

数字流域模型

The Digital Watershed Model

王光谦 刘家宏 著



科学出版社

www.sciencep.com

数字流域模型

The Digital Watershed Model

王光谦 刘家宏 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是数字流域模型研究的总结。书中介绍了数字流域模型的框架结构、关键技术以及模型建立和运行等方面的成果;以黄河流域为例,给出了模型在流域水资源量计算、洪水模拟、侵蚀产沙、淤地坝规划等领域的初步应用成果,展示了模型在流域规划和管理工作中的广阔应用前景。

本书可供水利工程、水土保持、环境工程等专业科技人员及高等院校相关专业师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字流域模型=The Digital Watershed Model/王光谦,刘家宏著. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-016609-4

I. 数... I. ①王...②刘... III. 流域模型-研究 IV. P344

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 146069 号

责任编辑:童安齐 何舒民 / 责任校对:都 岚

责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方上林工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年1月第一版 开本:B5 (720×1000)

2006年1月第一次印刷 印张:12 3/4 插页 6

印数:1—2 500 字数:254 520

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新欣>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA03)

前 言

数字流域模型能够模拟全流域的降雨-径流及产沙输沙等过程,在流域防汛减灾、水量调度、水土保持等方面有重要应用。近年来,数字河流建设得到重视并应用于生产实践中,但是作为数字河流引擎的流域模型的开发还相对滞后,多数模型局限于中小流域,将其扩展到大流域时还比较粗糙,不能满足数字河流建设的需要。为此,作者在国家“973”课题和国家自然科学基金的资助下,结合“数字黄河”工程建设,研究开发了大流域的数字流域模型,本书是对该方向成果的初步总结。

本书着眼于大流域的水沙过程模拟,提出并建立了数字流域模型系统的框架。模型框架依托 DEM 数据及其存取系统,以流域分级理论为依据,将全流域分为四级:坡面、小流域、区域(支流)和全流域,即在坡面上建立产流和产沙数学模型,在小流域河网、区域(支流)河网和全流域河网上分三级进行汇流演进。通过“坡面产流,逐级汇流”的组织方式,将四个层次的模型整合成一个完整的数字流域模型系统。该系统主要包括五项关键技术,即大流域 DEM 数据存取、流域沟道参数提取、基于遥感图像的模型参数提取、分布式降雨量数据存取和计算机集群并行计算。基于数字流域模型系统框架建立了坡面降雨-径流模型和侵蚀产沙模型,并在岔巴沟流域进行了参数率定和模型验证。此外,作为数字流域模型的应用例子,结合黄河流域进行了四个方面的计算,包括:

(1) 模拟了 1983 年黄河流域花园口以上部分的水资源分布状况和花园口等几个重要水文断面的径流过程,统计了黄河上中游各省的地表水资源量。

(2) 模型用不同的时间步长再现了伊洛河“82.8”洪水($\Delta t=6\text{min}$)和 1983 年黄河小花间的汛期径流过程($\Delta t=1\text{h}$)。

(3) 对黄河中游多沙粗沙区的 1967 年、1978 年、1983 年、1994 年、1997 年五个典型年汛期的产流产沙量进行了模拟计算,结果表明多沙

粗沙区进入黄河干流河道的泥沙量与降雨量、降雨地点、降雨强度以及泥沙的粒径有关,模型可以较好地模拟这些因素的影响。

(4) 以岔巴沟为例进行了小流域淤地坝规划的研究,在岔巴沟流域布设小型淤地坝 541 座,计算模拟了布置淤地坝前后的径流输沙变化,初步分析了淤地坝的减水减沙效益。

模型各项应用的结果表明:

(1) 模型可用于大流域的降雨-径流模拟和水资源量计算。

(2) 模型系统能够适应不同需要,采用不同的计算步长,模拟次洪和连续径流过程。

(3) 辅以降雨预报模块,模型可用于洪水预报。

(4) 模型可用于大区域或局部小流域的产流产沙计算,为淤地坝规划提供科学依据。

本书的研究成果得到了国家自然科学基金创新研究群体基金项目“流域水沙过程与临界调控机理(50221903)”、国家重点基础研究发展规划(973)项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理(G19990436)”的资助,在此一并表示感谢。

