

数字水文学的萌芽及前景

芮孝芳,石朋

(河海大学水资源环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 :简要阐述了数字水文学产生的背景及主要内涵,指出数字化技术正在使水文要素的采集、传输、存储、处理和显示等产生根本性的变革,展示了迄今为止国内外学者在数字高程模型(DEM)平台上所取得的初步研究成果,包括 :自动生成流域和水系,自动提取流域地形地貌特征,给出下垫面特性和降雨的空间分布的定量描述,揭示水文的规律和机理,构建具有物理基础的完全分布式水文模型等.事实初步证明,以信息化带动水文科技现代化将会给水文科学的发展增添无限生机.

关键词 数字水文学;数字化技术;数字高程模型(DEM);分布式水文模型

中图分类号 :P33 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2004)06-0055-04

自 1674 年 Perreault 提出水量平衡概念、揭开现代水文学研究的序幕以来,水文科学已经历了工程水文、水资源水文和环境水文等重要发展阶段,并已成为地球科学的重要分支和水利学科的重要组成部分.“只有水资源的可持续利用,才能保障经济社会可持续发展”的科学论断已成为水文学发展的持续动力.随着世界科学技术进入以数字化和计算机应用为主要特征的信息化时代,水文科学正迅速主动或被动地接受数字化的渗透.时至今日,作为水文学与计算机科学相结合的产物^[1],一门基于数字化平台采集水文要素、描述水文现象时空变化、揭示水文规律和机理的水文学分支学科——数字水文学(digital hydrology)正在兴起.

1 数字化技术对获取水文信息的深刻影响

数字化技术是一种电子转换技术^[2],它能够将图形、图像、声音、语言和文字等信息转换为脉冲信号,并通过二进制转化为数字型信息.与具有连续性的模拟型信息比较,数字型信息具有离散性和间断性的特点.水文要素都是连续性信息,传统的采集、描述水文要素的方法是将水文要素作为连续数值来处理,故称之为“模拟型技术”.当将连续变化的水文要素转换为不连续即离散的数字信号值来处理时,则称为“数字型技术”.

由于数字化技术既可以实现由模拟信号向数字信号的转换,又可以实现由数字信号向模拟信号的

转换,所以,数字化技术可为水文要素的采集方法实现从目测、器测等人工观测方法向遥感、遥测方法转变、从点测向面测转变和从静态观测向动态跟踪观测转变提供技术支撑,也可为水文要素的传输、存储、处理、显示等实现从人工、机械辅助、半自动化向全自动化、智能化转变提供技术支撑.

数字化技术对水文要素的采集、传输、存储、处理、显示等产生的上述影响必将深刻地影响着整个水文学的发展.

2 DEM 是水文学研究的重要平台

数字高程模型(DEM)是表示地面高程随空间变化的数学模型,它是数字化技术与地形地貌学相结合的产物,有数值(字)地形图之称.

2.1 流域和水系的自动生成

传统的方法是在一定比例尺的地形图上判断和勾绘分水线和集水线.分水线围成的仅有一个出口的闭合区域即为流域范围,其平面投影面积即为流域面积.流域内集水线连成的网络即为水系.这种手工确定流域界限、量算流域面积和勾绘水系的方法,不仅十分繁复,而且容易出错.基于网格型 DEM,使用 RiverTools 和 ARC/INFO 等软件则可自动、快速地生成流域界限、计算流域面积和绘制流域水系图^[3,4].图 1(c)是根据 1:50 000 的 DEM 自动生成的长江三峡区间沿渡河流域的流域界限和水系,计算得该流域的流域面积为 601.27 km²,这与手工从

基金项目 :国家自然科学基金资助项目(49771021,50099620,50309002)

作者简介 :芮孝芳(1939—)男,江苏溧阳人,教授,从事水文学及水资源研究.

