

栅格型新安江模型在赣江流域的应用

山红翠,任立良,周瑜佳

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:以赣江流域峡山站以上为研究区域,利用栅格型数字高程数据,提取数字流域水系及其空间拓扑关系,在此基础上建立数字水文模型。赣江上游峡山站以上集水区域包含 21198 个空间分辨率为 30s 的栅格,采用就近移植法将降水数据及蒸发数据插值到每个栅格上,计算峡山站的径流过程。日模型中选取 1978~1985 年为参数率定期,1986~1987 年为参数验证期,以多年径流量误差最小为目标函数。次洪模型中采用前 16 场洪水用于参数率定,后 6 场用于模拟验证,以洪水总量、洪峰流量、峰现时间按许可误差统计合格率最高和确定性系数最大为目标函数。结果显示,率定期 16 场洪水中 14 场合格,验证期 6 场洪水均合格,表明栅格型新安江模型模拟效果良好。

关键词:数字高程模型;新安江模型;日模型;次洪模型;参数率定

中图分类号:P339

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)04-0028-04

水文模型是对真实自然过程的概化表达,将流域上不同的水文过程集总为均一的模型很难获得满意的模拟结果^[1]。近几十年来的研究表明,地表的非均一性对水文的动力学过程至关重要^[2],因此水文工作者在研究中愈来愈重视下垫面因子空间分布的不均匀性对流域降雨径流的影响^[3]。数字流域的诞生使数字水文模型^[4]替代传统水文模型成为可能。数字水文模型中,将流域离散成较小的可认为其特性相对均一的空间单元,在这样的条件下,使水文模拟朝着更贴近实际水文现象的物理模型迈进^[5]。3S 技术的发展使得流域地形、植被、土壤、分水线、河网、子流域的表达以及集水面积的计算完全能用数字技术实现^[6]。基于 DEM 构建的数字流域为栅格型新安江模型的研究提供了强有力的技术平台。

本文以三水源新安江模型的原理为基础,将 GIS、DEM 技术与新安江模型相结合,提取水文模拟所需要的流域特征,从而构建基于 DEM 栅格的分布式新安江模型,并将其应用于湿润的赣江流域。

1 研究区概况

赣江为鄱阳湖水系五大河流之首,是江西省第一大河流,位于北纬 25°00'~27°10'、东经 115°10'~116°40'。赣江流域属于亚热带湿润季风气候,雨量充沛,年平均降水量 1542.6 mm,平均径流系数为 0.514^[7]。本文

选取赣江上游峡山站以上集水区为研究区域。赣江上游优越的地理位置和充沛的水热条件,使这一带森林资源尤为丰富,森林覆盖率达 63.6%,主要植被群落是常绿阔叶林^[8]。该区春夏季受亚热带季风影响,暖湿气流不断输入,与北方南下的冷气流常在流域上空交汇,产生历时长、范围广的锋面雨;夏秋季受太平洋热带气旋侵袭,带来暴雨。

2 栅格型新安江模型的构建

应用数字高程流域水系模型 (Digital Elevation Drainage Network Model, DEDNM)^[9]提取栅格型新安江模型所需的基本空间信息。选用空间分辨率为 30s 的栅格型 DEM 数据,该数据取自美国国家地球物理数据中心提供的全球陆地 1km 基础高程 GLOBE(Global Land One Kilometer Base Elevation)数据,共包含 360 行、240 列。

构建栅格型新安江模型,首先要对 DEM 数据进行预处理。应用文献^[6]的方法,计算 DEM 各栅格与邻近的 8 个栅格之间的坡度,按最陡坡度原则,即 D8^[10]原则设定流域内平坦格网流向。然后应用 DEDNM 对 DEM 的凹陷区域进行识别和处理,得到全流域的格网流向。最后,用 DEDNM 经过中间处理过程得到栅格汇流演算最优次序及河网拓扑关系,从而为栅格型新安江模型汇流演算做准备。

收稿日期:2013-08-10

作者简介:山红翠(1989-),女,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。E-mail:shanhongcui2008@163.com.cn

通讯作者:任立良(1963-),男,江苏扬中人,教授、博导,研究方向为水文学及水资源。E-mail:njrll9999@126.com

对流域内每个栅格单元,栅格型新安江模型将其作为一个子流域处理。首先将站点降雨、蒸发资料按就近移植法插值到全流域 21 198 个格网上,以驱动栅格型新安江模型运行。蒸散发采用三层蒸发模型计算各网格点蒸散发;产流计算按照蓄满产流概念,采用蓄水容量—面积分配曲线考虑土壤缺水分布不均匀的情况;经过蓄满产流计算出的总产流量,按照自由水蓄水库的结构将其划分为地表径流、壤中流和地下径流。

