

流域数字水文模型研究

任立良

(淮海大学水文水资源及环境学院 , 江苏 南京 210098)

摘要 探讨了数字水文模型的基本内涵和基本框架 , 首先利用数字高程数据自动提取流域水系 , 构建数字高程流域水系模型 , 主要包括数字高程模型中凹陷区域的识别和处理、平坦部位水流流向设定、子流域集水单元勾划、河网生成、河网与子流域编码及河网结构拓扑关系的建立 , 然后在每一集水单元上建立数字产流模型 , 再根据河网结构拓扑关系建立数字河网汇流模型 , 从而形成数字水文模型 , 通过淮河流域能量与水分循环试验强化观测资料的检验 , 结果表明数字水文模型能够很好地模拟洪水的涨落过程 .

关键词 数字化 ; 数字高程模型 ; 水系 ; 拓扑 ; 产流
中图分类号 : P33 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2000)04- 0001- 07

90 年代以来 , 随着计算机科学和数字化信息技术的发展 , 水文科学正经历着一场前所未有的革新 , 水文研究的技术手段发生了根本性的质的变化 , 水文学与计算机及信息科学的交叉形成了数字水文学^[1] . 17 世纪末 , 在人们建立了水文循环的基本概念和流域水量平衡基本原理后 , 流域对降水的水文响应就是科学水文学与工程水文学的最基本课题 . 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 , 描述高分辨率空间变化的水文过程需要我们依据流域下垫面资料寻求有物理基础的解决途径 .

对陆面过程而言 , 地形起着十分重要的作用 , 在地表过程的描述、解释和定量化时必须要考虑地形的影响 . 地形的起伏、坡度、坡向不仅决定了土壤水分、土壤的发育、植被的生长 , 影响着土地利用方式和降水的空间分布 , 而且还控制着径流流向与河网水系的形成及发育 .

在当今数字时代 , 描述流域下垫面空间分布信息的技术日渐完善 , 这就为水文模拟技术的变革和革新提供了坚实的基础 . 数字地形模型(Digital Terrain Model , 缩写为 DTM)是指地面诸特性空间分布的数字描述 , 其本质属性是二维地理空间定位和数字表达 , 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化技术实现 , 从而改变传统的手工方式 . 通常 DTM 所描述的地面特性是高程 Z , 它的空间分布由 X , Y 水平坐标系来描述 , 也可用经纬度来描述 , 将这种高程空间分布的数字地形模型称作数字高程模型(Digital Elevation Model , 缩写成 DEM) . DTM 与 DEM 的出现为数字水文学的发展和数字水文模型的诞生提供了坚实的技术基础 .

数字水文模型就是构建在 DTM/DEM 基础之上的一种分布式水文模型 , 先由 DTM 建立数字高程流域水系模型 , 再与数字产流模型和数字汇流模型有机结合形成数字水文模型 , 其基本框架见图 1 . 数字水文模型是一种有物理基础的大容量信息的现代模拟技术 , 体现了水文模型的分单元、分层、分水源的原则 . 流域所有的下垫面特征(诸如流域分水线、子流域集水面积、水系、地形、植被、土壤) 都是栅格型数字式

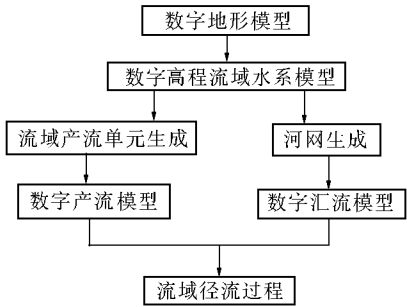


图 1 数字水文模型的基本框架

Fig.1 Framework of digital hydrological model

的点阵,流域产流单元、汇流路径、水系是根据地形由计算机自动生成的,无须手工操作。由DTM/DEM可衍生出数字高程流域水系模型或数字河网模型,在此基础上依据下垫面地形特性、水流方向及河网水系特征由计算机将研究流域自动划分成子单元,该子单元可以根据需要划分成任意大小,这种子单元划分的方法具有一定的物理基础,避免了以往水文模型中根据降雨站网划分子流域单元的缺陷。在这些子单元上根据各自的下垫面特性(这些特性也是数字式的)分别构建数字产流模型,再与基于数字河网模型的数字汇流模型嵌套联结,最终获得流域出口断面的水文过程。