参加本项研究的主要人员除本书作者外,还有陈志祥、李铁键、薛海、邓利等。

由于作者水平所限,书中难免出现疏漏,敬请读者批评指正。

作 者

2005 年 9 月于清华大学

目 录

前言

第 1 章 数字流域模型研究意义	1
1.1 数字流域研究背景	1
1.2 数字流域研究现状	3
1.2.1 数字流域框架研究	3
1.2.2 数字流域基础平台建设	4
1.2.3 数字流域模型及相关技术研究	6
1.2.4 数字流域应用系统建设	10
1.3 数字流域研究需要解决的问题	11
第 2 章 数字流域模型原理	13
2.1 数字流域模型的基础——DEM 数据	13
2.2 流域分级理论与沟道分级方法	14
2.3 沟道参数提取系统	16
2.4 数字产汇流模型数据获取	18
2.5 坡面产流模型	20
2.5.1 模型基本单元及其结构	20
2.5.2 模型时空尺度	22
2.5.3 计算原理与过程	22
2.6 坡面侵蚀产沙模型	27
2.7 河道汇流模型	31
2.7.1 马斯京根法	31
2.7.2 分级汇流	41
2.7.3 数据流程和数据表结构	43
2.7.4 汇流程序结构	46
2.8 数字流域产汇流整体模型	47
第 3 章 数字高程模型数据的存取与管理	50
3.1 地形数据的来源	50
3.2 地形数据的预处理	51
3.3 地形数据的存储	53
3.4 地形数据的读取	54

3.5	大流域 DEM 数据管理系统	56
第 4 章	数字流域模型的参数提取	59
4.1	基于遥感图像的模型参数提取	59
4.1.1	常用遥感图像的种类及解译方法	60
4.1.2	遥感图像 Tiff 文件格式	64
4.1.3	遥感图像地理坐标的配准	67
4.1.4	遥感图像任意坐标点的信息提取	70
4.1.5	遥感图像任意多边形区域的信息提取	71
4.1.6	通过遥感图像提取数字流域模型参数	78
4.2	降雨量数据存取	81
第 5 章	数字流域模型的计算机制	85
5.1	模型计算概述	85
5.2	模型计算任务流程	87
5.3	数据准备	88
5.3.1	与地形相关的数据	89
5.3.2	与遥感图像相关的数据	91
5.3.3	降雨数据	96
5.4	单元产汇流计算	98
5.4.1	单元产流计算	98
5.4.2	单元汇流计算	101
5.5	流量叠加计算	102
5.6	河道传输计算	102
5.7	计算方案制定与比较	103
5.7.1	单机串行计算	103
5.7.2	Master-Slave 型并行计算	103
5.7.3	优化并行计算	104
第 6 章	黄河全流域水量计算	106
6.1	黄河流域基本情况概述	106
6.2	流域的划分和分级	108
6.3	模型参数的设定	116
6.4	模型的输入	117
6.5	模型计算结果和分析	119
6.6	小结	126
第 7 章	黄河小花间汛期洪水预报	127
7.1	黄河小花间地区概况	127

7.2	小花间流域划分	128
7.3	流域参数的提取和模型参数的设定	129
7.4	模型计算结果和分析	130
7.4.1	伊洛河洪水模拟	130
7.4.2	小花间径流模拟	134
第8章	黄土高原多沙粗沙区产沙计算	137
8.1	黄土高原多沙粗沙区概况	137
8.2	黄土高原多沙粗沙区产沙模拟	138
8.2.1	多沙粗沙区单元划分	138
8.2.2	产沙模拟	139
第9章	岔巴沟淤地坝规划	174
9.1	淤地坝概述	174
9.2	淤地坝规划中的水沙关系分析	176
9.3	应用模型模拟淤地坝的减沙效果	181
第10章	数字流域模型研究总结与展望	184
10.1	完成的主要工作	184
10.2	工作中的困难、缺点和不足	186
10.3	数字流域后续的研究工作和应用前景展望	187
参考文献		189

第 1 章 数字流域模型研究意义

本章主要介绍数字流域的研究背景、研究内容以及主要的支撑技术,国内外目前对数字流域模型的研究现状和相关技术的应用情况,通过对研究现状的分析指出目前数字流域研究需要解决的问题。

1.1 数字流域研究背景

1998 年 1 月,美国前副总统戈尔在加州科学中心作了题为“数字地球”的演讲,标志着美国“数字地球”战略计划出台。戈尔在讲话中给出了“数字地球”的概念:“数字地球”是一种能嵌入巨量的地球空间信息,对星球所做的多分辨率的三维描述。戈尔的定义道出了“数字地球”的内涵:对地球信息的描述。由“数字地球”衍生出来的“数字中国”、“数字城市”、“数字流域”等,都是对不同领域(区域)信息的描述。

