

文章编号: 1000-0585(2000) 04-0369-08

基于 DEM 的水文物理过程模拟

任立良, 刘新仁

(河海大学水文水资源及环境学院, 南京 210098)

摘要: 基于数字高程模型, 考虑流域空间的变异性, 建立数字高程流域水系模型。产流子单元的划分、河网水系的生成及其空间拓扑关系的建立, 是由计算机自动完成。计算 TOPMODEL 地形指数 $\ln(a/tg\beta)_i$ 的空间累积分布曲线, 并对其作无量纲化处理, 推求各产流子单元的土壤蓄水容量分布抛物线参数 B, 构建数字水文模型。全球能量与水循环亚洲季风试验强化观测区—淮河史灌河流域实例研究表明: 数字模型不仅可以很好地模拟流域出口断面的径流过程, 而且能够模拟土壤水分的变化过程, 还可十分方便地输出水文要素和状态变量的空间分布。这对充分利用现有观测信息进行水文数据的深层次挖掘奠定了基础。

关 键 词: 数字高程模型; 流域; 径流; 水文模拟

中图分类号: P344 文献标识码: A

近 10 年来, 数字技术正促使一切科学技术领域发生一场深刻的变革, 水文科学也正在经历着这样一场前所未有的革新, 水文学与计算机及信息科学的交叉形成了数字水文学^[1]。在信息技术日新月异的今日, 描述流域下垫面空间分布信息的技术日渐完善, 流域地形、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。数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model) 技术的完善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基础。

1 研究区域

全球能量与水循环亚洲季风试验 GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment) 将淮河史灌河流域作为强化观测区, 史灌河流域蒋集站 (见图 1) 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 1 970 km²。流域内地形复杂, 既有高山峻岭, 主峰金刚台海拔 1 576 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。

本研究以 GIS 软件 ARC/INFO 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 1:100000 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 模块生成栅格型数字高程模型。

收稿日期: 2000-04-18; 修订日期: 2000-10-08
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49794030) 和教育部霍英东教育基金资助项目
作者简介: 任立良 (1963-), 男, 江苏扬中人, 河海大学水文水资源及环境学院副院长, 副教授, 博士。水文水资源专业, 在《水科学进展》、《河海大学学报》等发表论文 10 余篇。

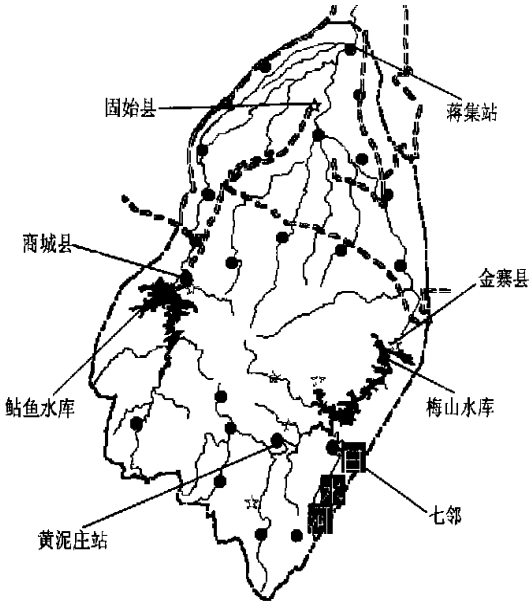


图 1 史灌河流域图

Fig. 1 Overview of the Shiguanhe River catchment

2 数字高程流域水系模型的构建

2.1 基本原理

近年来的研究表明, 从DEM 直接提取流域水系、分水线及地形参数信息是可行的。目前地理信息系统商业软件也能够生成水系, 但存在两个缺陷, 一是生成水系时不能考虑下垫面特性的空间差异性, 二是生成的水系及河网拓扑关系很难被水文模型直接调用, 其主要原因在于 GIS 数据结构与水文模型的数据结构不兼容。本文采用 Martz 和 Garbrecht^[2]研制的数字高程流域水系模型 (Digital Elevation Drainage Network Model, 缩写为 DEDNM), 由栅格型 DEM 自动生成子流域分水线、河网, 并对河网与子流域进行编码, 构建河网结构拓扑关系^[3]。

自动生成河网时考虑了流域下垫面的空间差异性, 即在不同的空间区域设置不同的最小水道给养面积阈值和最小水道长度, 从而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。