1 数字高程流域水系模型基本原理与计算步骤

近十年来的研究表明,从DEM直接提取流域信息是可行的,由DEM自动提取水系和子流域特征代表着流域参数化方便而迅速的一种途径^[2]。通常由栅格型DEM自动生成河网是采用O'Callaghan和Mark^[3]提出的坡面流模拟方法,应用时会遇到两个最基本的问题:(a)凹陷与平坦处水流方向的设定;(b)水道起始点位置的确定。O'Callaghan和Mark^[3]建议平滑DEM数据处理洼地,Jenson和Dominique^[4]、Martz和deJong^[5]采用垫高填平的方法处理凹陷区域,而Garbrecht和Campbell^①将洼地分成阻挡型与凹陷型,并进行分别处理,同时采用高程增量叠加算法来设定平坦部位的流向。

至于水道起始点位置确定的问题,O'Callaghan和Mark^[3]采用了最小水道给养面积阈值(形成永久性水道所必需的集水面积)的概念。之所以采用这一概念,是因为它能直接产生单一方向且联结完好的河网系统,其理论基础(坡面流)是形成河流水系的基本水文过程。Martz和Garbrecht^[6]认为以水道给养面积阈值这单个参数来反映河网发育的影响因子(诸如地形、地质、土壤和植被)相互作用的复杂关系,当其应用到相对均一的下垫面时可生成较合理的水系,但应用到两类截然不同的地貌(如平原与山地)区域时则会生成大量的伪水道^[7],这是因为它企图采用单一相同的水道给养面积阈值来描述两种完全不同的地貌类型,从而违背了方法的基本假定。解决此问题的一种可能途径就是考虑关键地貌参数的空间变化,即在不同类型的区域设置不同的水道给养面积阈值。

数字高程流域水系模型DEDNM(Digital Elevation Drainage Network Model)^[2]是一种数字河网模型,它能给出如下结果:(a)栅格水流流向;(b)流域分水线;(c)自动生成的河网及子流域;(d)河道与子流域的编码;(e)河网结构拓扑关系。

1.1 DEM凹陷区域识别与处理

顾名思义,凹陷区域是指四周高、中间低的栅格单元。与以往的处理方法有所不同,洼地可分为两种类型:凹陷型洼地和阻挡型洼地。凹陷型洼地是指一组栅格单元的高程低于其四周,而阻挡型洼地是指垂直于排水路径方向有一条狭长带栅格单元的高程较高,类似于横跨河道的障碍物或坝体。对于阻挡型洼地,可通过降低阻挡物存在处的高程,使水流穿过障碍物;对于凹陷型洼地,采用常规的方法,即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。

1.2 平坦格网单元流向设定

对DEM原先存在的或经过垫高产生的平坦区域,Martz和Garbrecht^[2]采用高程增量叠加算法设定平坦格网内的水流方向,即通过平坦栅格单元数字高程的微调(增高)产生整个研究区域内合理的汇流水系。这种处理方法避免了任意设置排水路径的弊端。高程增量叠加法需要两个数阵:一个是经过凹陷点垫高填平处理后的DEM数阵,称作数阵A;另一个是数阵A的拷贝,称作备份数阵B。首先搜索数阵A的每一个单元,检查是否存在四周高、中间低的凹点,如果不存在,则说明凹点已被填平,且该单元是平坦区域的一部分,相应地在备份数阵B对应单元上叠加0.001m的高程增量。一旦数阵A中搜索到平坦区域,数阵B中对应单元高程就增加0.001m,这时以数阵B中的数据取代数阵A中的数据,并继续重复搜索数阵A,直到平坦区域不存在为止。每完成一次搜索都在找到的平坦区域内叠加一个高程增量,如按最陡坡度原则能够确定平坦区域任一栅格水流流向,则完成搜索。

1.3 格网流向的确定

首先计算DEM每一栅格单元与其相邻的8个单元之间的坡度,然后按最陡坡度原则设定该单元的水流

① Garbrecht J, Campbell J. TOPAZ: an automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and subcatchment parameterization. TOPAZ User Manual, USDA-ARS, Oklahoma, 1997.

