

分布式水文模型 EasyDHM

雷晓辉 蒋云钟 王浩 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

分布式水文模型 EasyDHM

雷晓辉 蒋云钟 王浩 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

EasyDHM (Easy Distributed Hydrological Model) 是中国水利水电科学研究院水资源研究所雷晓辉等人研发的, 具有完全自主知识产权的分布式水文模型系统。包括水循环过程模拟核心模型、参数自动识别模型, 以及相关的模型数据前处理、结果分析工具等的分布式水文模型软件系统平台, 具有功能完整、技术先进、操作简便、嵌入方便等特点, 可以满足资源评价、洪水预报和流域水资源调配等实际水管理业务的需要。

全书由 13 章构成, 共分为五部分。第一部分包括第 1~2 章, 对分布式水文模型研究进展进行了综述, 提出了基于 EasyDHM 模型的流域水循环模拟模型体系。第二部分包括第 3~7 章, 介绍了 EasyDHM 模型的理论方法及相关的几个关键技术, 包括基于 DEM 的水文分析、子流域划分、气象数据时空展布、参数识别和实时洪水预报等。第三部分包括第 8~11 章, 介绍了 EasyDHM 模型在汉江流域、南水北调中线受水区、嫩江、珠江的应用。第四部分包括第 12 章, 介绍了为 EasyDHM 模型开发的软件系统 MWEasyDHM。第五部分包括第 13 章, 对 EasyDHM 模型系统进行了总结, 并对将来的研究及模型系统开发给出了一个方向。

本书可供水利、地理、生态、环境等相关专业的教师和研究生以及水资源规划、调度与管理领域的技术人员参考使用。

图书在版编目 (C I P) 数据

分布式水文模型 EasyDHM / 雷晓辉, 蒋云钟, 王浩等
著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 8
ISBN 978-7-5084-7840-1

I. ①分… II. ①雷… ②蒋… ③王… III. ①水文—
流域模型 IV. ①P33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 173578 号

书 名	分布式水文模型 EasyDHM
作 者	雷晓辉 蒋云钟 王浩 等著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 21 印张 498 千字
版 次	2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	58.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

20 世纪以来水资源问题日益突出, 为了提高水资源管理水平和科技水平, “数字流域”建设正在日益兴起。模型建设尤其是水文模型建设是“数字流域”的核心内容和基础工作。水文模型可分为集总式模型 (lumped model) 和分布式模型 (distributed model) 两种。集总式模型不考虑各部分流域特征参数在空间上的变化, 把全流域作为一个整体; 分布式模型则按流域各处地形、土壤、植被、土地利用和降水等的不同, 将流域划分为若干个水文模拟单元, 在每一个单元上用一组参数反映该部分的流域特性。为了适应气候变化和人类活动双重影响下的水资源管理需求, 分布式水文模型已成为水文模拟的重要发展趋势, 但目前分布式水文模型在实际应用中仍存在诸多困难。例如, 建模复杂、计算效率低和参数识别困难等, 导致模型的应用大多停留在专业科研领域, 缺乏在实际水管理业务中应用。

分布式水文模型 EasyDHM (Easy Distributed Hydrological Model) 是作者等人研发的, 具有完全自主知识产权的分布式水文模型及其软件系统, 力图打造能够真正服务于实际水管理业务, 功能强大而操作简便的易用型分布式水文模型。EasyDHM 是包括水循环过程模拟核心模型、参数自动识别模型, 以及相关的模型数据前处理、结果分析工具等的分布式水文模型软件系统平台, 具有功能完整、技术先进、操作简便、嵌入方便等特点, 可以满足资源评价、洪水预报和流域水资源调配等实际水管理业务的需要。EasyDHM 模型水循环过程模拟核心模型采用模块化和组件式的开发思想, 包括产流、汇流、蒸发、地下水等在内的各个计算模块均可以支持多种算法, 如 Wetspa、新安江模型、Hymod、Topmodel 等多种产流计算方式, 以及扩散波、运动波、马斯京根法、变储量法等多种汇流计算方式, 增强了水循环过程模拟的灵活性和扩展性, 并可以支持多种空间结构 (网格、子流域内计算单元)。