“数字流域”的概念由张勇传(2001)院士于 1998 年提出,此后研究较多、发展较快、创新较活跃的地区是在中国。进入 21 世纪以来,我国先后提出了“数字海河”、“数字黄河”、“数字长江”等一系列数字河流的建设规划,其中有些已经付诸实施。中国青睐“数字流域”最主要的原因是我国的水问题相比其他国家更为严峻,急需建设“数字流域”以研究和解决我国江河水利水害问题。

在 20 世纪最后 10 年中,我国发生了几件撼人心魄的涉水事件。首先是黄河从 70 年代开始的频繁断流,最严重的 1997 年,其下游的利津水文站全年断流长达 226 天,最长断流河段超过 700 公里。其次是继 1991 年淮太大水、1996 年海河流域大水之后的 1998 年长江、松花江流域特大洪水。最后是几乎涉及全流域的淮河污染问题。一首歌谣这样唱出了淮河儿女心中的痛:“50 年代淘米洗菜,60 年代洗衣灌溉,70 年代水质变坏,80 年代鱼虾绝代,90 年代身心受害”。这三个事件生动反映了我国“水少、水多、水脏”三大水问题。当前水问题已成为制约我国经济发展和现代化建设的关键因素。

1990 年以来全国年均洪涝灾害损失在 1100 亿元左右,约占同期全国 GDP 的 2%。遇到发生流域性大洪水的年份,如 1991 年、1994 年、1996 年和 1998 年,该比例可达 3%~4%。

现在全国每年缺水总量为 300 亿~400 亿 m^3 ,全国 660 个城市中,400 多个供水短缺,特别是北方大城市。北京是有近 1500 万人口的特大城市,水资源短缺非常

严重,人均水资源量少于 300m^3 ,是全国平均水平的 $1/8$,世界平均水平的 $1/30$ 。许多地区工农业争水、城乡争水、超采地下水和挤占生态用水现象越来越突出。

我国目前河流污染严重,1999年,黄河流域 114 个水质监测断面中,V类和劣V类水质断面比例为 63.1%,主要支流汾河、渭河、伊洛河、小清河污染严重;淮河流域的 79 个水质监测断面中,V类和劣V类水质断面比例达 56.2%;海河流域 171 个水质监测断面中,V类及劣V类比例为 49.7%;辽河流域 52 个水质监测断面中,劣V类占 69.3%(干流 15 个断面中劣V类比例高达 86.7%)。流经城市的河段普遍受到污染。141 个国控城市河段中,36.2%的城市河段为 I 至 III 类水质,63.8%的城市河段为 IV 至劣 V 类水质。每年由于河流污染造成的损失无法估量。

除此之外,严重的水土流失造成“小水大灾”现象成为中国河流的又一大特点。由于流域上中游的生态环境破坏造成严重的水土流失,数以亿吨计的泥沙进入河道,淤积在下游滩地和河槽当中,导致河道萎缩、行洪能力减少甚至丧失,一遇到小洪水,就发生漫滩决堤的险情,为害两岸。2003 年的渭河洪水灾害就是明显的“小水大灾”现象。

“水少、水多、水脏、水土流失”等水问题目前在中国的任何一条河流上都不是局部的问题,而是涉及到整个流域。解决这些问题,需要对全流域的水过程有透彻的了解,必须借助覆盖全流域的模型。全流域的整体模型要能够处理大量的流域信息,模拟降雨径流关系,揭示河流运动变化的规律,预测河流某些特定行为。“数字流域”的实质就是对流域过去、现在、未来空间及水文信息的多维描述。“数字流域”的研究内容就是综合处理流域的空间、地理、气象、水文和历史水情信息,应用模拟、显示等技术手段,描述流域过去、现在和将来的各种行为。“数字流域”主要的支撑技术有:

- (1) 计算机通信技术。
- (2) 卫星遥感技术(Remote Sensing,简称 RS)。
- (3) 全球定位系统(Global Position System,简称 GPS)。
- (4) 地理信息系统(Geographical Information System,简称 GIS)。
- (5) 虚拟现实技术(Virtual Reality,简称 VR)。
- (6) 海量数据的存取处理技术。
- (7) 水沙过程模型等。

“数字流域”概念的提出还有深刻的社会和技术背景。一方面新的治水思路立足于可持续发展这一基本理念,着眼于人与自然的协调共处,把水利放在自然和国民经济宏观巨型系统中统筹考虑,水利信息的种类和来源大大扩展了,对信息需要更加深度的加工和处理,新的治水思路迫切需要先进的技术手段提供支持;另一方面,信息技术飞速发展,计算机主频不断提高,操作系统不断升级,宽带互联网的出现,传感器技术日趋成熟,为信息采集、传输、处理、共享、控制提供了前所未有的技

