

栅格型水文模型及其应用

袁 飞,任立良

(河海大学水资源开发教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要 选取汉江上游汉中水文站以上集水面积为研究区域,基于栅格型数字高程数据,利用数字高程流域水系模型,生成栅格水流流向,构建数字流域水系及空间拓扑关系;然后将逐步插值法处理后的栅格型降雨数据作为研究区内每一栅格单元上的雨量输入,并在各栅格上应用新安江降雨径流模型进行产流计算;再运用考虑区间侧向入流的 Muskingum-Cunge 法在栅格水系上进行“先合后演”的洪水演算,从而获得汉中站的流量过程。结果表明,栅格型水文模型不仅能演算出流域出口断面处的流量过程,还能方便地计算流域内各支流任一栅格点上的流量过程。

关键词 数字高程模型;数字流域;水系;水文模型;汇流;洪水

中图分类号 P338

文献标识码 A

文章编号 1000-198X(2004)05-0483-05

对陆面过程而言,地形起着十分重要的作用,在对地表过程进行描述、解释和定量化时必须考虑地形的影响^[1]。地形的起伏、坡度、坡向决定了土壤水分的大小、土壤发育的好坏、植被生长的快慢,影响着土地利用方式和降水的空间分布,以及径流流向和河网水系的形成及发育。地形是最易获取的流域下垫面信息。近年来研究表明,直接从栅格型数字高程模型 DEM(Digital Elevation Model)提取地形信息是可行的^[2],流域地形、植被、土壤、分水线、河网、子流域的表达及集水面积的计算完全能用数字技术实现^[3]。基于栅格 DEM 构建的数字流域已经成为水文学研究的基础,并为进一步研究栅格型水文模型提供了强有力的技术平台。

1 数字流域的构建

1.1 研究区域概况

选取汉江上游为研究区域。汉中水文站位于北纬 $32^{\circ}35' \sim 34^{\circ}10'$,东经 $106^{\circ}10' \sim 107^{\circ}30'$,控制集水面积为 $9\,329\text{ km}^2$,海拔高度 $459 \sim 3\,408\text{ m}$,地形较为复杂。研究区域设有铁锁关、茶店子、武侯镇、元墩、江口、马道、汉中 7 个水文站,大安等 50 个雨量站以及铁锁关等 4 个蒸发站。

1.2 DEM 数据的前处理

本研究所用的栅格型 DEM 数据来自美国国家地球物理数据中心提供的全球陆地 1 km 基础高程 GLOBE(Global Land One-kilometer Base Elevation)数据,其空间分辨率为 30 s,共 240 行、180 列。

应用数字高程流域水系模型 DEDNM(Digital Elevation Drainage Network Model)^[4]对 DEM 的凹陷区域进行识别和处理,设定平坦格网单元流向并确定全流域格网流向。DEDNM 针对两类不同的洼地采用不同的处理方法。对于阻挡形洼地,通过降低阻挡物存在处的高程,使水流穿过障碍物;对于凹陷形洼地,将洼地内所有栅格单元垫高至洼地周围最低栅格单元的高程。对于垫高产生的平地及 DEM 固有的平坦之处,DEDNM 采用高程增量叠加算法^[4]设定平坦网格内的水流方向。确定流域内各格网水流流向时,首先计算 DEM 各栅格与其邻近的 8 个栅格之间的坡度,然后按最陡坡度原则,即 D8(Deterministic Eight-neighbours)^[5]设定该单元的水流流向。图 1 所示的栅格水流流向即为进行栅格型水文模型汇流演算的虚拟河道。

1.3 流域河网拓扑关系生成

设定流域出口断面处所在 DEM 数据的行列号,运行 DEDNM 即可自动勾画流域边界,输出一个定义流域边界的数阵(流域内栅格用 1 表示,流域外栅格用 0 表示,见图 2(a)),同时生成一个包括流域内所有格网单元水流方向的数阵。由于 DEDNM 仅能生成基于子流域水系的河网拓扑关系,因此要建立栅格水系的河网拓

扑关系需对DEDNM中的一些中间成果进行处理.