数字高程流域水系模型 DEDNM 是一种数字河网模型。它具有模块化的结构 (图 2), 包含许多子程序, 每一子程序都完成一种算法。DEDNM 能给出如下

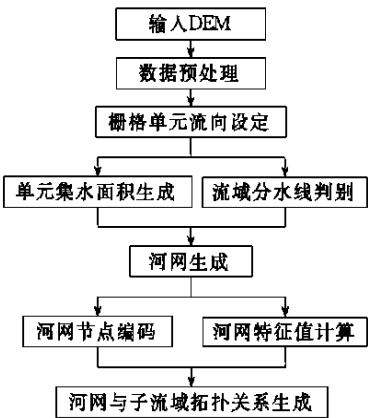


图2 数字高程流域水系模型计算流程图

Fig. 2 Schematic diagram of Digital Elevation Drainage Network Model

结果: ① 栅格水流流向; ② 流域分水线; ③ 自动生成的河网及子流域; ④ 河道与子流域的编码; ⑤ 河段与子流域特性; ⑥ 河网结构拓扑关系。

2.2 实例应用

在 DEDNM 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, 即南部两水库上游区域山高坡陡, 森林覆盖率高达 65%, 而北部丘陵平原区多为耕地, 森林面积甚少, 将史灌河流域分成四个子区域, 对这四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
Tab. 1 Specified values of critical source area and minimum course length of four subareas covering the Shiguanhe catchment

序号	地理位置	临界集水面积/ km ²	最小水道长度/ km
1	N31° ~ 31°40', E115° ~ 116°	40	1
2	N31°40' ~ 32°, E115° ~ 116°	50	2
3	N32° ~ 32°20', E115°30' ~ 116°	60	3
4	N32° ~ 32°20', E115° ~ 115°30'	60	4

在 DEM 数据前处理基础上就可按最陡坡度原则确定所有栅格的水流流向, 继而计算汇水面积、勾划流域分水线、生成河网, 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。

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 (1988)^[4] 方法确定串联型河网的最优演算次序 (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 (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表
Tab. 2 Routing execution sequence and topological relation of drainage network within the Shihe 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		
								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 数字水文模型的研制

数字水文模型是构建在 DEM 基础之上的一种分布式水文模型, 它是一种具有物理基

础的大容量信息的现代模拟技术。由 DEM 可衍生出数字高程流域水系模型或数字河网模型, 在此基础之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剖分成子单元, 该子单元可以是与下垫面信息空间分辨率相一致的任意小单元。这种子单元划分的方法具有一定的物理基础, 避免了传统水文模型中根据降雨站网划分流域单元的缺陷。

首先, 利用 DEDNM 生成的每一子单元流域的集水面积, 即表 2 中第 9~11 列数据, 应用新安江模型^[5]分别建立每一子单元的降雨径流模型, 每一子单元上的降雨、蒸发资料按就近原则直接取自覆盖史灌河流域的 48 个雨量站、3 个蒸发站 (梅山、鲇鱼山、蒋集) 的观测数据; 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), 采用分段马斯京根方法, 建立河网汇流模型, 最终获得任一指定出口断面的流量过程。

流域水文过程 (包括下渗、蒸发、径流) 是一个高度非线性且空间上变化的过程, 影响水文特性空间不均匀性的众多因素中, 地形是处于第一位的主导因子, 降水、土壤、植被均受其影响。正如 Beven 等 (1988)^[6]证明的, 地形的空间变化对流域尺度内土壤水分的空间分布起着相当重要的作用。鉴于此, 本文采用 TOPMODEL^[7]模型的地形指数的空间累积频率曲线的无因次线型^[8,9], 估算新安江模型中张力水蓄水容量抛物线参数 B , 其余的新安江模型参数暂且都取同一值。

地形指数 (Topographic Index) $\ln(a/\text{tg}\beta)_i$ 是 TOPMODEL 的核心所在, 其中 a 是指排向第 i 点的单宽汇水面积, $\text{tg}\beta$ 为该点处坡角的正切函数, 表示该点的排水状况。其实, 地形指数就是地形特征参数化的一种途径, 是概化地形的水文效应的一种有效参数化方法。它具有水文学中产汇流特点, 比一般就事论事地考虑地形因子要好。 $\ln(a/\text{tg}\beta)_i$ 值较大的单元面积容易达到饱和而产生坡面流, 这些单元面积一般位于地形辐合 (凹曲面与地形谷)、坡面平缓、坡脚河边地带等水平方向透水性差且汇水面积大的部位。地形指数的高值处对应于新安江模型土壤蓄水容量分布曲线所显示的低值处, 因此地形指数可被认为地形的水文效应指标。