术手段和解决方案,将对水利的科研、规划、设计、施工和管理产生全方位的影响,为水利行业全面技术升级提供了可能。

1.2 数字流域研究现状

1.2.1 数字流域框架研究

“数字流域”概念提出后,国内许多研究者从不同角度提出了“数字流域”的整体框架。周晓峰和王志坚(2003a)认为“数字流域”的主要内容首先是对海量的多维流域数据进行管理,其次是为各种应用提供相关信息,即数据的调用平台(接口)。基于这一认识,他们提出了一种主要包含数据采集系统、数据库系统和数据调用平台三层的数字流域系统模型图。袁艳斌等(2001)提出应用主题式点源数据库的设计思想开展数字流域工程建设,并提出了“数字流域”建设的“多S”层结构。这种以主题式点源数据库为核心的数字流域建设模式,对于信息源所在处或基层单位而言,是功能强劲的微型工作站;而对于全流域、省局级和国家流域信息系统而言,是信息齐备的网络节点。汤君友和高峻峰(2003)共同提出了一个由服务体系、技术规范、数据及管理、模拟模型四种功能模块组成数字流域整体框架。牛冀平(2003)从软件工程的角度出发提出了一种数字流域的正交软件体系结构,在这种结构中,因线索的正交性,每一个需求变动仅影响某一条线索,而不会涉及到其他线索,这样,就把软件需求的变动局部化了,产生的影响也被限制在一定范围内,因此实现起来比较容易。刘吉平等(2001)以数字清江为例提出了以互联网或企业专用网为网络支持,以 ArcSDE/ArcInfo 为 GIS 平台的数字流域空间信息系统的框架结构。该框架结构强调流域空间数据的分布式存储,可以解决数据量大,集中存储不便的问题。张秋文等(2001)论述了包括基础层、专题层和综合层三个层次的数字流域整体框架。这种结构把三个层次独立开来,可以根据实际情况,由下至上,逐层建设。

综合以上各家的观点,可以对数字流域的整体框架作如下的描述:¹⁾

(1) 数字流域整体框架包含三层,即数据层、模型层、应用层。

(2) 数据层包括数据采集、数据管理、数据挖掘和数据分析,数据仓库技术是本层的核心技术。

(3) 模型层是由能够模拟流域的某种现象或行为的各种功能模块组成,由这些模块构成的完善的模型系统,理论上可以模拟流域的所有行为,实际上现有的模型系统只能模拟有限的行为,因此需要不断地完善和丰富它,模型库技术是本层的核心技术,数据层是模型层的基础。

(4) 应用层在数据层和模型层的基础上提供两种类型的服务,即数据提供和

1) 刘家宏. 黄河数字流域模型[博士学位论文]. 北京:清华大学水利水电工程系, 2005.

决策支持,数据提供服务包括各种形式的数据查询和显示,决策支持服务是在数据层数据和模型模拟结果数据的基础上综合应用专家知识库和各种评价体系进行决策评价,并给出处理方案,本层的核心技术是决策支持技术。简而言之,数字流域的建设,数据是基础,模型是核心,应用是目标。基于这一认识,王光谦等(2005)提出了如图 1-1 所示的黄河数字流域模型框架。综合应用遥感、地理测绘和水文观测信息为模型建立提供数据基础;模型核心部分是由以产流模块为基础的多种功能模块有机组合而成;模型建成后可以有效模拟流域的产流、侵蚀产沙以及污染物扩散等现象的过程和结果,为流域管理提供决策支持。