流向 ,Fairfield 和 Leymarie^[8]将此种方法称为 D8 (Deterministic eight-neighbours). 值得一提的是 DEM 数阵范围要比研究流域的区域略大一些 ,否则会给格网单元流向的确定带来不便 . 该算法的最终结果是包括所有格网单元水流方向的新的数阵 .

1.4 计算汇水面积

沿最陡坡度规则确定的水流路径可计算任一栅格单元的上坡汇水面积 ,只不过该汇水面积的量值是以栅格数目表示 ,从而产生一个包含每一栅格单元上坡汇水面积的新数阵 .

1.5 流域分水线识别

首先要给定流域出口断面的大致位置 ,即出口断面所在栅格单元的行列坐标 ,程序运行时将在屏幕上显示所给流域出口断面附近栅格单元的上坡集水面积 ,以便由此准确地定位流域出口断面 . 一旦出口断面位置确定 ,就可按前述确定的栅格流向采用搜索程序勾划流域边界 ,最终获得一个定义流域内外的数阵 .

1.6 河网生成

首先给定最小水道给养面积阈值 ,流域范围内集水面积超过该阈值的那些格点即定义为水道 . DEDNM 能够考虑下垫面空间变化特性生成水系 . 具体而言 ,在编制程序时构建一个输入文件 ,该文件与栅格 DEM 相似 ,为一有序的数值阵列 ,每一格点上的数字反映该格点的地质、土壤类型以及植被、气候等诸多特性 ,即代表该格点的最小水道给养面积阈值 .

其次 ,给定最小水道长度 ,倘若一级水道的累计长度小于该长度 ,则该水道被消除 . 那些很短的一级水道可能是伪水道、位于河谷两边的凹痕或沟壑的出口 .

一旦裁剪程序完毕 ,就可确定河道 Strahler 级数和河段长度 . 凡是具有水道起始点的河段被赋予 Strahler 级数为 1 . 当两支不同级数的水道相遇时 ,汇合点以下的河段则被赋予其中较大的级数 ;当两支相同级数的水道相遇时 ,汇合点以下河段的 Strahler 级数则在原有级数基础上增加 1 .

1.7 河网编码

河网编码算法是按照 Garbrecht^[9]编码系统对河网所有节点进行编码 . 首先从流域出口断面向上游靠左搜索 ,对每个节点按次序递增编码 ,直至水道起始点为止 ,然后从该水道起始点反方向搜寻 ,直至找到新的节点或水道起始点为止 ,并同时按递增规则编码 ,依此类推 ,直至搜寻到流域出口断面完毕 ,这样定义的节点编码可用于水文汇流计算或河网数据库的构建 .

由 Garbrecht^[9]编码法可知 ,流域出口断面的编码为 1 ,其后向上游搜索汇入某一节点的河段数 ,如果只有一条或两条河段汇入该节点 ,则该节点编码增量为 1 . 倘若存在 N ($N > 2$) 个河段汇集于某一节点的现象 ,称作复合汇集点 ,此时该节点的编码增量则为 $N - 1$,也就是说将原来的复合汇集点拓展成 $N - 1$ 个简单汇集点 (每个汇集点上游最多有两支入流) ,从而部分消除了由较低水平空间分辨率造成的集总效应 .