流域蓄水容量曲线用抛物线指数 B 值反映土壤蓄水容量空间分布状况, TOPMODEL 用 $\ln(a/\text{tg}\beta)$ 值的空间分布来反映流域饱和和缺水量的情况, 这两条曲线理论基础相同。为便于比较, 将两条曲线坐标统一, 纵横坐标作无因次化处理。对新安江模型流域蓄水容量曲线的处理是: 将流域点蓄水容量除以流域最大蓄水容量, W_m/W_{mm} 作为纵坐标。对 TOPMODEL $\ln(a/\text{tg}\beta)$ 累积频率曲线作如下的处理, 定义:

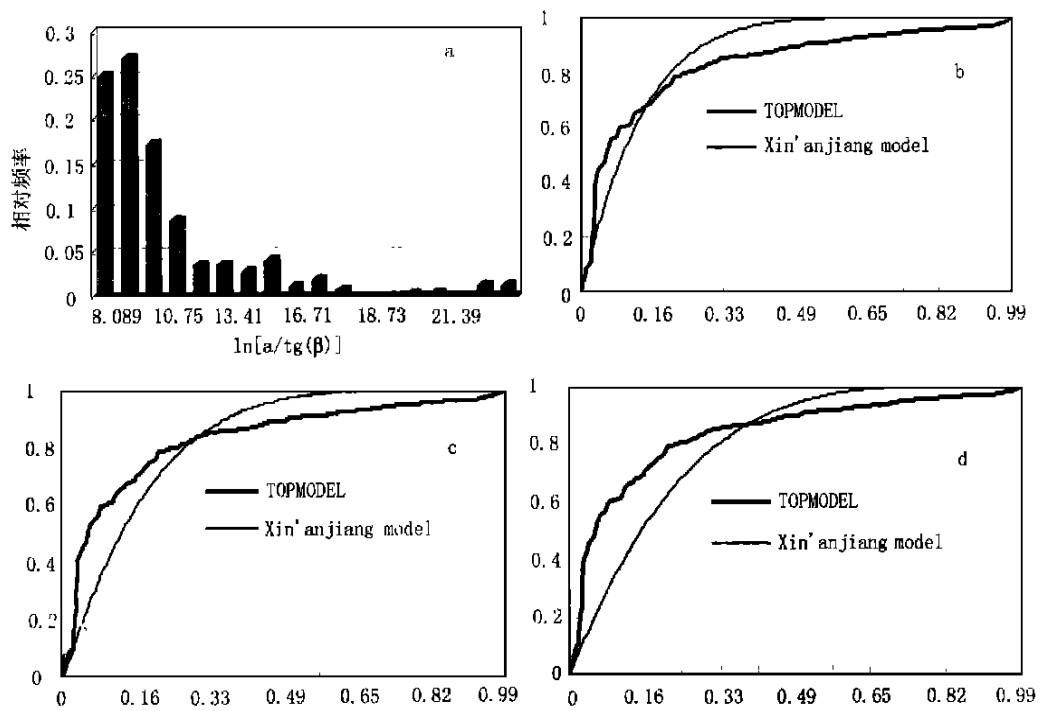
$$\text{流域相对不易产流度} = \frac{\max[\ln(a/\text{tg}\beta)_i] - \ln(a/\text{tg}\beta)_i}{\max[\ln(a/\text{tg}\beta)_i] - \min[\ln(a/\text{tg}\beta)_i]}$$

既然对 $\ln(a/\text{tg}\beta)$ 作了这样的处理, 相应地其频率分布值亦要进行转换。若原先的地形指数 $\ln(a/\text{tg}\beta)$ 频率分布是:

$$\text{则 } P \left\{ \frac{\max[\ln(a/\text{tg}\beta)_i] - \ln(a/\text{tg}\beta)_x}{\max[\ln(a/\text{tg}\beta)_i] - \min[\ln(a/\text{tg}\beta)_i]} \mid \frac{\max[\ln(a/\text{tg}\beta)_i] - \ln(a/\text{tg}\beta)_i}{\max[\ln(a/\text{tg}\beta)_i] - \min[\ln(a/\text{tg}\beta)_i]} \right\} = 1 - P_i$$