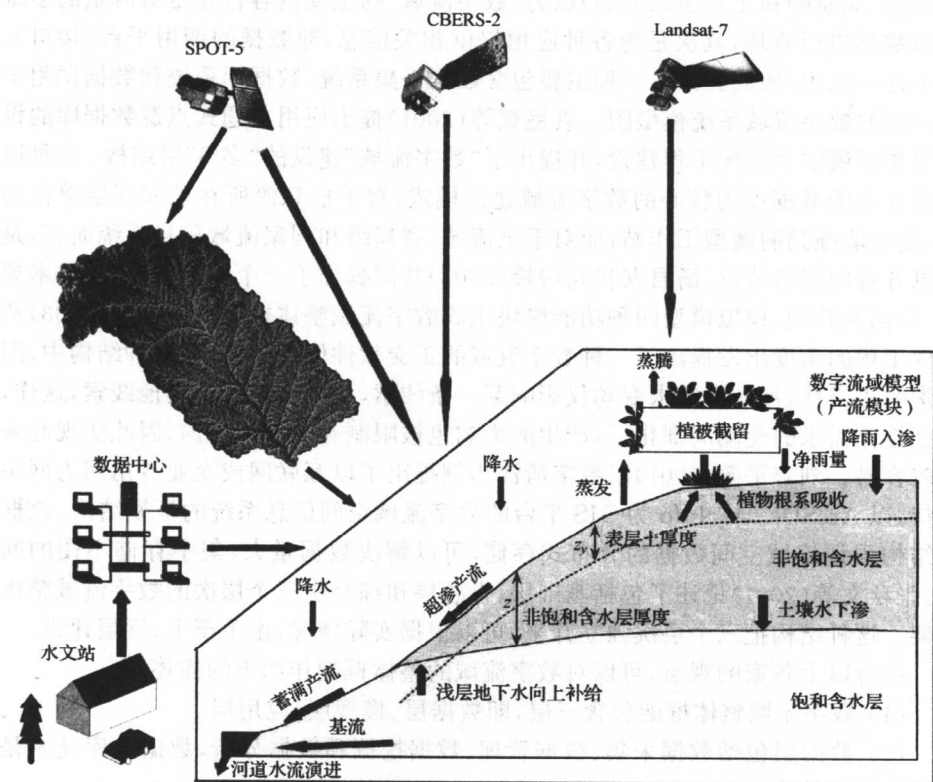


图 1-1 黄河数字流域模型物理过程描述

1.2.2 数字流域基础平台建设

数字流域的基础是数据,数据平台的建设包括数据本身和数据交流的通道。李琦¹⁾和吴少岩认为:“数字地球”有两块基石,一是信息高速公路,一是空间信息基

1) 李琦,吴少岩. 数字地球-人类认识地球的第三次飞跃. http://www.cybergis.org.cn/zz/szdzq_17.html, 1999.

基础设施,两者相互依存、共同发展。如果把前者比作路,那么后者是车;如果前者是车,那么后者是货。有车没路,有路没车,有车没货,有货没车,都是不能想像的。数字流域作为“数字地球”的一个区域层次,其基础平台也包括两部分:一是信息高速公路;二是流域信息基础设施。

中国国家测绘局先后于1994年和1998年底建成了全国1:100万和1:25万地形数据库,数字高程模型库、地名数据库。其中全国1:25万地形数据库含819图幅,包括水系、交通、境界、居民点、地形、植被等14层要素,DEM库分为100m×100m格网和3"×3"格网两种。近几年随着国家空间信息基础设施建设的发展,1:10万的地形图已经在全国范围内建立起来;全国1:5万DEM也在2002年建设完成,其图幅数为24230幅,以Grid格式存储,总数据量80G;1:1万的地形图也在部分地区建立(刘家宏等,2004)。

我国对遥感图像信息的应用已相当广泛,已在大部分地区获取了大比例的航空摄影照片,并发射了回收式国土资源卫星,收集了丰富的卫星图像。中科院卫星遥感地面站定期接收美国陆地卫星(Landsat)图像,基本覆盖我国国土。我国自行研制和发射的“风云一号”气象卫星,分辨率为1km,这些为我国的自然资源合理开发和生态环境规划提供了大量的原始数据。1999年10月14日,中巴“资源一号”卫星发射升空,结束了我国资源卫星数据单纯倚赖国外卫星的历史。2003年10月21日,中巴地球资源卫星(CBERS)02星发射升空,图像空间分辨率达到20m。

流域气象信息是流域信息的重要组成部分,测雨雷达和卫星联合可以获得大尺度流域的降水场。目前,美国已建成了由120多台高质量多普勒雷达组成的称为NEXRAD系统的覆盖全美的测雨雷达网,能够提供时段小至5min、空间分辨率小于1km的雨量估计值;我国目前已在长江三峡区间和黄河小浪底-花园口区间等重点防洪地区建成了测雨雷达系统,全国性的测雨雷达系统也在筹建之中。

在全球定位系统的研究方面,2004年10月10日,中国正式签字加入欧洲“伽利略”计划,该计划预计在2008年部署完成。与国际上现有的全球卫星导航定位系统相比,“伽利略”定位系统精度更高,覆盖率更佳,可靠性更强。

在流域水文信息的采集方面,中国各大江河都有健全的水文观测站网和长时间的水文观测历史,积累了丰富的历史水文信息。90年代水利信息化全面推开,各流域机构成立了信息中心等机构,主要职能为完成数据处理、信息收集及单项系统开发等¹⁾。

中国国家信息化基础设施(CNII),即信息高速公路,在过去的10年间获得了飞速的发展。图1-2显示了我国互联网的发展状况。中国计算机网络目前共有九大

1) 王光谦,“数字黄河”工程——水利信息化的一面旗帜, http://www.yrcc.gov.cn/lib/hhxx/2003-05-14/jj_11411030906.html, 2003.

