

基于栅格的新安江模型的构建和应用

李致家¹, 姚 成¹, 汪中华²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 济宁市水文水资源勘测局, 山东 济宁 272045)

摘要 根据分布式模型和新安江模型的最新理论, 建立了基于栅格的分布式新安江水文模型, 该模型能够考虑网格之间的水量交换. 将建立的模型用于钱塘江支流密赛流域的洪水模拟计算, 并与新安江模型的计算结果进行比较, 可以看出, 基于栅格的分布式新安江水文模型可以很好地应用于该流域进行洪水模拟, 其模拟精度于原新安江模型的精度相当.

关键词 分布式水文模型 新安江模型 Grid-Xinanjiang 模型 洪水模拟

中图分类号 P333 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2007)02-0131-04

从 20 世纪 80 年代开始, 特别是基于半物理基础的水文模型 TOPMODEL 的出现^[1-2], 使分布式水文模型成为研究的热点. TOPKAPI 模型是在 TOPMODEL 模型基础上发展起来的有代表性的分布式水文模型^[3], 随后是 BTOPOMC 模型^[4], 而 GTOPMODEL 模型是以 TOPMODEL 模型和 BTOPOMC 模型为基础的基于每个网格进行产流计算的分布式水文模型^[5]. 理论上, TOPMODEL 模型和新安江模型都是蓄满产流机制, 适用于湿润和半湿润地区. 最近一些研究表明, 虽然单点产流的原理是霍尔顿机制, 但由于流域内降雨、下垫面分布不均匀以及水流的横向运动, 因此单元流域的产流机制属于蓄满产流^[6]. 有学者采用新安江、TOPMODEL 和 HEC 这 3 个适用于湿润地区的模型对半干旱的海河流域进行模拟, 结果差别不大, 说明在目前资料的情况下, 蓄满产流一类的模型可以扩展到半干旱地区^[7]. 新安江模型是一个半分布式的概念性模型, 在中国的洪水预报中得到了广泛的应用^[8-9], 因此研究栅格化的新安江模型具有一定的现实意义. 本文在数字高程模型 DEM 的基础上, 提取了水文模拟所需要的流域特征, 然后对新安江模型进行栅格化, 建立了基于栅格的分布式新安江水文模型(Grid-Xinanjiang 模型). 将该模型与新安江模型应用于湿润地区的钱塘江支流密赛流域进行洪水模拟计算, 取得了比较满意的结果.

1 基于网格的新安江模型构建

1.1 新安江模型

新安江模型是一个分散参数的概念性模型. 对于较大流域, 根据流域下垫面的水文、地理情况将其分为若干个单元面积, 将每个单元面积预报的流量过程演算到流域出口, 然后叠加起来即为整个流域的预报流量过程. 三水源新安江模型由 4 个模块组成, 分别为蒸散发计算、产流量计算、分水源计算、汇流计算^[8-9].

1.2 Grid-Xinanjiang 模型

构建 Grid-Xinanjiang 模型, 必须先根据 DEM 资料提取相关的流域信息, 即经过 DEM 预处理、流向确定、水系生成及流域提取等一系列过程, 然后由处理后的 DEM 和流向构建一个栅格演算次序矩阵:(a) 在集水面积矩阵的基础上, 搜索出具有最大集水面积的栅格点(即流域出口), 并赋值为当前计算次序 $k(k=1)$. (b) 累加 $k(k=k+1)$, 按照顺时针方向(从正北方邻点开始)依次扫描所有前一赋值点周围的 8 个邻点. 如果邻点流入前赋值点, 则赋值该邻点当前计算次序 k . (c) 重复步骤(b)直到没有栅格可以赋值. (d) 将得到的计算次序矩阵倒排序, 即将最大值与最小值交换, 依此类推, 得到栅格演算次序矩阵.