EasyDHM 模型参数自动识别模型包括两个部分: ①基于 LH-OAT 算法的全局参数敏感性分析模块。②基于 SCE-UA 算法的全局参数自动识别模块。同时, 针对分布式水文模型在大流域应用时计算速度低、模型参数率定

困难等问题，作者还提出了“参数分区”的概念，即根据水文站对大流域进行分块计算，分块率定。大大提高了分布式水文模型参数识别的自动化程度，降低了模型参数识别的经验性，提高了模型的率定效率与建模效率。

EasyDHM 模型开发的一套完整的建模、率定、应用平台——MWEasyDHM (Map Window based EasyDHM System)，采用开源 GIS 软件 Map Window 作为基础开发平台，基于自主开发的“基于 DEM 的通用水文分析算法”，开发了 EasyDHM 模型前处理、实时计算、参数识别和后处理等界面，实现了在 MWEasyDHM 模型系统中快速建模、快速率定、快速应用的功能，方便了普通用户对 EasyDHM 的使用。

EasyDHM 模型可以支持不同水管理领域的应用，其中包括：①支持各种时间步长（从小时到日）的洪水预报。②支持水资源评价方面相关的水文模拟与计算功能。③和水资源调配模型的耦合，可以支持流域水资源调配，实现流域二元水循环模拟与调控。

全书由 13 章构成，首先对分布式水文模型的基本概念、发展历程、应用范围、发展趋势及代表性的分布式水文模型等进行综述；其次，描述了 EasyDHM 模型的总体结构、特点及适用领域，并针对其中的子流域划分，参数自动识别和实时洪水预报技术等进行了深入分析讨论；然后，针对汉江流域、南水北调中线受水区等流域和区域，进行了大流域分布式水文模型建模，并对流域的水资源演变规律及水资源评价等问题进行了分析与计算；同时，还针对嫩江右岸典型流域和贵州省珠江流域典型喀斯特流域进行了分布式洪水预报方面的实证应用描述；最后，系统介绍了 MWEasyDHM 模型软件系统的开发思路，技术路线，并以某典型流域为例，展示了其主要用户界面和功能。

本书各章节的撰稿人如下表所示。

章节	标 题	主要撰稿人
前 言		蒋云钟 雷晓辉
1	分布式水文模型研究综述	田 雨 雷晓辉
2	流域水循环模拟模型体系	王 浩 雷晓辉 蒋云钟
3	分布式水循环模拟模型 EasyDHM 理论方法	雷晓辉 廖卫红 王宇晖 田 雨
4	基于 DEM 的水文分析技术	雷晓辉 王宇晖 田 雨
5	分布式水文模型子流域划分方法	雷晓辉 田 雨 廖卫红 王 旭

续表

章节	标 题	主 要 撰 稿 人
6	分布式水文模型气象数据时空展布技术	王 旭 雷晓辉 王 帅 马立亚
7	分布式水文模型参数识别及率定方法	雷晓辉 王宇晖 田 雨
8	EasyDHM 模型在汉江流域的应用	廖卫红 雷晓辉 刘青娥
9	EasyDHM 模型在南水北调中线受水区的应用	雷晓辉 陈 暘 田 雨 王海潮 沈媛媛
10	EasyDHM 模型在嫩江洪水预报中的应用	王宇晖 雷晓辉 白 薇
11	EasyDHM 模型在珠江典型喀斯特流域的应用	田 雨 雷晓辉 舒栋才
12	EasyDHM 分布式水文模型软件系统—— MWEasyDHM	雷晓辉 王宇晖 廖卫红 邢 志
13	结 语	蒋云钟 雷晓辉
全书统稿		雷晓辉 蒋云钟 王 浩