互连网络¹⁾。空间数据交换网络将以这些网络为基础,通过空间数据交换协议,把地理空间数据拥有部门和用户连接起来。

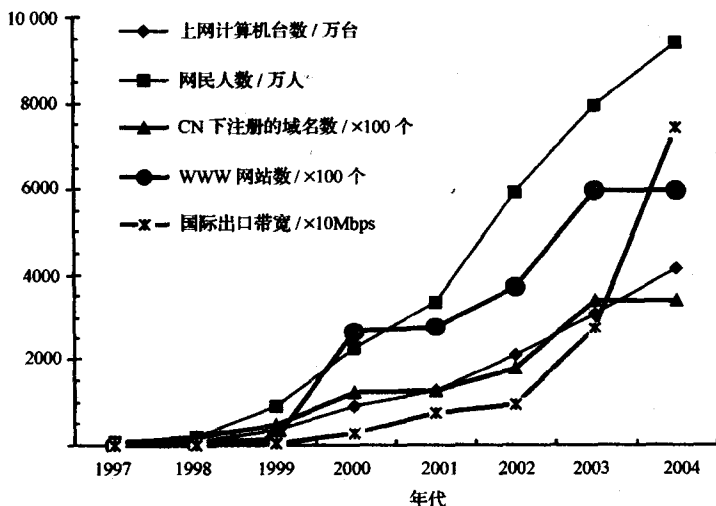


图 1-2 1997~2004 年中国网络发展趋势图

1.2.3 数字流域模型及相关技术研究

数字流域的核心是流域模型。数字流域模型建立的第一步是流域河网的数字化提取和数字化表示,国外对于这方面的研究比较多,主要是利用数字高程模型(Digital Elevation Model,简称DEM)计算得到D8流向文件,然后根据流向分析得到流域的河网、边界以及子流域的划分情况。其操作过程的示意图如下图1-3所示。Martz和Garbrecht(1992;1993;1995;1998)对这种方法做了比较深入的研究,并且用Fortran语言开发了DEDNM(Digital Elevation Drainage Network Model)程序模块。任立良(2001)基于全球1km分辨率高程数据,利用DEDNM提取了长江三峡万县-宜昌区间的河网水系,结果与1:10万地形图上的水系一致。李春红等(2002)基于辽河水系老哈河流域栅格DEM数据,分别采用DEDNM、RiverTools(白彬等,2003)、ArcView软件提取水系信息,构建数字流域,并分析比较了三者凹陷区域识别、水系、子流域及其拓扑关系生成方面的差异。

基于D8流向方法提取河道存在两个影响结果精度的因素:

- (1) 河道的临界给水面积(Critical Source Area,简称CSA)。
- (2) 流域内的平地或湖泊等流向不确定的区域。

1) 东莞市普晋电脑有限公司整理。中国九大互联网的简介。http://www.positivecn.com/Tech/technic/Internet3.htm,2001。