a. 对流域内各栅格进行编码.如图2所示,在流域边界数值列阵中自左到右逐行搜索数值为1的栅格,对其按搜索次序从1开始依次编码.经过搜索,汉中以上集水区域共有13031个栅格,其中出口断面汉中天处的编码为10424.

b. 搜寻流域内各栅格的上下游节点.DEDNM采用D8方法生成了栅格流向数值列阵.按栅格编码顺序在栅格流向数值列阵中搜寻上下游节点,并与流域内栅格编码数值列阵(图2(b))对照,找出对应的上下游节点编码.

c. 计算栅格汇流演算最优次序(见图3,图中圆圈内的数字表示河网汇流演算最优次序).将流域内各栅格分为 N 个等级,流域出口断面所在的栅格为第1级栅格,第1级栅格的上游节点为第2级栅格,依此类推,直至第 N 级栅格.假设各级栅格分别具有 $k_i(i=1,2,\dots,N)$ 个栅格,则第 N 级的 k_N 个栅格最先演算,其汇流演算次序分别为 $1,2,\dots,k_N$;第 $N-1$ 级的 k_{N-1} 个栅格在第 N 级栅格后演算,其汇流演算次序分别为 $k_N+1,k_N+2,\dots,k_N+k_{N-1}$,依此类推,第 $I-1$ 级的 k_{I-1} 个栅格在第 I 级栅格后演算,其汇流演算次序分别为 $k_N+k_{N-1}+\dots+k_I+1,k_N+k_{N-1}+\dots+k_I+2,\dots,k_N+k_{N-1}+\dots+k_I+k_{I-1}$,出口断面所在的栅格最后演算,其汇流演算次序为 $k_N+k_{N-1}+\dots+k_I+\dots+k_1$.经过上述的数据处理,即可生成栅格汇流演算最优次序及河网拓扑关系(表1),从而为栅格型水文模型汇流演算打下基础.

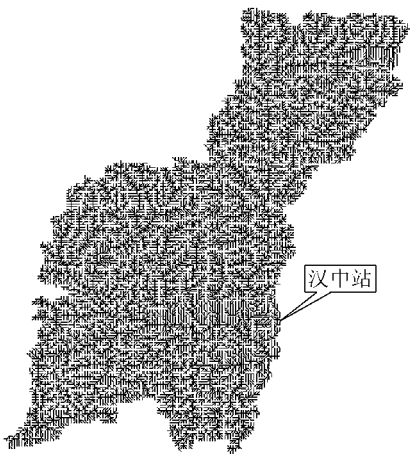


图1 最陡坡度原则确定的汉江汉中站以上集水区域的栅格水流流向
Fig.1 Grid-based flow vectors for the upper area of Hanzhong station in Hanjiang River Basin generated by the steepest descent method

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

(a) 流域边界数值列阵

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	2	3	0	0
0	4	5	6	7	8	0	0
0	9	10	11	12	13	14	0
0	0	15	16	17	18	0	0
0	0	0	19	20	21	22	0
0	0	0	23	24	25	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

(b) 流域内栅格编码数值列阵

图2 流域边界及其内栅格编码

Fig.2 Sketch map of basin boundary and grids coding

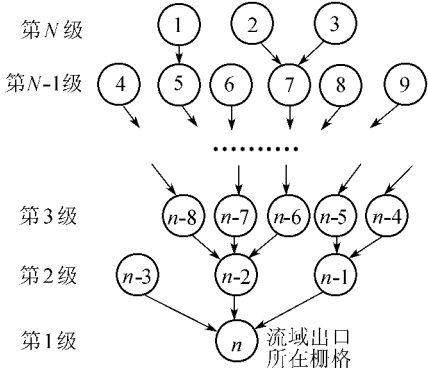


图3 栅格型水文模型汇流演算最优次序简图

Fig.3 Sketch showing execution sequence for runoff routing with grid-based hydrological model

表1 汉江流域栅格汇流演算最优次序及河网拓扑关系

Table 1 Execution sequence for grid-based runoff routing for Hanjiang River Basin and topological relation of drainage network