1:50 000的地形图上量算所得的 601 km² 几乎完全一致.图 1(d)是手工在 1:50 000 的地形图上勾绘的水系图,称为“蓝线水系”.比较图 1(c)和(d)不难看出,由 DEM 自动生成的沿渡河流域的水系与“蓝线水系”基本一致.图 1 还给出了沿渡河流域的 TIN 型的 DEM(图 1(a))和按 D8(deterministic eight-neighbours)方法生成的沿渡河流域水流方向(图 1(b)),以便于大致了解流域和水系的自动生成过程.

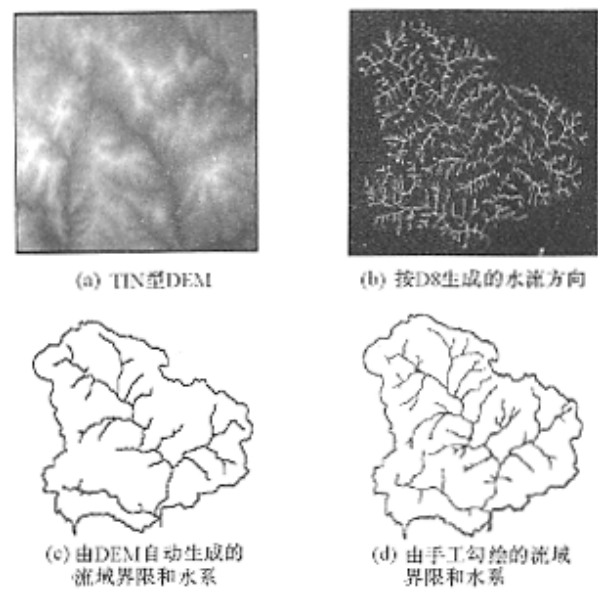


图 1 长江三峡区间沿渡河流域的界限和水系

2.2 地形地貌参数的自动提取

传统的用手工方法在一定比例尺的地形图上量算流域地形地貌参数是十分麻烦费时的,而且有些地形地貌特征几乎不可能由手工方法获得.这就使得在过去的水文学研究中对地形地貌这一影响水文过程的重要因素考虑得十分粗略,甚至不予考虑.基于网格型的 DEM,使用 RiverTools 和 ARC/INFO 等软件能让这个问题得到满意的解决^[5,6].事实上,正如前述,DEM 本身就是一个表达地形高低空间变化的数学函数.从数学上说,许多地形地貌参数就是该函数的某些特征值或其各阶函数的特征值或由其导出的某种数学关系的表达式.例如,地形坡度和坡向就与 DEM 的一阶导数有关,地形坡度的变化率、坡向的变化率、曲率和凹凸系数等就与 DEM 的二阶导数有关……因此,在 DEM 平台上,应用 RiverTools 和 ARC/INFO 等软件,就可快速获得满足精度要求的地形地貌参数值.图 2 是根据 1:50 000 的 DEM 自动获得的长江三峡区间沿渡河流域 Horton 地貌参数的计算图(图中河长单位为 km,流域面积单位为 km²).图 3~5 分别为根据 1:50 000 的 DEM 自动提取的该流域的宽度函数、坡度空间分布和地形指数空间分布.文献 6 根据 1:250 000 的 DEM 自动生成