1.8 子流域划分

基于河网编码的数目 ,DEDNM 可生成流域河网栅格图及其子流域所有河段的起始点上游汇水面积、左右岸集水区域编码系统 ,从而为水文过程参数化和流域信息系统开发提供基本数据 .

上述子单元是依据下垫面地形特性、水流方向及河网水系特征由计算机自动生成 ,这种划分方法具有一定的物理基础和合理性 ,可为数字水文模型提供坚实的技术平台 ,从而避免传统降雨径流模型中根据降雨站网划分子单元的缺陷 .

1.9 流域水系拓扑关系

一旦生成联结完好的河网 ,就可确定每一河段的 Strahler 级数 ,给定每一河段与河网节点的识别码 ,确定串联型河网的最优演算次序^[9] . 据此还可确定每一河段的左右岸集水面积、水道上游末端节点及相应的子流域分水线 ,从而建立河网节点、河段和子流域的拓扑关系 ,包括河段坡度、高程值、上游集水面积与侧向集水面积及相互联结的拓扑信息 . 一方面 ,河网与子流域边界等空间信息是以栅格形式存储 ,这样易于用 GIS 软件作可视化显示 ;另一方面 ,河段或子流域的拓扑关系还以表格的形式存储 ,有利于数字水文模型的调用 .

2 实例应用

淮河史灌河流域蒋集站控制面积 5 930 km² ,地跨安徽金寨、河南商城和固始三县 ,位于北纬 31°12′ ~ 32°18′ ,东经 115°17′ ~ 115°55′ . 流域内有两座大型水库 ,鲇鱼山水库控制集水面积 924 km² ,梅山水库控制集

水面积 1970 km². 流域内地形复杂,既有高山峻岭,主峰金刚台海拔 1576 m,又有低山丘陵,还有广阔的平原. 山区水流湍急,平原河网发育.

2.1 DEM 的建立

本次研究以美国环境系统研究所研制的地理信息系统软件 ARC/INFO 作为工作平台,首先应用 ARC 模块中数字化子系统将史灌河流域 1:100 000 地形图高程等高线和控制点高程(如山顶)输入到计算机中,再应用 TIN 模块生成不规则三角网,最终由 GRID 模块生成边长为 1 000 m 的栅格型数字高程模型 DEM^[10].

2.2 DEM 高程数据的前处理

如前所述,史灌河流域有两座大型水库,因此存在阻挡型洼地. 程序运行中当搜索到洼地下游方向栅格宽度等于栅格边长时则认为是阻挡型洼地,采用降低洼地下游栅格单元的高程,使水流穿过阻挡物. 对一般的凹陷型洼地,采取常规的垫高填平方法处理. 对 DEM 原先存在的和经过垫高填平产生的平坦区域,采取 Martz 和 Garbrecht^[2] 提出的高程增量叠加算法设置栅格水流流向.

2.3 河网生成

在河网生成程序运行前,先要给定最小水道给养面积阈值(临界集水面积)和最小水道长度. 考虑到史灌河流域独特的地形、地貌、植被及岩土特性(南部两水库上游区域山高坡陡,森林覆盖率达 65%,北部丘陵平原区多为耕地,森林面积甚少),将史灌河流域分成 4 个子区域,对这 4 个子区域设置不同的临界集水面积和最小水道长度,以反映影响水系发育诸多因子的空间不均匀性,具体数值见表 1.

表 1 史灌河流域 4 个子区域临界集水面积和最小水道长度设定值
Table 1 Specified values of critical source area and minimum course length of four subareas covering the Shiguanhe Catchment

序号	北纬	东经	临界集水面积 /km ²	最小水道长度 /km
1	31° ~ 31°40′	115° ~ 116°	40	1
2	31°40′ ~ 32°	115° ~ 116°	50	2
3	32° ~ 32°20′	115°30′ ~ 116°	60	3
4	32° ~ 32°20′	115° ~ 115°30′	60	4

在 DEM 数据前处理的基础上就可应用 D8 方法按最陡坡度原则确定所有栅格的水流流向(见图 2),继而计算汇水面积、勾划流域分水线、生成河网(见图 3),并对其进行编码. 遇到复合汇集点时就采用前述的途径将它分解成多个有序的简单汇集点,从而消除较低水平分辨率带来的集总效应.