节点 编码	最优演算 次序 Sequ	上游入流节点							下游节点 Down	坡度	河长/m	集水面积 /km ²
		Up1	Up2	Up3	Up4	Up5	Up6	Up7				
1	568	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	7	0.1253	846.1	0.7195
2	567	-1	-1	-1	-1	3	-1	-1	7	0.1245	1196.4	0.7195
3	527	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	2	0.1265	846.1	0.7195
					...	...	...					
7000	31	6904	6905	-1	6999	7092	7093	-1	7001	0.0083	846.1	0.7195
7001	35	-1	6906	-1	7000	-1	7094	-1	7002	0.0012	846.1	0.7195
					...	...	...					
13030	10426	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	13027	0.1265	846.1	0.7195
13031	10425	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	13028	0.0969	846.1	0.7195

注:表中“-1”为无效数据.

2 Muskingum-Cunge 算法

在多支流河道的流域,由于各支流来水大小及时间不一,各河流的洪水波除自身运动规律外还受到各支流来水相互顶托干扰的作用,水流情况十分复杂.目前一般采用两种简化方法来进行多支流河道的洪水演算.(a)先演后合法,即假设各河段洪水波无干扰,独立传播演进,将上游各河段的洪水各自演算至流域出口,再线性叠加而成流域出口处的流量过程.该方法适用于河道坡降较大,干、支流来水相互干扰作用较小的河段.Muskingum 法常以“先演后合”的方式应用于多支流河道的洪水演算.(b)先合后演法,即将上游各支流的流量过程演算至各支流汇合点处叠加,然后再将叠加后的流量过程继续演算至下一支流汇合点处叠加,直至演算至流域出口断面为止.该方法反映了洪水的自然演进过程,较先演后合法更为合理.由 DEM 按最陡坡度原则生成的汇流演算虚拟河道亦为多支流河道,因此本文采用考虑区间侧向入流的 Muskingum-Cunge 法,建立“先合后演”的数字汇流模型.

2.1 基本原理

1969 年,康吉(Cunge)^[6~8]对圣维南连续方程采用四点带权偏心差分格式,空间差分权重取 1/2,则当时间差分权重为 $x = 1/2 - D/(C\Delta l)$ (D 为扩散系数, C 为波速, Δl 为空间步长)时,就得到能演算扩散波的 Muskingum-Cunge 法^[9].考虑区间侧向入流的 Muskingum-Cunge 法计算公式为

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_1 Q_j^n + C_2 Q_j^{n+1} + C_3 Q_{j+1}^n + C_4 \tag{1}$$
$$C_1 = \frac{xk + 0.5\Delta t}{(1-x)k + 0.5\Delta t} \quad C_2 = \frac{0.5\Delta t - xk}{(1-x)k + 0.5\Delta t}$$
$$C_3 = \frac{(1-x)k - 0.5\Delta t}{(1-x)k + 0.5\Delta t} \quad C_4 = \frac{q\Delta t\Delta l}{(1-x)k + 0.5\Delta t} \quad k = \frac{\Delta l}{C}$$

式中: C_1, C_2, C_3, C_4 ——演算系数; k ——洪水波在河段长为 Δl 中的传播时间; x ——Muskingum-Cunge 法的权重系数; q ——区间侧向单宽入流量.

2.2 Muskingum-Cunge 法在栅格水系中的应用

根据 D8 方法计算水流流向,假定栅格存在水平、垂直或对角线流向的虚拟河道,栅格内产生的径流均以侧向入流的形式流入河道.侧向入流可采用新安江降雨径流模型求出.图 4 所示区域由 6 个栅格组成,栅格 a, b 和 c 中的水流分别以 $Q_a(t), Q_b(t)$ 和 $Q_c(t)$ 汇入栅格 d (流入栅格 e 的总流量为 $Q_{e1}(t)$),然后栅格 e 中的水流以 $Q_{e2}(t)$ 流出.为推求出栅格 e 的出流过程 $Q_{e2}(t)$,首先运用新安江模型求出栅格 a, b, c 和 e 的单宽侧向入流 $q_a(t), q_b(t), q_c(t)$ 和 $q_e(t)$,然后采用式(1)差分计算出栅格 a, b, c 的出流过程 $Q_a(t), Q_b(t)$ 和 $Q_c(t)$,再将 $Q_a(t), Q_b(t)$ 和 $Q_c(t)$ 叠加即为栅格 e 的入流过程 $Q_{e1}(t)$;最后采用式(1)即可求出栅格 e 的出流过程 $Q_{e2}(t)$.