这样流域相对不易产流度与 W_m/W_{mm} 对应, 将无量纲化的流域蓄水容量曲线与经上述处理后的 $\ln(a/\text{tg}\beta)$ 分布曲线绘在一张图上。图 3 给出了研究区域内七邻站 (地理位置见图 1) 控制的白水河流域算例, 由图 3 可见, $B = 0.2$ 的蓄水容量曲线与无量纲化的 $\ln(a/\text{tg}\beta)$

分布曲线拟合效果较好。



(a) 地形指数的频率分布图 (b) 土壤蓄水量分布抛物线指数 $B=0.15$
(c) 土壤蓄水量分布抛物线指数 $B=0.20$ (d) 土壤蓄水量分布抛物线指数 $B=0.25$
图3 白水河流域无量纲的地形指数累积分布与土壤蓄水量分布曲线的拟合

Fig.3 Comparison between dimensionless cumulative distribution of topographic index in TOPMODEL and soil water storage capacity distribution in Xin'anjiang Model, within the Baishuihe catchment
(a) Probability histogram of topographic index (b) Soil water storage capacity with 0.15 of exponent
(c) Soil water storage capacity with 0.20 of exponent (d) Soil water storage capacity with 0.25 of exponent

新安江模型的流域蓄水量曲线与TOPMODEL的 $\ln(a/tg\beta)$ 累积频率曲线虽然形式不同,但实质是一致的,都是对流域饱和缺水量空间不均匀性的描述。TOPMODEL用地形分布推求这种分布,物理意义更强,也更可靠。从这种途径出发,用地形分布来推求 B 值,从而使 B 值成为一个有确定物理意义的参数。

4 模型计算成果分析

本次研究应用了国家自然科学基金九五重大项目“淮河流域能量与水分循环试验研究”强化观测区——史灌河流域1998和1999年加密观测资料,史河黄泥庄站集水面积 805 km^2 ,史灌河蒋集站集水面积 $5\,930\text{ km}^2$,黄泥庄站和蒋集站的模拟结果如图4所示。

由于数字高程流域水系模型对河网与子流域进行了自动编码,并建立了它们之间的拓扑关系,所以原则上数字水文模型能够十分容易地给出水文径流要素的空间定位与分布,也

就是说流域内任一处的水文状态变量值和任一站点的流量值都可由数字水文模型计算出来。图 5 给出了 1999 年 5~8 月鲇鱼山水文站所在的子流域降雨、径流和土壤蓄水量计算值时间序列。图中每一场降雨径流关系十分显然,以 6 月 27 日为例,降雨 60.8 mm,由于土壤较湿润,产生 58.112 mm 的径流。另外,土壤蓄水量随降雨量多寡的变化亦非常敏感。