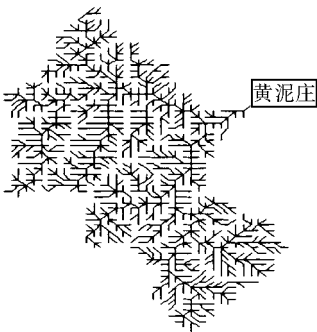


图 2 最陡坡度原则确定的栅格水流流向
Fig.2 Flow vector by steepest descent method

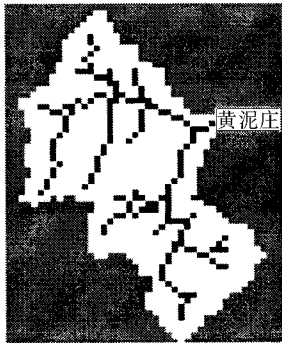


图 3 DEDNM 生成的史灌河流域水系和分水线
Fig.3 Drainage network and watershed divide generated by the DEDNM

2.4 流域河网拓扑关系生成

一旦生成联结完好的河网,就可确定每一河段的 Strahler 级数,并按 Garbrecht^[9]方法确定串联型河网的最优演算次序(见表 2). 同时,还可获得每一级河段上游、左右岸集水面积、河道高程和坡度及相互联结的拓扑信息(见表 2),从而建立了河网节点、河段与子流域的拓扑关系,这些都为数字水文模型的研制与开发提供了坚实的基础.

表 2 史灌河流域黄泥庄控制站以上区域河网汇流演算最优次序与河网拓扑关系

Table 2 Routing execution sequence and topological relation of drainage network within the Shiguanhe Catchment upstream of Huangnizhuang Station

节点 编码	河道 级数	最优演 算次序	上游入流节点		下游 节点	高程 /m	河段长度 /m	集水面积/km ²		
			I	II				源头	左岸	右岸
1	4	36	2	- 1	- 1	186	- 1	- 1	- 1	- 1
2	4	35	3	22	1	187	6 242	- 1	12. 63	7. 43
3	3	19	4	17	2	216	10 909	- 1	24. 89	36. 77
34	1	26	- 1	- 1	32	348	6 599	13. 37	14. 86	42. 34
35	1	28	- 1	- 1	31	311	2 943	9. 66	1. 11	15. 60
36	1	31	- 1	- 1	24	319	4 667	9. 66	4. 09	23. 77

注：表中“- 1”为无效数据。

3 数字水文模型的构建与应用

对数字高程流域水系模型产生的每一集水子流域 ,应用新安江模型建立降雨径流模型。新安江模型考虑了两种空间不均匀分布 :(a)张力水容量的不均匀分布 ,以张力水蓄水容量曲线表示 (b)自由水容量的不均匀分布 ,以自由水蓄水容量曲线表示。本文采用的新安江模型共有 13 个参数 :蒸散发折算系数 K ,上层张力水容量 UM ,下层张力水容量 LM ,深层蒸散发系数 C ,土壤张力水容量 WM ,张力水蓄水容量曲线指数 B ,不透水面积比例系数 IM ,自由水蓄水库容量 SM ,自由水蓄水容量曲线指数 EX ,自由水蓄水库地下水出流系数 KG ,自由水蓄水库壤中流出流系数 KI ,地下水消退系数 CG ,壤中流消退系数 CI 。

首先 ,利用 DEDNM 生成的每一子流域的集水面积 ,即表 2 中第 9 ~ 11 列数据 ,建立每一子流域的降雨径流模型 ;然后 ,利用 DEDNM 生成的子流域与河网拓扑关系及河网最优演算次序(见表 2) ,采用分河段马斯京根方法 ,建立数字河网汇流模型。1998 年史灌河流域黄泥庄站的时流量过程和蒋集站的日流量过程计算结果与实际观测值比较如图 4、图 5 所示 ,其结果令人满意。

