级。

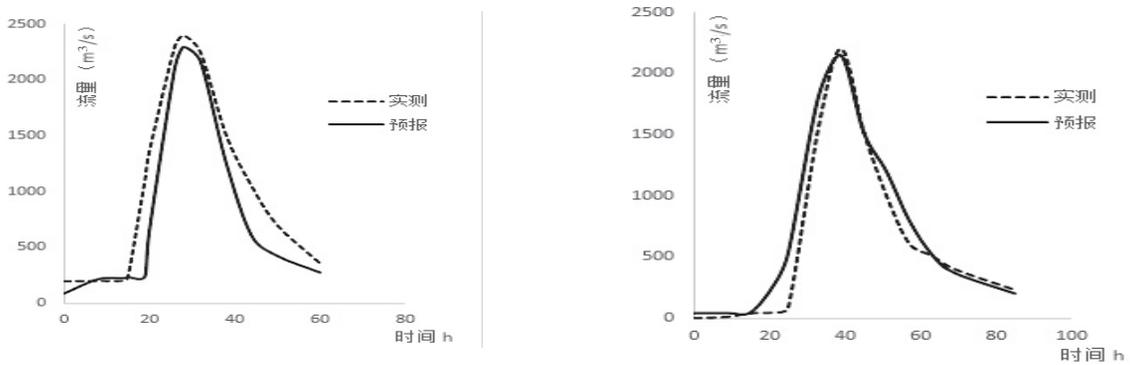


图 7 洪号 020722(左)和洪号 100716(右)的计算洪水过程与实测洪水过程比较图

表 2 率定期次洪评定表

洪号	实测	预报	洪峰流量评定			峰时评定			确定性系数评定	
	洪峰流量 (m ³ /s)	洪峰流量 (m ³ /s)	误差 (m ³ /s)	许可误差 (m ³ /s)	评定	误差 (h)	许可误差 (h)	评定	确定性 系数	评定 等级
870704	2020.00	1919.17	-100.83	404	√	0	3	√	0.98	甲
870805	1760.00	2066.86	306.86	352	√	0	3	√	0.90	甲

(续表 2)

洪号	实测	预报	洪峰流量评定			峰时评定			确定性系数评定	
	洪峰流量 (m ³ /s)	洪峰流量 (m ³ /s)	误差 (m ³ /s)	许可误差 (m ³ /s)	评定	误差 (h)	许可误差 (h)	评定	确定性 系数	评定 等级
870827	3180.00	3048.03	-131.97	636.0	√	2	3	√	0.97	甲
880908	922.00	809.21	-112.79	184.4	√	-2	3	√	0.83	乙
910804	808.00	775.12	-32.88	161.6	√	-2	3	√	0.91	甲
920505	919.00	735.28	-183.72	183.8	√	-1	3	√	0.88	乙
960628	845.00	979.96	134.96	169.0	√	-2	3	√	0.80	乙
960708	885.00	792.06	-92.94	177.0	√	0	3	√	0.84	乙
960716	3020.00	2966.94	-53.06	604.0	√	1	3	√	0.92	甲
970714	738.00	748.31	10.31	147.6	√	0	3	√	0.91	甲
980802	560.00	469.86	-90.14	112.0	√	1	3	√	0.94	甲
000624	830.00	677.65	-152.35	166.0	√	0	3	√	0.77	乙
000628	675.00	825.47	150.47	135.0	X	-2	3	√	0.65	丙
000818	1520.00	1265.35	-254.65	304.0	√	3	3	√	0.90	甲
020621	1780.00	1689.32	-90.68	356.0	√	4	3	X	0.84	乙
020722	2150.00	2248.90	98.9	430.0	√	-1	3	√	0.96	甲
030629	1920.00	1497.68	-422.32	384.0	X	-1	3	√	0.91	甲

表 3 校验期次洪评定表

洪号	实测	预报	洪峰流量评定			峰时评定			确定性系数评定	
	洪峰流量 (m ³ /s)	洪峰流量 (m ³ /s)	误差 (m ³ /s)	许可误差 (m ³ /s)	评定	误差 (h)	许可误差 (h)	评定	确定性 系数	评定 等级
040717	1110.00	1302.20	192.20	222.00	√	-2	3	√	0.78	乙
040803	778.00	770.17	-7.83	155.60	√	1	3	√	0.95	甲
070629	1060.00	1078.68	18.68	212.00	√	-3	3	√	0.81	乙
070707	2170.00	2062.42	-107.58	434.00	√	1	3	√	0.96	甲
080722	508.00	498.68	-9.32	101.60	√	-4	3	X	0.62	丙
080828	1830.00	1491.10	-338.90	366.00	√	-1	3	√	0.92	甲
100716	2240.00	2711.15	471.15	448.00	X	0	3	√	0.85	乙

4 结论

(1) 基于 DEM 的半分布式新安江模型不仅考虑了降雨和下垫面因子对流域内的降雨径流所造成的影响, 而且不需要大量的降雨输入数据和高

精度的基本数据, 从而解决了集总式水文模型中模型参数相对简单和分布式水文模型中资料要求多、计算复杂的不足。半分布式模型在计算方面简单快捷, 在方法上明了易懂, 并且具有参数明确和应用灵活的优点, 随着水文模型的蓬勃发展, 它

将拥有广阔的应用前景。

(2) 本文暂未考虑上游湖北省境内丰店水库对洪水预报模型的影响,后期可进一步深入研究。

参考文献:

[1] 中国水利学会,中国水利学会水文专业委员会.中国水利学会2006学术年会暨2006年水文学术研讨会论文集(水文水资源新技术应用)[C].2006.

- [2] 张洪刚,郭生练,徐德龙,吕孙云,陈华.汉江流域半分布式两参数月水量平衡模型[J].人民长江,2008,39(17):43-45.
- [3] 孔凡哲,芮孝芳.一种地形指数计算方法在Topmodel洪水模拟计算中的应用[J].水文,2003,23(3):16-19.
- [4] 詹道江,徐向阳,陈元芳.工程水文学(第4版)[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [5] 蒋成环.新安江模型在贵州省龙里水文站洪水预报中的应用[J].中国水运(下半月),2016,16(12):211-213.