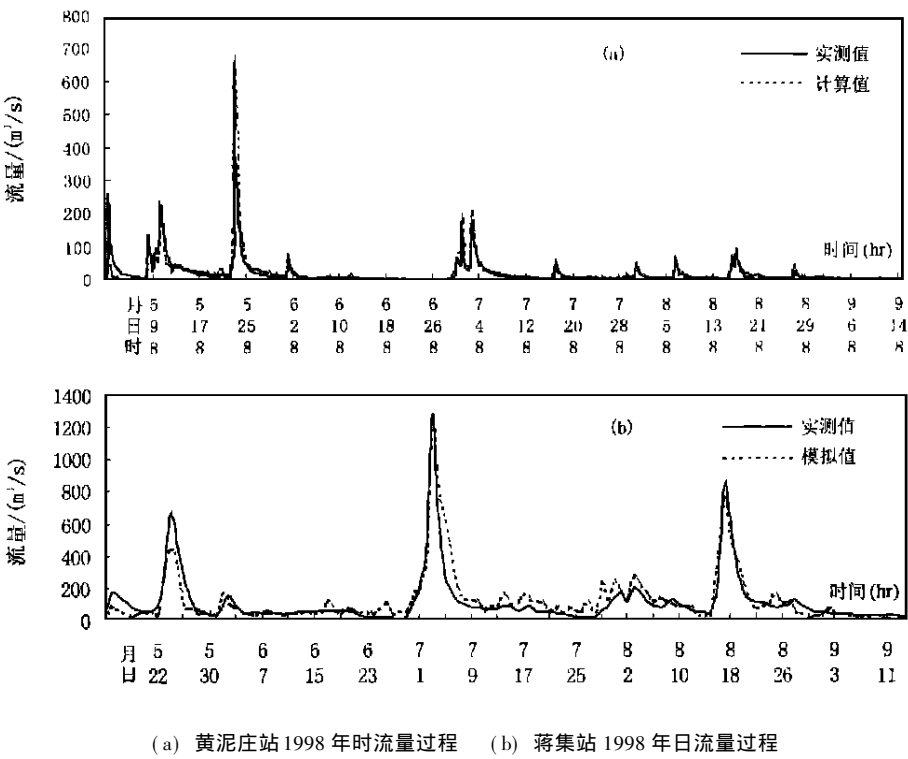


图 4 史灌河流域数字水文模型模拟结果

Fig.4 Comparison between observed and simulated discharges from May 1st through Sept. 15th of 1998

(a) Hourly hydrograph at Huangnizhuang station (b) Daily hydrograph at Jiangji station

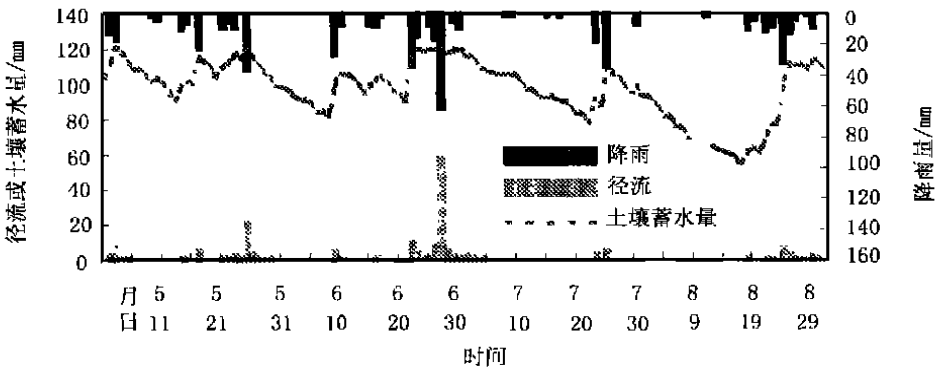


图 5 1999 年 5~8 月鲇鱼山水文站所在的子流域降雨、径流和土壤蓄水量计算值时间序列

Fig.5 Precipitation, runoff and tension water storage within the subwatershed nearby Nianyushan Station in 1999

1998/1999 年 5 月至 8 月加密观测期间, 不仅对史灌河流域内鲇鱼山、梅山和蒋集三处场所进行了降雨、水面蒸发观测, 而且还对该三处进行了土壤含水量的实时同期观测, 每天上午 9:00 左右在地表、地面以下 15、30、45、60、90 cm 深处 6 个点应用澳大利亚 ICT 公司 MP 土壤水分探测仪进行观测, 然后再转换成土壤体积含水量^[10]。将数字水文模型(新安江三水源降雨径流模型) 计算出来的反映土壤湿度的指标值(称之为土壤蓄水量)与同期实测的土壤体积含水量作比较, 由图 6 可知, 模型计算值和实际观测值在时间序列上具有良好的一致性, 两者的相关系数达到 0.84。这表明新安江模型计算的土壤蓄水量能够反映土壤的干湿状况, 从一个侧面证明了新安江模型土壤水计算结构的正确性。