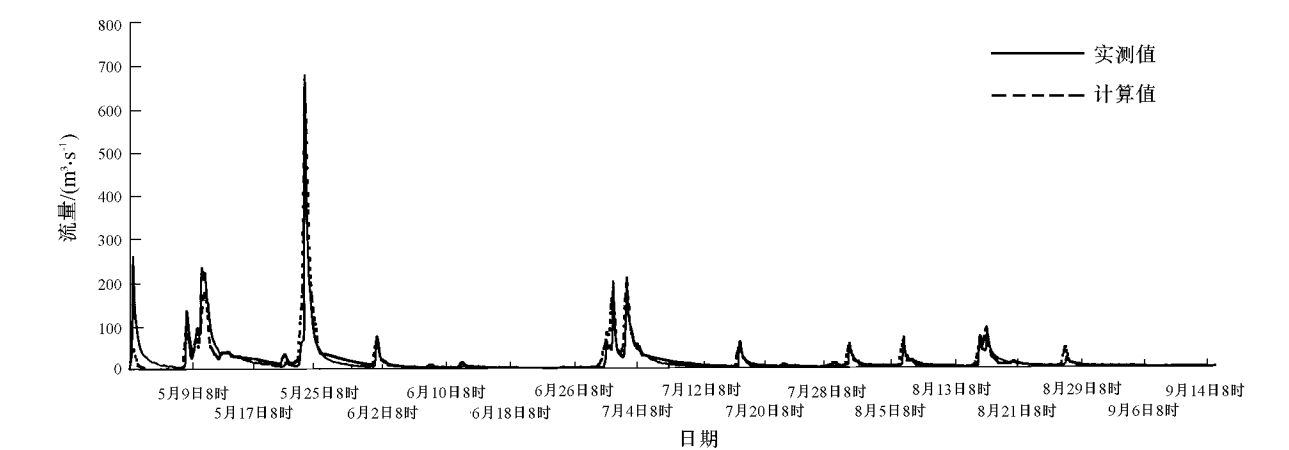


图 4 黄泥庄站 1998 年时流量过程

Fig.4 Hourly hydrograph at Huangnizhuang Station in 1998

在具体操作过程中 ,上述产流模型和汇流模型都是建立在数字高程流域水系模型 DEDNM 所生成的子流域与河网的编码系统上 ,无须手工操作。当然 ,对于蒋集站流量过程的模拟 ,不仅要梅山水库和鲇鱼山水库的出流过程设置成相应站点的流量过程 ,还需要扣除红石嘴与黎集灌渠的引水流量。