本书研究工作得到了国家自然科学基金创新研究群体项目“流域水循环模拟与调控”(50721006)、“十一五”国家科技支撑计划项目课题“南水北调中线水资源调度关键技术研究”(2006BAB04A07)和“三峡及长江上游特大型梯级枢纽群联合调度技术”(2008BAB29B08)、“中国水利水电科学研究院科研专项”(资集 1037)、水利部公益性行业科研专项经费项目“下垫面变化下漳卫河洪水预报支持平台研究”(200901031)和“水利工程的风险分析和可靠度设计方法”(200801005)等项目的资助,在此一并致谢。

由于受时间和作者水平所限,本书许多内容还有待完善和深入研究,其中错误和不足之处,恳请读者批评指正。

作者

2009 年 12 月于北京

[illegible]

前言

1	分布式水文模型研究综述	1
1.1	水文模型的发展历程	1
1.2	分布式水文模型技术支撑	3
1.3	水文模型的分类	8
1.4	分布式水文模型研究进展	10
1.5	分布式水文模型的应用领域	13
1.6	典型分布式水文模型	16
1.7	分布式水文模型存在的主要问题	22
1.8	分布式水文模型发展趋势	25
1.9	分布式水文模型相关软件系统	26
2	流域水循环模拟模型体系	28
2.1	流域水循环系统及其划分	28
2.2	流域水循环模拟面临的问题及求解模型体系	30
2.3	结论	38
3	分布式水循环模拟模型 EasyDHM 理论方法	39
3.1	EasyDHM 模型框架	39
3.2	EasyDHM 模型空间结构及空间单元划分	42
3.3	EasyDHM 模型输入数据空间离散	46
3.4	EasyDHM 水循环过程模拟	46
3.5	EasyDHM 模型参数推求	75
3.6	EasyDHM 参数识别	82
3.7	EasyDHM 模型建模流程	85
3.8	小结	86
4	基于 DEM 的水文分析技术	87
4.1	数字高程模型 (DEM)	87
4.2	基于 DEM 的水文分析	87
4.3	结论	97
5	分布式水文模型子流域划分方法	98

5.1	水文模型空间离散方法	98
5.2	子流域划分方法	99
5.3	通用复杂流域/区域的子流域划分方法 PGSDM	100
5.4	汉江流域应用实例	107
5.5	南水北调中线受水区应用实例	111
5.6	松辽流域应用实例	114
5.7	小结	115
6	分布式水文模型气象数据时空展布技术	117
6.1	空间展布方法	117
6.2	时间插值方法	132
6.3	实例应用	133
6.4	结论	148
7	分布式水文模型参数识别及率定方法	149
7.1	水文模型参数敏感性分析方法综述	149
7.2	水文模型参数率定方法综述	153
7.3	水文模型参数不确定性研究进展	165
7.4	LH-OAT 方法及 SCE-UA 方法在 AutoWEP 模型中的应用	166
7.5	MOSCEM-UA 方法在 EasyDHM 模型中的应用	175
7.6	NSGA II 方法在 EasyDHM 模型中的应用	179
8	EasyDHM 模型在汉江流域的应用	182
8.1	流域概况	182
8.2	基础数据准备	187
8.3	流域的空间离散	194
8.4	气象要素空间展布	198
8.5	模型参数率定	198
8.6	模型验证期模拟结果分析	207
8.7	气候变化条件及人类活动影响下汉江上游径流响应情况分析	210
8.8	小结	215
9	EasyDHM 模型在南水北调中线受水区的应用	216
9.1	南水北调中线受水区概况	216
9.2	南水北调中线受水区模拟范围的确定	219
9.3	基础数据准备	221
9.4	南水北调中线受水区分布式水文模型建立	223
9.5	结论	235
10	EasyDHM 模型在嫩江洪水预报中的应用	236
10.1	洪水预报技术发展综述	236