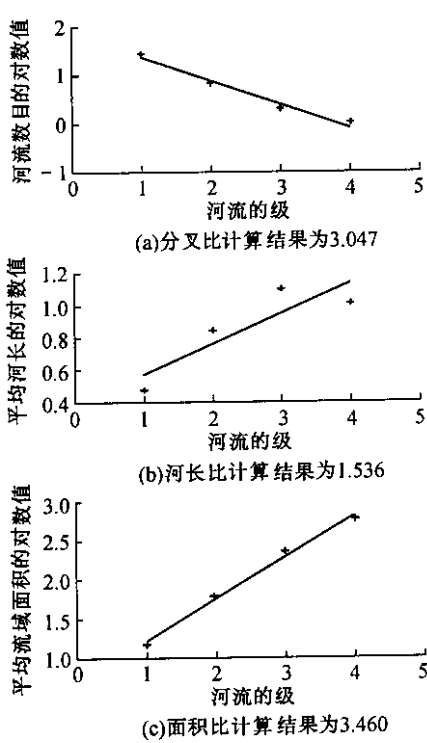


图 2 长江三峡区间沿渡河流域 Horton 地貌参数

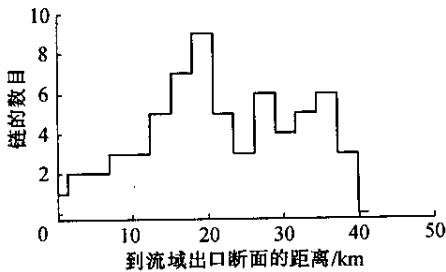
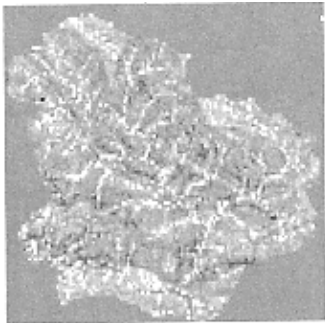
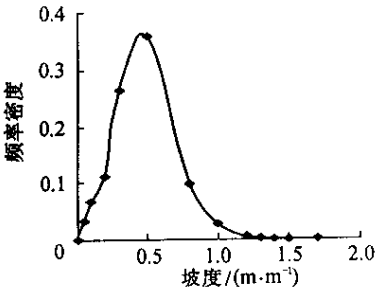


图 3 长江三峡区间沿渡河流域的宽度函数



(a) 坡度空间分布散点图



(b) 坡度概率密度曲线

图 4 长江三峡区间沿渡河流域坡度空间分布

了长江三峡区间子流域分布图,并自动提取了这些子流域的一些地形地貌特征值^[6]。应该指出,像图3~5和文献[6]所做的工作,如果不在DEM平台上操作,仅凭手工计算几乎是不可能的。因此,网格型DEM的研制成功,不仅促进了定量地貌学的发展,而且也定量考虑流域地形地貌对流域降雨径流形成的影响提供了条件^[6,7]。

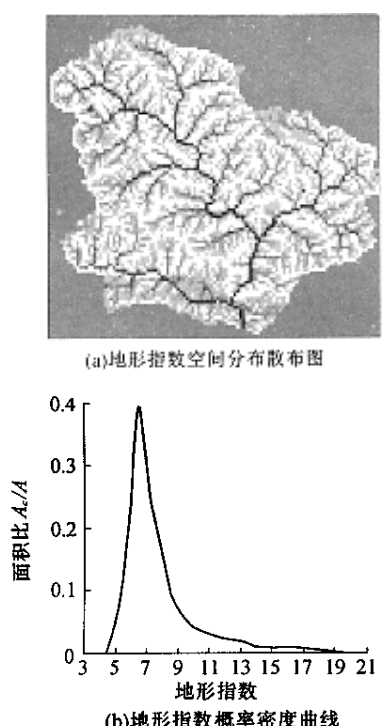


图5 长江三峡区间沿渡河流域地形指数 $\ln(a/\tan\beta)$ 空间分布^[4]

2.3 下垫面特性和降雨空间分布的定量描述

在现实世界中,下垫面特性如地形、地貌、土壤、植被、水文地质条件、土地利用等的空间分布都是不均匀的。一场降雨更表现出明显的空间分布不均匀性。在水文学研究中,一般不应当忽视这些因素的空间分布不均匀对水文过程的影响。但在过去很长的时间内,由于描述这些因素空间分布的方法和手段不能满足客观需要,因此,只好将整个流域作为一个整体,取这些因素的流域平均值,如流域平均降雨量、流域平均坡度、流域平均植被度等,以致水文计算或水文预报的精度常不尽如人意。网格型DEM本身就是地形地貌空间分布不均匀的定量描述。如果将网格型DEM与流域土壤、植被、水文地质条件和土地利用等调查分布图或遥感图像叠加,则可以定量地描述这些因素的空间分布。将网格型DEM与雨量站网或雷达测雨结合起来就可以定量地描述降雨的空间分布。因此,DEM显然能为从物理上考虑下垫面特性和降雨空间分布不均匀对水文过程的影响提供操作平台。