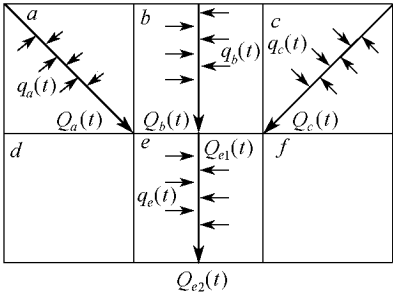


图 4 Muskingum-Cunge 洪水演算方法简图
Fig.4 Sketch of the Muskingum-Cunge flood routing method

由 DEM 生成的栅格流向水系通常为多支流水系,其流向关系较图 4 所示的复杂得多.对多支流水系的河网节点进行编码并搜寻栅格汇流演算最优次序是实施“先合后演”河道汇流计算方法的关键.利用栅格汇流演算最优次序和河网拓扑关系(表 1)采用 Muskingum-Cunge 法进行洪水演算步骤如下:(a)设置数组 Seq[M],Up[M],Up[M],Up[M],... ,Up[M]和 Down[M],分别用于存储各栅格节点的汇流演算最优次序、上游栅格节点编码和下游栅格节点编码.(b)运用新安江模型计算出流域各栅格内的单宽侧向入流量.(c)令 $K = 1$.(d)在 Seq[M]中搜寻到最优演算次序等于 K 的栅格节点,编码为 N .然后在 Up[N]~Up[N]中搜索栅格 N 的上游节点,若 Up[N]~Up[N]均等于 -1 ,则栅格 N 无上游节点,其入流量为 0,出流过程由栅格 N 内的侧向入流产生,若搜索到 Up[N]~Up[N]中不等于 -1 的 i 个栅格节点编码分别为 $L_1, L_2, \dots, L_i (i = 1, 2, \dots, 7)$,则将栅格 N 的上游栅格节点 $L_1, L_2, \dots, L_i$ 的出流过程叠加即为栅格 N 的入流过程.(e)采用式(1)将节点 N 的入流过程演算至下游节点 Down[N].若 Down[N]= -1 ,则洪水演算结束,若 Down[N] $\neq -1$,则 $K = K + 1$,返回步骤(d).

3 实例分析

本研究对汉中站 1980~1986 年 20 场洪水($\Delta t=1\text{ h}$)分别进行演算.首先,运用逐步插值法^[10]将雨量站的实测降雨数据插值成与 DEM 等分辨率的栅格型降雨数据;然后,将栅格型降雨数据输入新安江模型^[11]并对各栅格单元进行产流和坡面汇流计算;最后,采用 Muskingum-Cunge 法进行栅格汇流演算并对计算结果进行分析.经率定, Muskingum-Cunge 法的参数 $k=10\text{ min}$, $x=-0.4$, 时间步长 $\Delta t=10\text{ min}$, 距离步长 $\Delta l=1\text{ km}$.表 2 为汉中站 Muskingum-Cunge 法的洪水演算结果.

由表 2 可见,采用 Muskingum-Cunge 法演算的汉中站洪水流量过程模拟精度令人满意,各次洪水的洪峰流量相对误差在 $\pm 20\%$ 以内的占 70%,峰现时间误差在 4 h 以内的占 80%,径流深相对误差在 $\pm 20\%$ 以内的占 95%,流量过程线的确定性系数大于 0.7 的占 100%,大于 0.8 的占 85%.

由于 Muskingum-Cunge 法采用“先合后演”法进行洪水演算,在推求出流域出口处流量过程的同时,也能计算出流域内各支流的来水过程.图 5 为汉江上游汉中、茶店子、武侯镇和铁锁关站 8305 次洪水流量过程.