10.2	洪水预报误差·····	241
10.3	洪水预报实时校正技术·····	243
10.4	洪水预报研究展望·····	249
10.5	EasyDHM 模型在嫩江洪水预报中的应用 ·····	250
11	EasyDHM 模型在珠江典型喀斯特流域的应用 ·····	262
11.1	概述·····	262
11.2	研究区概况·····	263
11.3	喀斯特流域水文模拟方法·····	265
11.4	基础数据准备·····	267
11.5	EasyDHM 模型构建 ·····	269
11.6	本章小结·····	281
12	EasyDHM 分布式水文模型软件系统——MWEasyDHM ·····	282
12.1	MWEasyDHM 系统开发 ·····	282
12.2	MWEasyDHM 系统主要功能 ·····	288
12.3	本章小结·····	313
13	结语 ·····	314
13.1	小结·····	314
13.2	需要进一步研究的问题·····	314
	参考文献 ·····	316

1 分布式水文模型研究综述

1.1 水文模型的发展历程

水文模型的发展阶段经历了五个阶段,见表 1.1。最初的水文研究大多是针对某一水文环节,采用一些物理概念或数学方程来描述水文现象的基本规律。如 1856 年达西提出描述地下水运动规律的达西渗流定律,1871 年 Saint - Vennant 推导出的地表水一维方程组,1891 年 Manning 提出了计算明渠流速方程,1911 年 Green 和 Ampt 提出了入渗模型。在 20 世纪 30~50 年代, Richard 非饱和流方程、Sherman 单位线、麦卡锡的马斯京根洪水演算法, Horton 入渗模型和河流定律、Clark 单位线模型、Penman 蒸发公式等研究成果,为今后水文模型的发展奠定了基础。

表 1.1 水文模型的发展阶段

阶 段	模 型 发 展	社 会 需 要	重点关注的问题
20 世纪 60 年代之前	概念和理论确立	洪水安全	水运动的基本规律
60 年代	水文要素过程的模型化	防洪和工程安全	降雨径流关系
60~80 年代	流域水文模型的开发	防洪和供水保障	流域水文循环过程
80 年代到 2000 年	分布式水文模型的开发	用水安全和水环境	水文响应时空变异性
2000 年至今	与其他模型耦合应用 的开发	水与生态、气候和 地球演化	水与岩石圈、生物圈、 大气圈的耦合效应

随着计算机技术的出现,从 20 世纪 50 年代起,研究者开始把水文现象的整体循环过程作为一个系统来研究,在 50 年代后期提出了“流域水文模型”的概念。世界范围的大规模工程建设促进了工程水文学的发展与成熟,如观测水文学、统计水文学以及降雨径流模拟技术等日益完善。由于水文循环系统的复杂性,最初的流域水文模型多数采用简单的降雨-径流相关关系来描述流域降雨后的出流响应,即经验性的“黑箱”模型。如 Sherman (1932) 的单位线法和 Nash (1957) 的瞬时单位线和线性水库, Kalinin, Milyukov 径流演算方法等,主要是满足洪水预报的需要。这类模型建立在对流域降雨和河道径流观测数据的统计分析基础上。

20 世纪 60~80 年代,随着科学技术的进步,进入流域水文模型即集总式概念模型(“灰箱”模型)的重要发展时期。这一时期涌现了许多知名的流域水文模型,代表性的模型有美国的 Stanford IV 和 HEC-1 模型,我国的新安江蓄满产流模型和陕北的超渗产流模型,日本的 Tank 模型等。流域水文模型亦属于数学模型,从定量上分析流域出口断面流量过程线形成的全部过程,包括降水、蒸散发、截留和下渗,包括地表径流、壤中流、

地下径流的形成,也包括坡面调蓄和河网调蓄。这些集总式“灰箱”模型中的参数都具有明确的物理意义和定义,与经验性的“黑箱”模型相比前进了一大步,但尚无法给出水文变量在流域内的分布及实际状态。