网格间用栅格汇流演算最优次序汇流。各栅格上的产流量,采用考虑区间侧向入流的 Muskingum—Cunge 法,建立“先合后演”的汇流模型,将上游支流的流量过程演算至各支流汇合点叠加,然后再将叠加后的流量过程继续演算至下一支流汇合点叠加,直至演算至流域出口断面为止。

3 模型应用

赣江上游峡山水文站控制集水面积为 15 979km²,区域内地形较为复杂,高程为 75~1349m。图 1 显示了赣江流域峡山站以上区域的地理位置及雨量站空间分布情况。所选水文资料是流域内湖洋站等 51 个测站 1978~1987 年的逐日降水资料以及麻州、宁都和木口(二)三个站点的逐日蒸发资料。选用 1978~1987 年 10 年的日降水量和流量资料进行日径流过程的模拟,选取 1978~1985 年 22 场洪水资料进行次洪过程的模拟。资料包括:流域内 51 个雨量站的逐日降水和次洪的时段降水资料,峡山站的逐日流量过程和次洪的逐时段流量过程,麻州、宁都、木口(二)站的逐日实测水面蒸发资料,蒸发资料不连续,需转化为同站同型号蒸发值,蒸发站只有逐日蒸发量,需内插成时段蒸发量参与模型计算。

3.1 日模型

模型应用中流域参数均一化,各网格单元上的新安江模型参数一致。日模型中以多年径流量误差最小

为目标函数率定蒸散发折算系数 KC,其余参数根据经验初值确定,不参加优选。三水源新安江模型中第三、第四层的参数,只有 SM 和 CG 对汇流有影响,SM 取为 30mm,CG 取为 0.998。

用 1978~1985 年资料进行参数率定,计算中取不同的 KC 值,结果如表 1 所示。

上述率定得到的 KC 值使多年径流深绝对误差最小。蒸散发折算系数 KC 值偏高于一般新安江模型 KC 值,主要受赣江上游繁茂的植被及高程等因素的影响。以上得到的 KC 值分别应用于率定期(1978~1985)与验证期(1986~1987),计算结果如表 2 和表 3 所示。

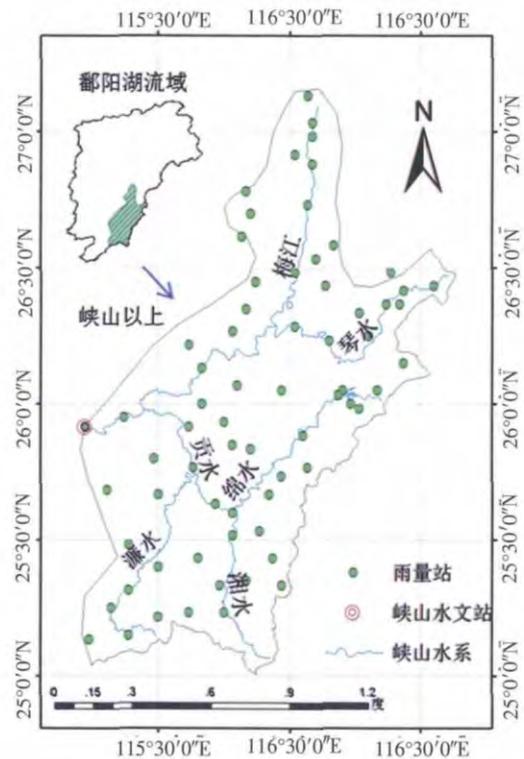


图 1 峡山站以上区域地理位置及雨量站分布
Fig.1 The geographic location and distribution of the rainfall stations in the area controlled by the Xiashan hydrometry station

表1 KC率定比较表
Table 1 Calibration comparison of KC

KC	多年平均降雨量/mm	多年平均实测径流/mm	多年平均计算径流/mm	多年平均相对误差/%	多年平均绝对误差/mm	多年确定性系数
1.4	1520	857	869.5	1.5	12.4	0.85
1.5	1520	857	836.7	-2.4	20.2	0.86
1.45	1520	857	852.7	-0.5	4.3	0.86
1.438	1520	857	856.6	-0.04	0.4	0.86
1.436	1520	857	857.3	0.03	0.3	0.86
1.437	1520	857	856.9	-0.01	0.1	0.86