以 DEM 为基础, 在 Grid-Xinanjiang 模型计算中, 将每一个栅格作为一个子流域处理, 蒸散发计算、产流量计算、分水源计算均采用新安江模型的计算方法, 分别采用 3 层蒸散发模型、蓄满产流模型及自由水蓄水库

结构进行水源划分,可得到每一个栅格的产流量和地表、壤中、地下 3 种水源.然后根据栅格演算次序矩阵,将每一个栅格上的地表径流、壤中流按照 Muskingum 法^[10]逐栅格演算至流域的出口,地下径流则采用新安江模型中线性水库的方法演算至流域出口.在进行栅格演算时,如果当前栅格的土壤含水量未达到饱和,则上游栅格的产流量首先补充当前栅格的土壤含水量.如果当前栅格有河道存在,属于河道栅格,则地表径流、壤中流将有部分汇入河道中.

在 Grid-Xinanjiang 模型中,只考虑地表径流、壤中流对河道和土壤含水量有贡献,汇流也是如此.地表径流、壤中流与地下径流分别采用 2 种方法计算.如图 1 所示,当前栅格为一河道栅格,土壤含水量属于非饱和状态.图中 P 为栅格实际降雨量; E 为蒸发量; S 为土壤实际蓄水量; SM' 为土壤蓄水能力; $Q_{SI_{in}}$ 为上游栅格地表径流、壤中流的出流量,即当前栅格地表径流、壤中流的入流量; $Q_{C_{in}}$ 为上游栅格河道出流量; $Q_{G_{in}}$ 为上游栅格地下径流的出流量,即当前栅格地下径流的入流量; $Q_{C_{sg}}$ 为地表径流、壤中流汇入河道流量; $Q_{SI_{out}}$ 为当前栅格地表径流、壤中流出流量; $Q_{C_{out}}$ 为当前栅格河道出流量; $Q_{G_{out}}$ 为当前栅格地下径流出流量.

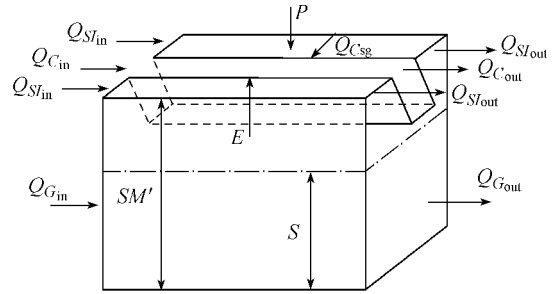


图 1 非饱和河道栅格示意图

Fig.1 Sketch of a unsaturated channel grid

对于非饱和的栅格,将 $Q_{SI_{in}}$ 与降雨 P 叠加后用新安江模型的方法进行产流计算:

$$P_{in} = P + Q_{SI_{in}} 3.6 T_D / G_{Area} \tag{1}$$

式中: P_{in} ——用于计算的雨量值; T_D ——计算时段; G_{Area} ——栅格的面积.

经过产流计算后,就可得到当前栅格地表径流量 Q_S 与地下径流量 Q_I ,然后可算出汇入河道流量以及当前时段的河道入流量 Q_C .

$$Q_{C_{sg}} = (Q_S + Q_I) d_p \tag{2}$$

$$Q_C = Q_{C_{sg}} + Q_{C_{in}} \tag{3}$$

式中 d_p 为 Q_S 与 Q_I 汇入河道的比例.

在汇流过程中,地表径流、壤中流以及河道流量都采用 Muskingum 逐栅格演算法.下面以非河道栅格为例.

图 2 所示区域由 6 个非河道栅格组成,其中 a, b, c 栅格水流都流入 d ,出流量分别为 Q_a, Q_b 和 Q_c ,由 Muskingum 法(式(4))演算到 d 得 Q'_a, Q'_b 和 Q'_c .则 d 出流量 Q_d 为 Q'_a, Q'_b, Q'_c 及自身产流量 Q_{d_0} 之和(式(5)):