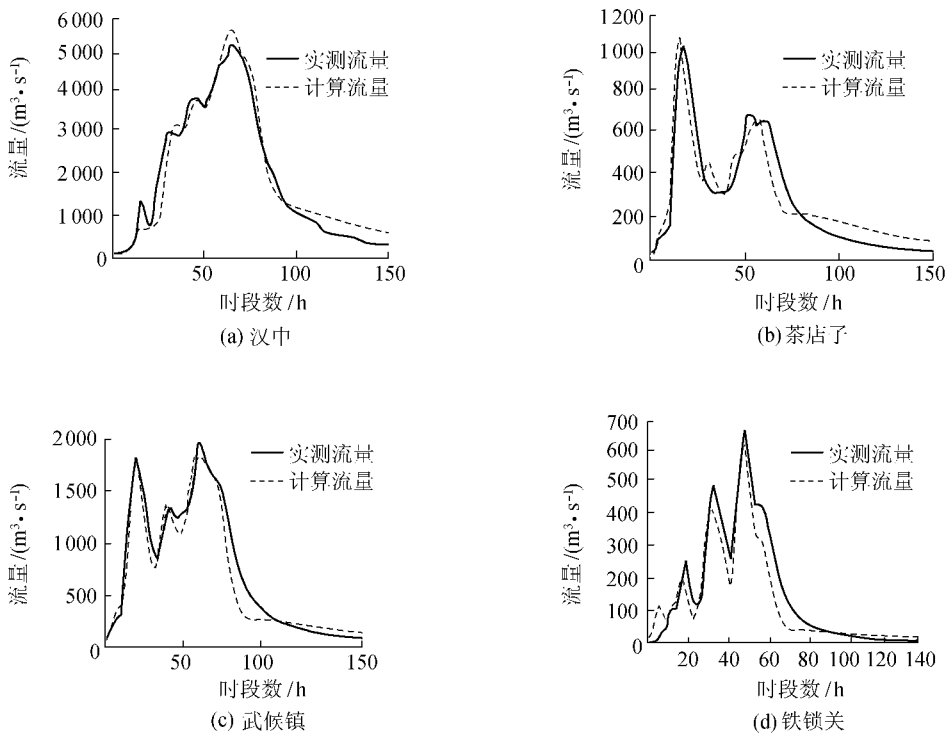


图 5 汉江 8305 次洪水各站流量过程

Fig.5 Hourly flow discharge of No.8305 flood at Hanzhong ,Chadianzi ,Wuhouzen , and Tiesuoguan stations respectively

表 2 Muskingum-Cunge 法的洪水演算结果(汉中站)

Table 2 Hourly flood discharge at Hanzhong station routed by Muskingum-Cunge method

洪号	洪峰流量			峰现时间 误差/h	径流深			确定性 系数
	实测	计算	误差		实测	计算	误差	
	$(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	$(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	$\%$		/mm	/mm	$\%$	
8001	3240	2559	-27.2	5	32.8	29.4	-10.3	0.850
8002	6040	6925	14.7	2	88.9	94.1	6.0	0.933
8004	1860	2030	9.1	-3	29.4	32.9	11.7	0.835
8005	3320	3808	14.7	-2	41.7	51.9	24.4	0.792
8006	1950	1848	-5.2	-3	54.4	65.0	19.5	0.786
8102	5980	8228	37.6	-1	117.1	134.6	15.0	0.889
8104	8310	9749	17.3	2	405.3	436.8	7.8	0.867
8105	4620	4475	-3.1	2	260.4	235.0	-9.7	0.941
8201	2200	1729	-21.4	6	32.8	30.8	-6.3	0.863
8203	3460	3860	11.6	2	142.6	153.1	7.4	0.846
8302	3110	2278	-26.8	0	59.5	49.5	-16.7	0.845
8303	3500	2498	-28.6	-3	59.9	59.5	-0.7	0.838
8305	5260	5649	7.4	0	114.4	120.3	5.1	0.959
8306	3370	2810	-16.6	2	45.3	45.0	-0.7	0.930
8402	2900	2889	-0.4	6	62.3	57.4	-7.8	0.855
8404	1760	1516	-13.9	-2	27.6	28.9	4.6	0.822
8405	1600	1114	-30.4	-4	23.7	28.2	19.0	0.874
8406	2800	2411	-13.9	0	91.8	97.2	6.0	0.824
8502	2400	2205	-8.1	3	81.5	83.4	2.2	0.900
8602	1390	1339	-3.6	7	36.0	32.3	-10.3	0.781