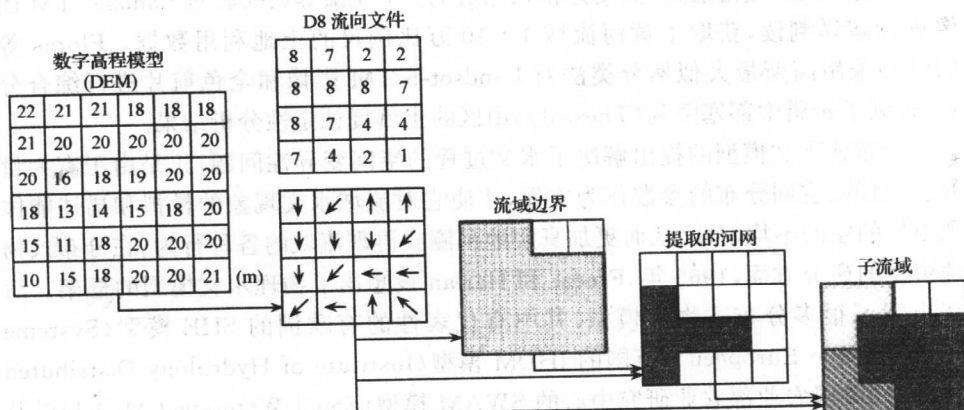


图 1-3 利用 DEM 提取流域河网信息的过程示意图

熊立华等(2003)对 CSA 和平地及凹陷问题有比较详细的讨论。CSA 给得太大,得到的河网结果会比较稀疏,CSA 给得偏小,得到的河网结果会比较密集。CSA 在不同的气候带和不同的土壤覆盖情况下取值是不同的,例如在热带雨林地区,CSA 比较小;在干旱沙漠地区,CSA 则比较大。Vogt 等(2003)研究了气候环境和 CSA 的关系,从气候环境的评价中得出 CSA (即原文的 critical contributing area) 的值,并把 CSA 的值用于提取意大利全境的河网,提取的结果和实际的情况符合得比较好。另外,流域内相对平坦的地区(如平原和湖泊)由于流向不确定,是导致提取河网失真的一个重要原因。Turcotte 等(2001)在提取河网的过程中加入实际河网和湖泊的数字化信息,辅助确定湖泊的范围和平原河道的流向。该方法在加拿大魁北克南部的 Chaudiere River 流域上应用,效果较好。

目前利用 DEM 提取河网的技术已经比较成熟,从大到全球范围,小至几平方公里的区域都能够进行准确的河网提取工作。Renssen 和 Knoop(2000)用 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的格网提取了全球的河系网络,其生成的全球 23 条主要河流的流域面积与实际的河流面积符合得比较好,提取的河网结果可用于全球的气候模拟。类似的研究还有 Vorosmarty 等(2000),他们用 $30' \times 30'$ 分辨率的 DEM 格网提取全球河道,并用 Stralher(1964)分级法把河道进行了分级,发现河道分级数与主流长度、流域面积有一定的相关性。

遥感图像是数字流域模型参数的主要来源之一,数字流域模型所需要的植被覆盖类型、土地利用类型、流域土壤侵蚀系数、陆面蒸发能力等参数都可以通过同时期的遥感图像解译得到。国内外对于遥感图像解译技术的研究都比较多。Nagler 等(2004)研究了科罗拉多河下游典型植被(两种乔木和两种灌木)的 LAI(Leaf Area Index)值以及 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)值, LAI 值和

NDVI 值与植被截留能力、蒸发是密切相关的。王光谦等(2004)对 Landsat TM 图像进行解译判读,获取了黄河流域 1:10 万比例尺的土地利用数据。Floras 等(1999)采用高斯最大似然分类法对 Landsat-5 TM 影像和全色航片进行综合分析,得到了希腊中部塞萨利(Thessaly)山区的土壤侵蚀定性分析结果。

分布式水文模型的提出解决了水文过程的空间变异性问题,正是由于有大量的、丰富的、空间分布的参数作为支撑,才使它对流域水文现象的模拟和描述能体现很好的空间不均匀性,从而更加真实地预测或再现流域的各种行为。在分布式物理模型的研究方面,1969 年,Freeze 和 Harlan 设想出了物理水文模型的框架。后来出现了很多分布式物理模型,其中有代表性的有欧洲的 SHE 模型(Systeme Hydrologique Europeen),英国的 IHDM 模型(Institute of Hydrology Distributed Model)、美国农业部农业研究中心的 SWAM 模型(Small Watershed Model)以及英国的 Beven 和 Kirby 提出的 TOPMODEL 等(许廷武,1997)。SHE 模型实际上是一个模型系统,这个系统是开放式的,可以增加需要的模型,或将新出现的模型加入到 SHE 中去,这样的模型系统结构与传统模型结构相比有很大的灵活性(Singh et al., 1999; Refsgaard, et al., 1995)。IHDM 模型主要用于分析小流域上不同的土地利用方式对洪水的影响。SWAM 模型主要用于分析小流域上不同的土地管理活动对流域水文特征及化学特征的影响(许廷武,1997)。TOPMODEL 将数字地形模型(DTM)与地理信息系统(GIS)结合起来,充分利用容易获取的地形资料,不但结构简单,优选参数少,而且与观测的物理水文过程有密切联系(Holko et al., 1996)。Bandaragoda 等(2004)将 TOPMODEL 应用于包含空间分布的子流域的河系网络,提出了网络版的 TOPMODEL,即 TOPNET。TOPNET 被应用在美国中部伊利诺伊河(Illinois River)的 Tahlequah(属于伊利诺伊州)附近,模型计算的结果与观测值吻合得比较好。国内李宏益¹⁾把 TOPMODEL 应用在北京潮白河流域。