20 世纪 80 年代以后,流域水文模型开始面临着许多新的挑战,包括水文循环的规律和过程如何随时间和空间尺度变化,水文过程的空间变异性等问题。传统的流域水文模型(集总式)发展缓慢,几乎没有什么突破性进展,新模型的开发以及原有模型的改进一直持续到今天。流域水文模型的输入是流域上各点的降水过程,输出是流域出口断面的流量或水位过程,因此是一种输入具有分散性、输出具有集总性的模型,传统的水文模型在结构上一般并不匹配,故而人们开始开发分布式水文模型。SHE 模型是具有代表性的分布式水文模型,由英国、法国和丹麦的科学家联合研制而成。该模型用质量、能量或动量守恒的偏微分方程来描述流域的主要水文物理过程,并采用差分形式求解,同时也采用了一些实验研究得来的经验关系作为边界条件。模型考虑了植物截留、蒸散发、融雪、坡面和河网汇流、土壤饱和和非饱和流、地表和地下水交换等水文过程,模型参数都具有一定的物理意义,可以通过观测或从数据分析得到。为了描述流域特性(下垫面条件)、降水和水文响应的空间分布,在垂直方向采用分层表示,在水平方向则采用正交的长方形网格来表示。这类模型从水循环过程的物理机制入手,将产汇流、蒸散发、土壤水和地下水运动等过程联立求解,并考虑水文变量的空间变异性,也就是所谓的“白箱模型”。

20 世纪 90 年代,随着对水文循环中各个组成要素的深入研究,以及计算机技术、地理信息系统(GIS)、数字高程模型(DEM)和遥感技术(RS)的迅速发展,为研制和建立分布式物理模型提供了强大和及时的技术支撑,使得分布式水文模型成为水文科学研究和应用的前沿热点之一,许多比较知名的分布式水文模型应运而生,例如,MIKE-SHE, IHDM, TOPMODEL, TOPIKAPI, HEC-HMS 等。

进入 21 世纪以来,水文模型的发展日趋复杂化、多样化和实用化。一方面与地理信息系统(GIS)、数字高程模型(DEM)和遥感(RS)、航测及雷达等遥测技术相结合,以求更加客观地表征流域下垫面和气象输入条件的时空变异性;另一方面还与地球化学、环境生态、水土保持、气象和气候等学科和领域的专业模型相耦合,以解决与流域水循环相关的各种生产实际问题。2002 年,国际水文科学协会(International Association of Hydrological Sciences, IAHS)启动新国际水文十年计划“缺资料地区水文预报”(Predictions in Ungauged Basins, PUB),旨在以 PUB 这个重大的水文问题为依托,实现水文理论的重大突破,并极大地满足各国特别是发展中国家生产和社会经济发展的需要。分布式水文模型在缺资料地区的应用也是研究的重要方向。

此外,为满足管理者的应用需求,各类水文模型的发展向模块化、系统化和商业化发展,如美国 EMS (Environmental modeling Systems) 公司推出的 WMS (Watershed Modeling System), SMS (Surface-water Modeling System) 和 GMS (Groundwater Modeling System); 美国陆军工程兵团水文工程中心开发的 HEC 系列软件(HEC-HMS, HEC-RAS, HEC-RES 等); 丹麦 DHI 开发的 MIKESHE/SHETRAN/MIKE11/MIKE21 系列模拟软件等。

1.2 分布式水文模型技术支撑

1.2.1 地理信息系统与分布式水文模型

地理信息系统 (Geographical Information System, GIS) 是采集、存储、分析和显示空间信息的计算机系统, 是处理和分析地理数据的通用技术。GIS 提供的空间分析功能, 如空间数据的叠加分析、缓冲区分析、表面分析以及数字地形分析等功能, 在水文建模中已经得到了广泛应用。分布式水文模型的发展极大地得益于 GIS 的成熟和日趋强大的功能。GIS 对于分布式水文模型的作用主要体现在两个方面: 分布式水文模型的相关数据处理和分布式水文模型的系统集成。