2.4 水文规律和机理的验证

在水文学的发展史上,最初人们只是通过人工观测来认识水文现象,后来才发展到借助于物理模型试验或数学模型模拟来揭示水文规律和机理。但实践证明这种认识和揭示复杂水文规律和机理的方法是存在较大局限性的。在数字化平台上做水文学研究则可以克服其中某些局限性。

例如20世纪70年代末,Rodriguez-Itube等^[9,10]曾将流域上分布均匀的瞬时脉冲净雨视作由无数个“雨滴”所组成,假设各“雨滴”之间相互独立,应用概率论中的大数定律得到了流域瞬时单位线与“雨滴”汇流时间的概率密度等价的结论。对这个结论如何直接证明它的正确性呢?现行物理模型试验方法难以做到,数学模型模拟也难以奏效。但在DEM平台上就能实现这一证明,因为应用网格型DEM,就可根据精度要求将1个流域划分为一定数量的网格。如果将每个网格中的降雨量作为1个“雨滴”,则流域上分布均匀的瞬时脉冲净雨就可以“离散化”成许多“雨滴”。借助于RiverTools和ARC/INFO等软件可以快速、正确地找出每个网格中的降雨,即“雨滴”向流域出口断面汇集的路径,并可计算出每个网格中降雨到达流域出口断面的汇流时间。因为网格的数目可以足够大,故总可以获得容量足够大的“雨滴”汇流时间样本,对此作统计分析即可得到“雨滴”汇流时间的概率密度,从而实现对“流域瞬时单位线与‘雨滴’汇流时间的概率密度等价”这一结论的证明。不仅如此,还得到一个可借助网格型DEM确定流域瞬时单位线的方法^[4]。图6(a)为基于1:50000的DEM得到的长江三峡区间沿渡河流域的“雨滴”汇流时间的样本,图6(b)为由该样本得到的沿渡河流域的瞬时单位线。

以上仅是在DEM平台上揭示水文规律和机理的一个例子。随着研究的深入,今后一定会有更多的研究成果出现。

3 DEM促进了流域水文模型的发展

“精度”始终是流域水文模型应用中面临的主要问题,而不断改进流域水文模型的结构,使其具有更强的物理基础,使其中所包含的参数的物理意义更加明确,减少其对水文资料的依赖性,是提高精度的关键。由于现有的集总式水文模型将流域作为一个整体来研究,故势必忽略了降雨和下垫面特性呈现空间分布不均匀的事实,只能给出空间均化的模拟结果。这样必然使得集总式水文模型的结构和参数的物理意义模糊不清,使其在模拟流域水文过程时存在较大的局限性^[11],不仅使得模型的精度常常不

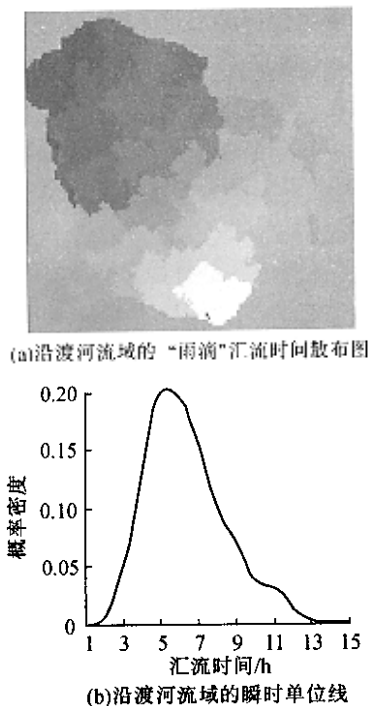


图6 在网格型DEM平台求得的沿渡河流域瞬时单位线高,而且会误导人们将注意力集中在寻找如何解算最优化模型参数的数学技巧上,忽视了对模型结构和参数物理意义的进一步探求。