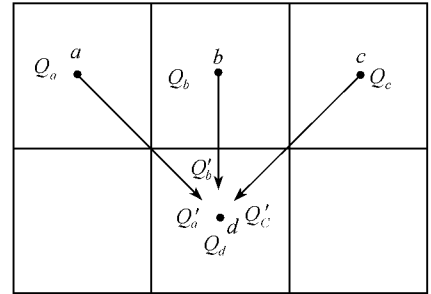


图 2 Muskingum 逐栅格演算法

Fig.2 Grid-to-grid routing of Muskingum method

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_1 Q_j^n + C_2 Q_j^{n+1} + C_3 Q_{j+1}^n \tag{4}$$

$$C_1 = \frac{0.5\Delta t - xk}{(1-x)k + 0.5\Delta t} \quad C_2 = \frac{xk + 0.5\Delta t}{(1-x)k + 0.5\Delta t} \quad C_3 = \frac{(1-x)k - 0.5\Delta t}{(1-x)k + 0.5\Delta t}$$

式中: k ——洪水传播速度; x ——Muskingum 法的权重系数.

$$Q_d(t) = Q'_a(t) + Q'_b(t) + Q'_c(t) + Q_{d_0}(t) \tag{5}$$

2 研究流域及资料概况

密赛流域面积 797 km²,有 6 个雨量站,1 个蒸发站.该流域皆系温湿山丘区,雨量丰沛,植被良好.年雨量为 1 500 ~ 2 000 mm,年径流系数为 0.7 ~ 0.8.每年 4 ~ 6 月的梅雨期为该地区的主要雨季,降雨量可达全年的 60% 以上.采用 1981 ~ 1987 年汛期 16 次洪水进行洪水模拟,计算时段 1 h.

本文采用的 DEM 数据来自于美国地质调查局(USGS) GTOPO30 公共域免费提供的 30'' × 30'' 的 DEM 数据^[8].采用 GIS 提取水系和划分子流域.图 3 为密赛流域示意图及其雨量站的位置,图 4 为密赛流域的水系图.

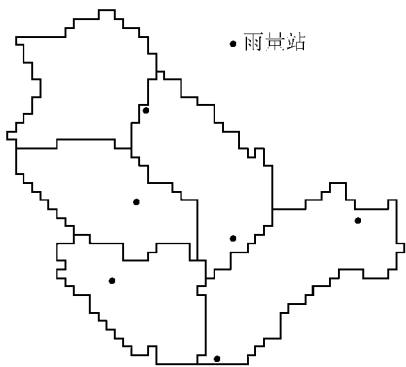


图 3 密赛流域示意图
Fig.3 Sketch of Misai Catchment

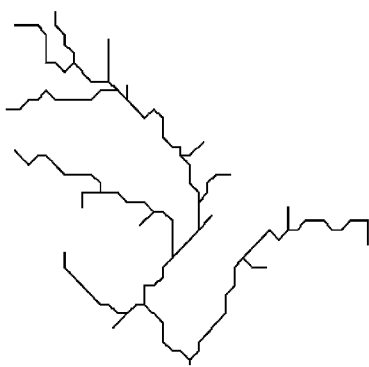


图 4 密赛流域水系
Fig.4 Sketch of river network
of Misai Catchment

3 模型率定、检验和与比较

对于密赛流域,分别采用新安江模型及 Grid-Xinanjiaang 模型进行洪水模拟,表 1 为 2 个模型模拟后的相关特征值比较.该表是按实测洪峰从大到小排列的.图 5 为 2 次洪水的模拟过程线.