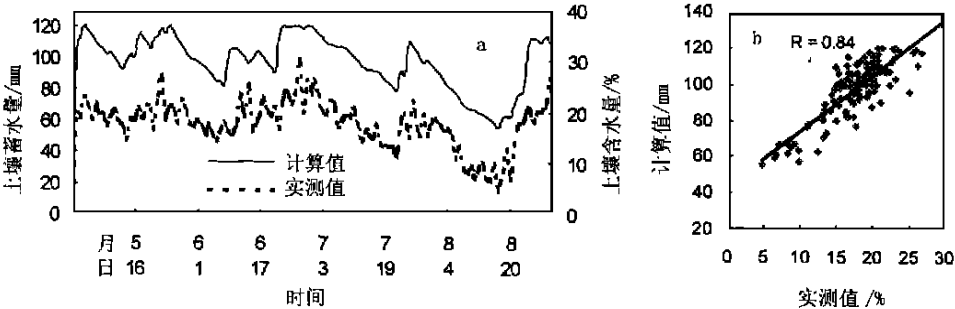


图 6 1999 年 5~8 月鲇鱼山水文站实测土壤含水量和模型计算的土壤蓄水量时间序列比较及相关分析

Fig.6 Comparison and correlation between computed and measured soil moisture at Nianyushan Station in 1999

5 结论

以上成果分析表明, 构建于 DEM 基础之上的数字水文模型能够十分方便地输出水文要素的空间定位与分布, 流域内任一处的水文状态变量值和任一站点的流量值都可由数字水文模型计算出来, 同时还可对任一站点的流量进行组成成分分析, 尤其值得一提的是数字模型计算出来的土壤张力水蓄量和实际观测的土壤体积含水量在时间序列上具有良好的一致性, 所有这些对水文科学研究与工程实际都有着广阔的应用前景。数字水文模型的优势在于充分利用现有信息, 进一步揭示水文基本规律, 从观测点上的信息挖掘和提取深层次的信息, 并进行可视化展示, 最终形成数字产品, 这是一个亟待开发研究的新领域。

此外, 基于 DEM 可计算 TOPMODEL 地形指数 $\ln(a/tg\beta)$ 的空间累积分布曲线, 为 新安江模型中土壤蓄水容量分布抛物线指数 B 的推求提供了一种具有物理基础的可靠途径, 从而使 B 值成为一个有确定物理意义的参数。

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] 任立良, 刘新仁. 数字高程模型在流域水系拓扑结构计算中的应用[J]. 水科学进展, 1999, **10**(2): 129~134.
- [4] Garbrecht J. Determination of the execution sequence of channel flow for cascade routing in a drainage network[J]. *Hydrosoft*, 1988, **1**(3): 129~138.
- [5] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [6] Beven K J, Wood E F, Sivapalan M. On hydrological heterogeneity: catchment morphology and catchment response[J]. *J. of Hydrology*, 1988, **100**: 353~360.
- [7] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. *Hydrol. Sci. Bull.*, 1979, **24**(1): 43~69.
- [8] 郭芳. TOPMODEL 在淮河流域的移植应用及其与新安江模型比较研究[D]. 南京: 河海大学硕士学位论文, 1996.
- [9] 任立良. 流域水文物理过程的数字模型研究[D]. 南京: 河海大学博士学位论文, 1999.
- [10] 彭顺风. 史灌河流域土壤含水量分析[A]. 见: 赵柏林, 丁一汇 主编. 淮河流域能量与水分循环研究[C]. 北京: 气象出版社, 1999. 182~186.

Hydrological processes modeling based on digital elevation model

REN Li-liang, LIU Xin-ren

(College of Water Resources and Environment, Hehai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The Digital Elevation Drainage Network Model (DEDNM) of the Shiguanhe River catchment is made from digital elevation model by Martz and Garbrecht method with spatial basin heterogeneity considered. Subwatershed, drainage network, and their spatial topological relations are generated automatically by computer. Then, spatial cumulative distribution probability of topographical index $\ln(a/\text{tg}\beta)_i$ in the TOPMODEL is calculated. Therefore the parabolic exponent of soil tension water storage capacity distribution within each subwatershed in the Xin'anjiang model can be obtained by dimensionless processing with respect to cumulative distribution curve of $\ln(a/\text{tg}\beta)_i$. That makes the parabolic exponent in the Xin'anjiang model be physically-based. Finally, the digital hydrological model is established. The case study on the Shiguanhe River catchment in the Huaihe River Basin, i. e., the intensified observation field of GEWEX Asian Monsoon Experiment Project, showed that the digital model performs very well not only in simulating runoff processes at any specific outlet, but also in simulating spatial distribution and temporal variation of hydrological elements and state variables (especially soil moisture), if compared with traditional hydrological models. That provides solid foundation for making full use of present observation information and thorough tapping potentials of hydrological data.

Key words: digital elevation model; catchment; runoff; hydrological modeling