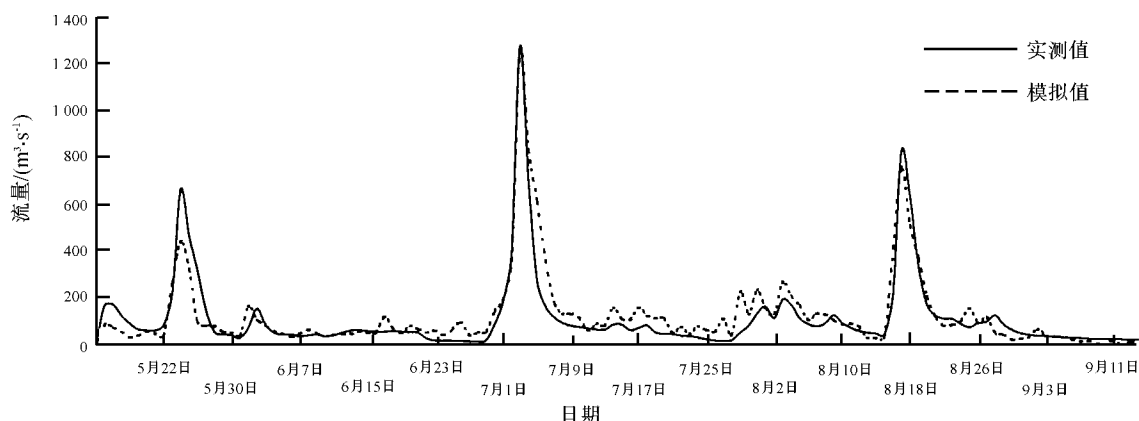


图5 蒋集站1998年日流量过程

Fig.5 Daily hydrograph at Jiangji Station in 1998

致谢：本研究得到了 Jurgen Garbrecht 的支持，在此致谢。

参考文献：

- [1] Singh V P. Kinematic wave modeling in water resources—Environmental hydrology[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997. 1~10.
- [2] Martz W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models[J]. Computers & Geosciences, 1992, 18(6): 747~761.
- [3] O'Callaghan F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, 28: 323~344.
- [4] Jenson K, Dominique J O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographical information system analysis[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54(11): 1593~1600.
- [5] Martz W, de Jong E. Catch a Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models[J]. Computers & Geosciences, 1988, 14(5): 627~640.
- [6] Martz W, Garbrecht J. Short communication, automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method—Comment[J]. Journal of Hydrology, 1995, 167: 393~396.
- [7] Tribe. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method[J]. Journal of Hydrology, 1992, 139: 263~293.
- [8] Fairfield J, Leymarie P. Drainage networks from grid digital elevation models[J]. Water Resources Research, 1991, 27(4): 29~61.
- [9] Garbrecht J. Determination of the execution sequence of channel flow for cascade routing in a drainage network[J]. Hydrosoft, 1988, 1(3): 129~138.
- [10] REN Li-liang, XU Hui, WANG Wen. A preliminary application of geographic information system technique in HUBEX[A]. In: LIU Xin-ren and LI Ji-ren. Proceedings of International Workshop on Macro-scale Hydrological Modeling[C]. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 102~105.

A Study on Digital Hydrological Modeling

REN Li-liang

(College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract A discussion is made on connotation and framework of the digital approach to catchment hydrological modeling. Meanwhile, a brief review is made on automated extraction of drainage network from grid digital elevation model (DEM). The Digital Elevation Drainage Network Model (DEDNM), developed by Martz and Garbrecht, is introduced, including model structure and computational procedure such as identification and treatment of depression or sink in DEM, raster-

based flow vector determination containing flat areas ,sub-watershed delineation ,drainage network generation ,numbering of network and subcatchment and production of topological relation of river network structure. Then ,the DEDNM is applied to the Shiguanhe River Basin of an area of 5930 km² ,the intensified observation field for the HUBEX/GAME. The result shows that the drainage system generated by the DEDNM is acceptable as compared with that on 1:100 000 topography map. That provides a solid foundation for development of digital hydrological model. Digital rainfall-runoff model can be established by use of the principle of Xin'anjiang Model over each subcatchment produced and numbered by the DEDNM. Finally ,runoff is routed from each subcatchment to the catchment outlet by the digital network routing model on the basis of topological relation of river network structure produced by the DEDNM. The digital hydrological model works very well when used to simulate hourly and daily flood hydrograph in the Shiguanhe River Basin during the plum rainy period of 1998.

Key words :digital ; digital elevation model ; drainage system ; topology ; runoff generation

《河海大学学报》自然科学版 征订启事

《河海大学学报》自然科学版 是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊 ,主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章 ,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于 1957 年 ,是我国中文核心期刊 ,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中 ,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果 ,部分达到了国内领先和国际先进水平 ,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议 ,发挥了较大的社会效益和经济效益 ,深受工程界和科技界赞许。本刊每逢单月出版 ,国内外公开发行 ,邮发代号 28-63 ,每期定价 8.00 元 ,全年订费 48.00 元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系。联系地址 :南京市西康路 1 号《河海大学学报》编辑部 ,邮政编码 210098。