表 1 2 个模型模拟结果特征值统计对比

Table 1 Comparison of simulated results of two models

洪号	起始时间	实测洪峰流 量/(m ³ ·s ⁻¹)	实测径 流深/mm	洪峰相对误差/%		径流深相对误差/%		峰现时差/h		确定性系数	
				G-X	X	G-X	X	G-X	X	G-X	X
3	1983-05-28T24	1820	168.5	-2.5	-7.6	18.9	13.9	-2	-2	0.89	0.93
2	1982-06-19T08	1650	197.5	6.0	-4.8	14.9	11.9	1	-1	0.88	0.92
5	1983-06-19T24	1420	175.2	-8.5	-6.9	4.9	7.5	1	0	0.95	0.95
16	1988-06-20T24	1420	154.1	1.9	1.9	4.5	13.9	-1	-1	0.96	0.93
15	1987-06-20T06	1370	286.9	1.4	-0.9	7.8	6.4	1	-1	0.91	0.89
11	1986-05-19T08	1240	104.3	7.6	8.7	7.6	19.0	2	0	0.91	0.92
4	1983-06-13T24	942	77.7	4.9	2.7	12.6	17.3	0	0	0.84	0.86
6	1984-04-02T16	795	132.6	-3.9	-9.2	1.9	3.0	1	0	0.98	0.97
9	1985-05-04T08	745	63.8	-9.6	-6.9	-4.8	8.1	1	0	0.93	0.89
10	1985-07-03T08	398	62.4	-18.0	-18.0	3.3	15.0	7	5	0.92	0.91
1	1982-04-02T11	345	64.9	-10.0	-0.8	-5.6	7.9	-1	-3	0.95	0.88
8	1984-06-07T08	287	43.6	-3.6	-9.9	4.1	12.7	0	-2	0.89	0.89
7	1984-05-12T08	279	75.8	18.2	9.8	9.4	16.1	1	-1	0.8	0.81
13	1987-04-25T08	271.4	44.3	-12.2	-17.3	-11.8	0.8	2	1	0.97	0.96
12	1986-07-04T08	266.7	49.5	-22.4	-25.3	4.5	20.4	0	-3	0.91	0.83
14	1987-05-26T08	207	38.4	18.5	12.6	3.9	12.6	2	1	0.78	0.83
均值				9.3	8.9	7.5	11.7	1.4	1.3	0.91	0.90

注 :G-X 为 Grid-Xinanjiaang 模型,X 为新安江模型.洪峰相对误差、径流深相对误差和峰现时差的均值指其绝对值的均值.

由表 1 可以看出,Grid-Xinanjiaang 模型能很好地模拟密赛流域的每次洪水,很好控制洪峰、径流深及峰现时间,也能得到较高的确定性系数.只有第 12 场洪水的洪峰误差超过 20%,不符合水情预报标准.可以看出,新安江模型对第 12 场洪水的模拟也不够好.比较而言,Grid-Xinanjiaang 模型能够得到更高的模拟精度.造成这种结果的原因可能有 3 种:(a)资料误差;(b)人类活动与水利工程的影响;(c)模型结构.

4 结 语

Grid-Xinanjiaang 模型是将新安江模型计算栅格化,并考虑了每一栅格之前的水量交换以及河道排水网络的影响.从密赛流域的应用来看,Grid-Xinanjiaang 模型能够得到较高的模拟精度.随着数字技术的飞速发展,以每一个栅格为基础的分布式水文模型不仅可以得到流域出口断面的流量过程,也可以得到流域内每一个栅格的水文过程,如 Grid-Xinanjiaang 模型.