4 结 论

- a. 本研究在栅格 DEM 生成的数字流域内所有栅格上采用新安江模型构建产流模型 ,并运用 Muskingum-Cunge 法按最优演算次序进行汇流计算 ,洪水拟合精度较高. 栅格型水文模型不仅能演算流域出口断面处的流量过程 ,还能方便地给出流域内各支流任一栅格点上的流量过程 ,对深刻揭示流域内部的水文规律、合理调配区域水资源、及时准确进行防洪决策具有重要的理论意义和实践价值.
- b. 基于栅格单元的水文模型是真正意义上的数字水文模型 ,它为遥感遥测技术所获取的雨量信息在水文模型中的应用提供了最佳平台和技术准备. 雷达或卫星捕获的高分辨率实时雨量信息可以与数字水文模型进行最佳联结 ,实现降雨输入与模型之间的完整结合 ,这就解决了长期困扰水文模型的雨量信息输入问题 ,提高了模型预报的精度及预见期长度.

参考文献 :

[1] BEVEN K. Changing ideas in hydrology-the case of physically-based model[J]. J Hydrol ,1989 ,105 :157—172.

[2] REN Li-liang ,LI Chun-hong ,WANG Mei-rong. Application of radar-measured rain data in hydrological processes modeling during the intensified observation period of HUBEX[J]. Advances in Atmospheric Sciences 2003 ,20(2) :205—211.

[3] 任立良 ,刘新仁. 基于 DEM 的水文物理过程研究[J]. 地理研究 ,2002 ,19(4) :369—376.

[4] MARTZ W ,GARBRECHT J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation model[J]. Computers & Geosciences ,1992 ,18(6) :741—761.

[5] FAIRYFIELD J ,LEYMARIE P. Drainage networks from grid digital elevation model[J]. Water Resources Research ,1991 ,27(4) :29—61.

[6] CUNGE K A. On the subject of a flood propagation method(Muskingum Method) [J]. J Hydraulic Research ,1969 ,7(2) :205—230.

[7] PRICE R K ,HARRISON A J M. Flood routing studie[M]. London : Natural Environment Research Council ,1975. 33—34.

[8] 芮孝芳. 产汇流理论[M]. 北京 :水利电力出版社 ,1995. 85—87.

[9] 芮孝芳 ,王伶俐. 具有预见期的洪水演算方法研究[J]. 水科学进展 ,2000 ,11(3) :291—295.

[10] 周锁铨 ,缪启龙 ,吴息 ,等. 日照百分率的小网格分析方法[J]. 气象科学 ,1993 ,13(2) :201—210.

[11] ZHAO Ren-jun. The Xinanjiang model applied in China[J]. J Hydrol ,1992 ,135 :371—381.

Methodology of grid-based hydrological model and its application

YUAN Fei , REN Li-liang

(Key Laboratory of Water Resources Development of Ministry of Education , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract On the basis of grid digital elevation data , the grid flow vector , digital basin and spatial topographical structure were generated for the upper catchment of the Hanzhong hydrological station on the upper Hanjiang River by use of the Digital Elevation Drainage Network Model for river basins. The grid precipitation data after step-by-step interpolation were taken as the input of the Xin'anjiang model for runoff calculation for each grid element. Then , the Muskingum-Cunge method , considering the lateral inflows , was applied to flood routing on the platform of grid drainage network , and a grid-based hydrological model with high precision was derived. The model is not only able to route the discharge hydrograph for the outlet section of the catchment , but also capable of computing the discharge fluctuation at any grid of different tributaries in the catchment. As a result , the grid-based digital basin coupled with the grid-based hydrological model is of certain theoretical value and practical significance to deepen understanding of hydrological physical mechanism , water resources management , and flood prevention in the catchment.

Key words digital elevation model ; digital river basin ; channel network ; hydrological model ; runoff ; flood