事实已经证明,要推进流域水文模型的发展,提高模型的计算精度,首先必须研究便于在模型计算中应用的降雨和下垫面特性空间分布的定量描述方法。水文学家在这方面已经努力了近半个世纪,终于随着数字化时代的到来,出现了从理论上和实践上解决这个问题的机遇。正如前述,由于借助于DEM可快速生成不同尺度的网格,故其已成为定量描述降雨和下垫面特性空间分布的基本平台。由此可见,DEM的引入必将大大地促进流域水文模型的发展,不仅可以改进现有的集总式水文模型,而且也使具有物理基础的完全分布式水文模型的研制成为现实^[12]。

TOPMODEL是一个以地形指数为核心的流域水文模型^[4]。地形指数的空间分布情况对它的影响是明显的,但地形指数的空间分布只有在DEM平台上才能以满意的精度获得。因此,借助于DEM,TOPMODEL的计算精度就会有所提高。

建立在DEM平台上的具有物理基础的完全分布式水文模型的基本结构如图7所示。数字化正在强烈地推动着分布式水文模型的发展。在当今和今后相当长的时期内,分布式水文模型将是水文学研究的主要热点之一。

4 结 语

数字化与水文学相结合,导致了数字水文学的

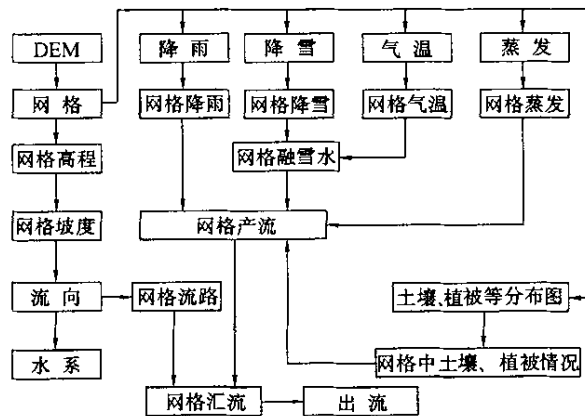


图7 基于DEM的分布式水文模型的基本结构

诞生。目前数字化技术不仅使水文要素的采集、传输、存储、处理、显示等发生了根本性的变革,而且在DEM平台上已经能实现自动生成流域和水系、自动提取流域地形地貌特征。如将DEM与下垫面特性的调查分布图或遥感图叠加,与雨量站网或雷达测雨配合,则还可以实现下垫面特性和降雨量空间分布不均匀的定量描述。在DEM平台上揭示水文规律和机理的研究也取得了进展。事实已经初步证明,以信息化带动水文科技现代化必将给水文科学的发展增添无限生机。

参考文献:

- [1] Singh V P, Elementary Hydrology[M]. New Jersey:Prentice Hall Inc,1992.
- [2] 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,1999.
- [3] 石朋.流域数字高程模型及其在地貌水文学中的应用[D].南京:河海大学,2001.
- [4] 孔凡哲.基于数字化平台的分布式流域水文模型和流域汇流研究[D].南京:河海大学,2003.
- [5] Susan K J. Applications of hydrologic information automatically extracted from digital elevation models[J]. Hydrological Processes,1991, 5(1):31~44.
- [6] 王船海,郭丽君,芮孝芳,等.三峡区间入库洪水实时预报系统研究[J].水科学进展,2003,14(6):677~681.
- [7] 芮孝芳,石朋.基于地貌扩散和动力扩散的瞬时单位线研究[J].水科学进展,2002,13(4):439~444.
- [8] 芮孝芳.由流路长度分布律和坡度分布律确定地貌单位线[J].水科学进展,2003,14(4):602~606.
- [9] Rodriguez-Iturbe I, Valdes J B. The geomorphological structure of hydrologic response[J]. Wat Resour Res,1979,15:1409~1420.
- [10] Gupta V K, Wagnire E, Wang C T. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology[J]. Wat Resour Res,1980,16:855~862.
- [11] 芮孝芳.流域水文模型研究中的若干问题[J].水科学进展,1997,8(1):94~98.
- [12] 芮孝芳,黄国如.分布式水文模型的现状与未来[J].水利水电科技进展,2004,24(2):55~58.

(收稿日期 2004-04-19 编辑 骆超)