(1) GIS 技术在分布式水文模型中的应用

根据 GIS 在水文模型运转过程中发挥作用的阶段, 其数据处理功能又可以划分为两类: 前处理和后处理。所谓前处理指的是将不同投影和比例尺的数字地形数据转换为标准格式的数据并提供复杂的地图叠加分析和空间分析功能, 为水文模型处理输入数据; 后处理指的是将水文模型输出可视化 and 再分析。分布式水文模型对流域水文过程的物理描述要求模型的输入数据能够充分反映流域空间的水文异质性。此外, 分布式水文模型的输出结果也远远超过了传统的降水-径流模型, 其输出更多的是如流域内不同深度的土壤含水量、地下水埋深或者污染物浓度等空间分布式信息, 这些都不是传统的数据制备和处理方法所能解决的, GIS 可以解决以上问题。

GIS 在分布式水文模型中发挥着重要作用, 包括: ①空间数据管理。GIS 能够统一管理并分布式水文模型相关的大量空间数据和属性数据, 并提供数据查询、检索、更新以及维护等方面的功能。②水文特征提取。如利用地形数据计算坡度、坡向、流域划分以及河网提取等。例如, ESRI 公司提供的 ArcHydro 模块, 可以在 ArcInfo、Arcview 中直接调用; RSI 公司提供的 RiverTools 等。③模型数据准备。如利用 GIS 的空间分析和数据转化功能, 制备分布式水文模型要求的流域内土壤类型图、土壤深度图、植被分布图以及地下水埋深图等空间分布性数据。④模型输出结果的可视化与再分析 (王书功, 2004)。⑤操作界面开发。例如, 通过 ARCGIS 的二次开发语言, 如 Arcview 中的 Aventure, ArcInfo 提供的 VB 接口等, 将水文模型和 ArcGIS 集成, 通过界面即可操作, 使水文模型的使用易于推广。综上所述, 分布式水文模型的输出结果更多的是空间分布式信息, 这些结果或者是以模型特定的数据格式, 或者是以某些 GIS 系统的数据格式, 例如, ArcView 的 ASCII-GRID 格式或 GRASS 的 GRID 数据格式输出, 应用 GIS 才能对这类结果进行显示、查询和再分析。

(2) 分布式水文模型与 GIS 技术的耦合

分布式水文模型和 GIS 的耦合方式影响着模型的稳定性和可应用性。根据紧密程度, 分布式水文模型和 GIS 之间有三个水平的集成耦合方式: 松散耦合、紧密耦合与完全集成。松散耦合指的是分布式水文模型和 GIS 相互独立, 彼此通过中间数据文件交换信息。分布式水文模型 DHSVM 和 VIC 与地理信息系统的耦合方式就属于松散耦合, GIS 的作用仅限于为水文模型提供数据的前处理和后处理。与 GIS 松散耦合的水文模型稳定性较好, 而易用性不够。紧密耦合是指 GIS 为分布式水文模型提供图形用户界面 (GUI), 用

用户可以通过这个界面操作模型。通常情况下,与 GIS 紧密耦合的水文模型由多个模块组成, GIS 一般作为各个模块的共享接口,用于调度其他相对独立的模块。ArcView GIS 提供了友好的图形用户界面和简单易用的脚本开发语言 Avenue,是分布式水文模型紧密耦合的理想 GIS 平台。分布式水文模型与 GIS 的紧密耦合,增加了模型本身的复杂性,使得模型稳定性有所降低,但是提高了模型的可操作性,降低了模型应用的难度。完全集成指的是 GIS 作为分布式水文模型的一个组成部分存在,这种耦合方式,需要在开放性体系架构的 GIS 平台基础上进行。所谓开放性体系的 GIS 平台,要求 GIS 系统提供二次开发语言或者支持第三方开发语言,并提供系统扩展机制。ArcView GIS 提供了 Avenue 开发脚本,用户可以应用脚本语言扩展 ArcView 的专题分析功能; GRASS GIS 提供了 C 语言的开发接口; ArcGIS Desktop 不但本身提供了 Visual Basic for Application 开发环境,还支持第三方语言扩展。这三种 GIS 平台都属于开放式系统,都是常用的分布式水文模型完全集成平台。与 GIS 完全集成的分布式水文模型稳定性和易用性都是最优秀的,但是其开发难度也是最大的。对于某些分布式水文模型,可能同时存在多种集成方式,例如,非点源水污染模型 AGNPS 存在与 ArcView GIS 三个层次的系统集成,具体的集成方式选择取决于模型用户以及开发人员的技术能力以及开发成本等因素。