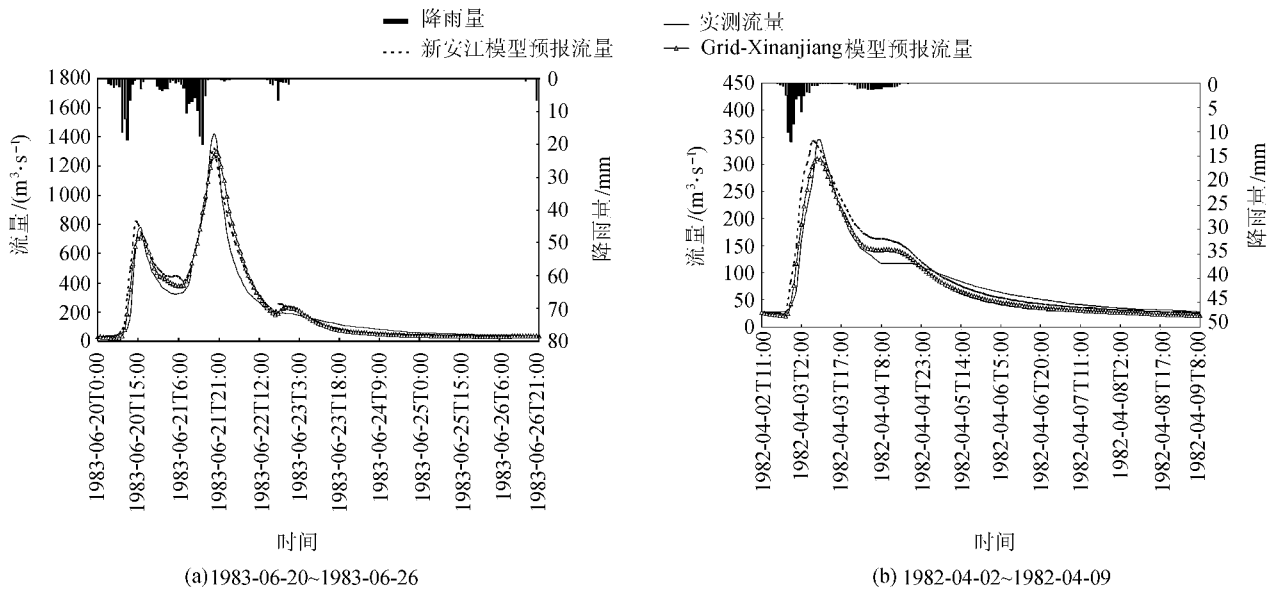


图 5 密赛流域 1983-06 和 1982-04 洪水过程线
Fig.5 Simulated and observed flood hydrographs of Misai Catchment for June of 1983 and April of 1982

参考文献：

[1] BEBEN K J,KIRKBY M J. A physically based,variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrol Sci Bull Sci Hydrol,1979, 24 1-3.

[2] BEBEN K J,LAMB R,QUINN P,et al. TOPMODEL[G]//SINGH V P. Computer Model of Watershed Hydrology. Littleton :Water Resources Publications,1996 215-232.

[3] TODINI E,CIARAPICA L.The TOPKAPI MODEL[G]//SINGH V P,DONALD K. Mathematical Models of Large Watershed Hydrology. Littleton :Water Resources Publications,2002 471-504.

[4] TAKEUCHI K. Introduction of block-use of TOPMODEL and Muskingum-Cunge method for the hydro-environmental simulation of large ungauged basin[J]. Hydrol Sci,1999,44(4) 633-646.

[5] 李致家,张珂. 基于 GIS 和 DEM 的分布式水文模型的应用比较[J]. 水利学报,2006,37(8) 1022-1028.

[6] TODINI E. The ARNO rainfall-runoff model[J]. J Hydrol,1996,175 339-382.

[7] 宋玉,李致家,杨涛. 分布式水文模型在淮河洪泽湖以上流域洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报 :自然科学版,2006,34(2) 127-131.

[8] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京 水利电力出版社,1984.

[9] ZHAO R J,LIU X R. The Xinanjiang model[G]//SINGH V P. Computer Models of Watershed Hydrology. Littleton :Water Resources Publication,1995 215-232.

[10] 张珂,李致家. GTOPMODEL 模型和 TOPMODEL 模型比较[J]. 河海大学学报 :自然科学版,2005,33(5) 509-512.

Development and application of grid-based Xinanjiang model

LI Zhi-jia¹, YAO Cheng¹, WANG Zhong-hua²

- (1. College of Water Resources and Environment , Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Jining Hydrology and Water Resources Survey Bureau , Jining 272045, China)

Abstract Based on the newly developed theory on distributed hydrological model and Xinanjiang model, a grid-based distributed Xinanjiang model (Grid-Xinanjiaing model) was developed. In this model, the water exchange among grids was taken into account. The developed model was applied to flood simulation of Misan Catchment, a tributary of the Qiantang River. The comparison of the calculated result of this model with that of the Xinanjiang model shows that the developed model is effective for flood simulation, and that the accuracy of the developed model is almost the same as that of the original Xinanjiang model.

Key words distributed hydrological model ; Xinanjiang model ; Grid-Xinanjiaing model ; flood simulation