随着对分布式水文模型研究的深入,有针对性的专项研究和讨论也逐渐开展起来。Ajami 等(2004)研究模型参数的空间变化性对分布式产流模型精度的影响,在伊利诺伊河流域 Watts(属于俄克拉荷马州)附近的应用指出:采用随空间位置变化的模型参数并不能明显提高模拟的精度,但是采用分布式水文模型可以模拟计算出流域内部测站的流量信息,而这对集总式模型来说是做不到的。Giannoni 等(2003)研究了半分布式水文的模型参数的校准和率定问题,率定的模型为 Discharge River Forecast Model (Giannoni et al., 2000),共有五个参数:两个描述水系网络的地形参数 k 和 AS^k ;水流在坡面的运动速度 v_h ;水流在沟道的运动速度

1) 李宏益. 基于坡面流单元的分布式流域水文模型及其应用[工学硕士学位论文]. 北京:清华大学水利水电工程系,2003.

v_c ; 最后一个参数是描述土壤前期含水量的参数。率定过程中瞬时单位线的运动速度根据地形坡度来确定, 参数率定只考虑流量峰值的大小和峰值到达的时间, 这种参数率定的方法具有一定的代表性。

目前分布式水文模型的研究已经进入小流域应用阶段, 在国内外许多流域上都建立了分布式或半分布式水文模型。唐莉华¹⁾在北京潮白河山区小流域做了分布式汇流及产输沙模型的应用研究。Biftu 和 Gan (2001) 在加拿大阿尔伯达省 (Alberta) 中部的 Paddle 河 (Paddle River) 流域 265km² 的范围内建立了一个半分布式的流域水文模型。Bandaragoda 等 (2004) 在美国中部伊利诺伊河 (Illinois River) 以上 2484km² 区域建立了分布式水文模型 TOPNET。吴险峰等 (2004) 在黄河支流洛河卢氏水文站以上 4623km² 的流域上建立了一种松散耦合型的分布式水文模型。姜红梅等 (2004) 在长江支流汉江的上游褒河流域 3415km² 的区域上建立了基于新安江模型的半分布式水文模型。孙艳玲等 (2004) 在长江三峡库区的晏家河小流域 72.56km² 的面积上建立了基于 HEC-1 的半分布式水文模型。以小流域为基础, 许多研究者正在探索在大流域上建立分布式水文模型的方法和途径。杨大文等 (2004) 尝试把分布式水文模型应用于拥有 75 万多平方公里的黄河流域。

径流量是数字流域模型模拟的基本对象, 径流的时空分布规律是水资源时空演化和分异规律研究的科学基础, 王浩等 (2004a) 在综合国内外相关研究的基础上提出了径流时空分布理论, 在无定河流域进行了应用实践。由于受人类活动影响的不断加强, 流域水循环过程变得越来越复杂, 王浩等 (2004b) 提出了年径流的天然-人工二元演化理论, 建立了反映流域下垫面动态变化的降水径流经验模型。

虚拟仿真是数字流域另一个重要功能。数字流域的实质就是对流域过去、现在和未来信息的多维描述, 数字流域模型可以再现流域的历史, 预测流域的未来, 但它的模拟结果绝大多数都是以数据的形式给出, 不是很直观。数字流域虚拟仿真目的就是要把各种类型的数据结果用人们能够直观感受的形式表现出来。近年来, 数字流域三维仿真技术获得了较快的发展。周晓峰和王志坚 (2003b) 研究了数字流域的数据共享机制。祝烈煌和周洞汝 (2000) 研究了数字流域三维可视化及其基本要素的提取技术。张尚弘等 (2004) 进行了粒子系统模拟流场的研究。袁艳斌等 (2002) 研究了流域地理景观生成中的纹理映射技术。董文峰等 (2001) 实现了三维仿真地形上的洪水淹没动态模拟过程。数字流域的虚拟仿真在国内的应用日渐增多。王光谦等 (2003) 在黄河流域水量调度系统中应用了三维查询仿真技术。张尚弘等 (2003) 建立了三峡坝区的虚拟查询系统。王玲等 (2004) 建立了清江隔河岩水

1) 唐莉华. 分布式小流域产汇流及产输沙模型的研究[工学硕士学位论文]. 北京: 清华大学水利水电工程系, 2001.