表2 KC值在率定期的计算结果 (KC=1.437)
Table 2 The results during the calibration period with KC value of 1.437

年份	年降雨量/mm	年实测径流/mm	年计算径流/mm	年相对误差/%	年绝对误差/mm	确定性系数
1978	1527	813	894	9.9	83	0.84
1979	1366	617	727	17.9	110	0.83
1980	1728	898	986	9.8	88	0.84
1981	1729	962	927	-3.6	35	0.90
1982	1652	914	858	-6.2	56	0.87
1983	1938	1314	1167	-11.2	147	0.87
1984	1608	851	877	3.0	26	0.84
1985	1639	934	841	-9.9	93	0.82

从表2可见,各年年径流量的相对误差基本都小于10%,最大为17.9%,最小为3.0%;确定性系数最大为0.90,最小为0.82,总体效果良好。

表3 KC值在验证期的计算结果
Table 3 The results during the verification period with KC value calibrated above

年份	年降雨量/mm	年实测径流/mm	年计算径流/mm	年相对误差/%	年绝对误差/mm	确定性系数
1986	1242	624	625	0.2	1	0.87
1987	1492	643	668	4.0	25	0.80

由表3可知,KC取1.437时,在日模型验证期年相对误差最大为4%,年绝对误差最大为25mm,模拟效果较好。

在参数率定期,多年平均径流深误差为0.1mm,说

明率定得到的KC值对多年径流量模拟效果很好,KC值满足率定要求。而在参数率定期和验证期的10年中,对于各年径流量,其误差大于多年平均径流深误差。这主要是由于KC受到高程、气温、植被等诸多因素的影响,每一年的最优KC是不完全相同的。所以,对多年径流最优的KC值,对每一年却不一定为最好。另外,由于降雨的时空分布不均匀性,导致丰枯交替年份的出现,人类活动发挥较大的干预作用,影响实际径流过程,造成计算径流与实际径流的偏差。

3.2 次洪模型

次洪模型参数调试过程中,常以洪水总量、洪峰流量、峰现时间按许可误差统计合格率最高和确定性系数DC最大为目标函数。一次预报中,上述误差均小于许可误差时,为合格预报^[1]。按时间顺序,取前16场洪水用于参数率定,计算结果如表4所示。

表4 16场次洪模型参数率定结果
Table 4 The computational results of sixteen events of flood hydrographs for parameters calibration

洪号	降雨量/mm	实测径流深/mm	计算径流深/mm	绝对误差/mm	实测洪峰/ $m^3 \cdot s^{-1}$	计算洪峰/ $m^3 \cdot s^{-1}$	相对误差/%	峰现时间/h	确定性系数	是否合格
11780508	209.6	143.4	147.1	3.7	4640	5366	15.6	0	0.95	√
11780604	144.5	81.8	79.3	-2.4	4960	4591	-7.4	-4	0.98	√
11780730	48.4	14.9	16.1	1.2	2390	2365	-1.0	1	0.95	√
11790502	112.3	76.1	80.7	4.6	1330	1322	-0.6	2	0.86	√
11790526	74.5	34.6	25.2	-9.4	1680	1652	-1.7	4	0.73	×
11790606	81.8	39.4	30.9	-8.5	1530	1605	4.9	3	0.36	×
11800505	117.1	106.9	100.6	-6.3	5370	5289	-1.5	1	0.89	√
11809710	124.9	52.7	54.3	-1.6	4180	4702	12.5	4	0.95	√
11810510	69.6	39.1	35.7	-3.4	1320	1380	4.5	-2	0.72	√
11810525	237.7	170.1	169.4	-0.7	3700	4207	13.7	-4	0.94	√
11820506	110.2	75.8	74.0	-1.8	2094	2317	10.6	9	0.81	√
11820527	113.8	47.5	39.8	-7.7	1460	1669	14.3	2	0.62	√
11820613	183.8	136.7	120.0	-16.7	3330	3474	4.3	-1	0.84	√
11830508	131.7	94.7	78.9	-15.8	2590	2516	-2.8	2	0.56	√
11830531	48.8	48.7	43.2	-5.5	2200	2106	-4.3	4	0.47	√
11830614	147.4	89.1	90.1	1.0	4470	4598	2.9	1	0.94	√
平均	122.3	78.2	74.1	-4.3	2953	3078	4.32	1.3	0.79	88%

注:峰现时间中,“+”表示计算峰现时间提前,“-”表示计算峰现时间推后,下同。

取后 6 场洪水事件用于检验,计算结果如表 5 所示。

表5 6场洪水验证结果

Table 5 The computational results of six events of flood hydrographs for model verification

洪号	降雨量 /mm	实测径流 深/mm	计算径流深 /mm	绝对误差 /mm	实测洪峰 /m ³ ·s ⁻¹	计算洪峰 /m ³ ·s ⁻¹	相对误差 /%	峰现时间 /h	确定性 系数	是否 合格
11840514	135.2	75.9	70.0	-5.9	2020	2380	17.8	+3	0.87	√
11840530	151.6	98.1	90.4	-7.7	6160	7379	19.8	+11	0.90	√
11840614	70.8	39.0	36.4	-2.6	3350	3610	7.8	+2	0.88	√
11850526	97.4	47.4	51.1	3.7	3430	3910	14.0	+6	0.87	√
11850604	89.7	44.2	36.5	-7.7	1970	2229	13.1	+4	0.83	√
11850624	120.3	53.8	55.4	1.6	3340	3505	4.9	+4	0.95	√
平均	110.8	59.7	56.6	-3.1	3378	3835	12.9	+5	0.88	6/6

次洪检验共 6 场洪水,6 场均合格。从平均值看出,实测径流和计算径流相差 3.1mm,洪峰平均偏大 12.9%,峰现时间上,6 场均提前,平均提前 5h,说明后期洪水汇流特征变化不大且洪水模拟效果较好。

4 结论与展望

本文在赣江流域峡山站以上区域内 21198 个栅格上采用新安江模型进行产流计算,并运用 Muskingum-Cunge 法按最优演算次序进行汇流计算,结果显示该流域日模参数率定符合一般规律,次洪模型中 22 场洪水拟合精度较高,表明栅格型新安江模型用于赣江流域洪水过程模拟是可行的。

本文研究过程中得到的模型参数可能不是最优,若将自动优化和人工优化相结合,会达到更好的效果。本文未考虑各栅格上产汇流参数的空间异质性,给模型计算带来一定的误差。诚然,造成误差还有其它原因,诸如资料输入误差、人为影响径流过程造成误差和参数误差等。随着人类活动愈演愈烈,人类活动影响径流过程的比重在逐步增加,在今后水文模型的建立中如何将人类活动的影响反映在模型中,将是未来水文模型需要思考的问题之一。

参考文献:

[1] 任立良,刘新仁.基于数字流域的水文过程模拟研究[J].自然灾害学报,2000,9(4):45-52. (REN Liliang, LIU Xinren. Hydrological processes modeling based on digital basin [J]. Journal of Natural Disasters, 2001,9(4):45-52. (in Chinese))

[2] 李致家,姚成,章玉霞,等.栅格型新安江模型的研究[J].水力发电学报,2009,28(2):25-34. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Yuxia, ect. Study on grid-based Xianjiang model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009,28(2):25-34.(in Chinese))

[3] 关传强,李丹,王贵作.栅格型分布式流域水文模型构建[J].黑龙江

水利科技,2012,40(10):21-24. (GUAN Chuantao, LI Dan, WANG Guizuo. Construction of grid distributed watershed hydrological model [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2012,40(10):21-24. (in Chinese))

[4] 刘新仁.数字水文系统建设—信息时代的水文技术变革[J].水文,2000,20(4):5-8. (LIU Xinren. Digital hydrology [J]. Hydrology, 2000,20(4):5-8. (in Chinese))

[5] 任立良,刘新仁.数字时代水文模拟技术的变革[J].河海大学学报(自然科学版),2000,28(5):1-6. (REN Liliang, LIU Xinren. Transformation of hydrological modeling techniques in the digital era [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2000,28(5):1-6. (in Chinese))

[6] 袁飞,任立良.栅格型水文模型及其应用[J].河海大学学报(自然科学版),2004,32(5):483-487. (YUAN Fei, REN Liliang. Methodology of grid-based hydrological model and its application [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004,32(5):483-487. (in Chinese))

[7] 郭华.气候变化及土地覆被变化对鄱阳湖流域径流的影响[D].南京:中国科学院南京地理与湖泊研究所,2007. (GUO Hua. Impacts of Climate Variation and Landuse Change on Streamflow of Poyang Lake Catchment [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese))

[8] 黄兆祥,朱爱民,熊国保,等.赣江沿岸植被及其生态对策[J].江西大学学报(自然科学版),1990,14(2):8-15. (HUANG Zhaoxiang, ZHU Aimin, XIONG Guobao, ect. Vegetation along the bank of Ganjiang River and ecological countermeasure [J]. Journal of Jiangxi University (Natural Science), 1990,14(2):8-15. (in Chinese))

[9] Martz L W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models [J]. Computers & Geosciences, 1992,18(6):747-761.

[10] Fairfield J, Leymarie P. Drainage networks from grid digital elevation models [J]. Water Resources Research, 1991,27(5):709-717.

[11] 包为民.水文预报[M].北京:中国水利水电出版社,2006. (BAO Weimin. Flood Forecasting [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2006. (in Chinese))

(下转第 60 页)

- WANG Jinsong. The design of the soil moisture sensor based on FDR[J]. *Instrumentation and Measurement*, 2011,30(11):61-65. (in Chinese)
- [10] G.C. Topp, J.L. Davis, A.P. Annan. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines [J]. *Water Resources Research*, 1980,16(3): 574-582.
- [11] 王景才,夏自强,杨建青,等. 土壤水分传感器田间比测实验研究[J]. *水利信息化*, 2012,2: 41-45. (WANG Jingcai, XIA Ziqiang, YANG Jianqing, et al. Study on field comparison test of soil moisture sensor [J]. *Water Resources Informatization*, 2012,2:41-45. (in Chinese))
- [12] 杨建青,王吉星,章树安,等. 土壤水分监测仪器野外对比测试分析研究[J]. *水文*, 2012,32 (5):57-61. (YANG Jianqing, WANG Jixing, ZHANG Shuan, et al. Comparison on performance of soil moisture monitoring sensors through field monitoring [J]. *Journal of China Hydrology*, 2012,32(5):57-61. (in Chinese))
- [13] 章树安,王爱平,杨桂莲,等. 旱情监测与评价进展研究与思考[J]. *水文*, 2010,30 (3):15-21. (ZHANG Shuan, WANG Aiping, YANG Guilian, et al. Thought and research on progress of drought severity monitoring and assessment [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010,30(3):15-21. (in Chinese))

Comparative Analysis of 4 Types of Soil Moisture Sensors

SU Zhicheng¹, ZHANG Lizhen², DING Liuqian¹, ZHANG Wenting³, HAN Shuo², WANG Qi²

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;*

2. *College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;*

3. *Tongzhou Branch of Road Administration of Beijing Municipal Commission of Transport, Beijing 101100, China)*

Abstract: In this study, 4 different types of soil moisture sensors with different operating principles were employed to conduct a half-year comparative analysis at Shangzhuang Experimental Station in Beijing. Based on the monitored data, analysis of soil moisture sensor's stability, sensitivity and accuracy were carried out. The results show that each type of the sensor exhibits its own advantages and disadvantages. In general, all types of the sensors exhibits good stability and good reaction to precipitation. The accuracy of the 4 types of sensors show little difference, by fluctuating around the value of oven drying method. This comparative analysis will provide a reference to understand the performance of different soil moisture sensors, and then promote their wide application.

Key words: soil moisture; sensor; comparative analysis

(上接第 31 页)

Application of Grid-based Xin'anjiang Model in Ganjiang River Basin

SHAN Hongcui, REN Liliang, ZHOU Yujia

(*State Key Laboratory of Hydrology & Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: On the basis of grid digital elevation data, the digital river network and spatial topological relation were generated over the area controlled by the Xiashan Hydrometry Station in the Ganjiang River Basin, including 21 198 grid cells at a resolution of 30s. The grid-based precipitation and evaporation data obtained from the nearest stations were applied to calculate the hydrograph at Xiashan Station. In daily mode, the duration from 1978 to 1985 was taken as the calibration period for the Xin'anjiang Model with the objective function of minimal runoff error, the duration from 1986 to 1987 as the verification period of model parameters. In flood event-based mode, the 16 flood hydrographs were used for parameters calibration, and the other 6 hydrographs for model verification, by taking runoff depth, flood peak discharge, peak timing and model efficiency coefficient as the objective functions. The computational results show that 88% of the flood events for calibration are acceptable in the event-based mode, and other 6 flood events for verification are valid. Therefore, the grid-based Xin'anjiang model performs well as applied in the study catchment.

Key words: digital elevation model; Xin'anjiang Model; daily model; flood event-based mode; parameters calibration