GIS 数据模型 Geodatabase 的出现,促进了更高层次的 GIS 与专业模型集成研究。Geodatabase 支持在标准的数据库管理系统 (DBMS) 表中存储和管理地理信息,同时, Geodatabase 可以使得 GIS 数据集里的地理特征更为智能,方法就是通过赋予自然行为以及允许特征间任何种类的关系。

1.2.2 遥感技术与分布式水文模型

遥感泛指各种非直接接触的、远距离探测目标的技术。对目标进行采集主要根据物体对电磁波的反射和辐射特性,利用声波、引力波和地震波等,也都包含在广义的遥感之中。通常人们所认为的遥感的概念是指:从远距离、高空、以至外层空间的平台上,利用可见光、红外、微波等遥感器,通过摄影、扫描等各种方式,接收来自地球表层各类地物的电磁波信息,并对这些信息进行加工处理,从而识别地面物质的性质和运动状态的综合技术。遥感利用遥感器从空中来探测地面物体性质,它根据不同物体对波谱产生不同响应的原理,识别地面上各类地物,具有遥远感知事物的意思,也就是利用地面上空的飞机、飞船、卫星等飞行物上的遥感器收集地面数据资料,并从中获取信息,经记录、传送、分析和判读来识别地物。

(1) 遥感技术

遥感是一门对地观测综合性技术,它的实现既需要一整套的技术装备,又需要多种学科的参与和配合,因此实施遥感是一项复杂的系统工程。根据遥感的定义,遥感系统主要由以下四大部分组成:①信息源。信息源是遥感需要对其进行探测的目标物。任何目标物都具有反射、吸收、透射及辐射电磁波的特性,当目标物与电磁波发生相互作用时会形成目标物的电磁波特性,这就为遥感探测提供了获取信息的依据。②信息获取。信息获取是指运用遥感技术装备接收、记录目标物电磁波特性的探测过程。信息获取所采用的遥感技术装备主要包括遥感平台和传感器。其中遥感平台是用来搭载传感器的运载工具,常用的有气球、飞机和人造卫星等;传感器是用来探测目标物电磁波特性的仪器设备,常用的有

照相机、扫描仪和成像雷达等。③信息处理。信息处理是指运用光学仪器和计算机设备对所获取的遥感信息进行校正、分析和解译处理的技术过程。信息处理的作用是通过遥感信息的校正、分析和解译处理,掌握或清除遥感原始信息的误差,梳理、归纳出被探测目标物的影像特征,然后依据特征从遥感信息中识别并提取所需的有用信息。④信息应用。信息应用的基本方法是将遥感信息作为地理信息系统的数据源,供人们对其进行查询、统计和分析利用。

振动的传播称为波。电磁振动的传播是电磁波。电磁波的波段按波长由短至长可依次分为: γ 射线、X 射线、紫外线、可见光、红外线、微波和无线电波。电磁波的波长越短其穿透性越强。遥感探测所使用的电磁波波段是从紫外线、可见光、红外线到微波的光谱段。太阳作为电磁辐射源,所发出的光也是一种电磁波。太阳光从宇宙空间到达地球表面须穿过地球的大气层。太阳光在穿过大气层时,会受到大气层对太阳光的吸收和散射影响,因而使透过大气层的太阳光能量受到衰减。但是大气层对太阳光的吸收和散射影响随太阳光的波长而变化。通常把太阳光透过大气层时透过率较高的光谱段称为大气窗口。大气窗口的光谱段主要有:紫外、可见光和近红外波段。地面上的任何物体(即目标物),如大气、土地、水体、植被和人工构筑物等,在温度高于绝对零度(即 $0\text{K} = -273.15^\circ\text{C}$)的条件下,都具有反射、吸收、透射及辐射电磁波的特性。当太阳光从宇宙空间经大气层照射到地球表面时,地面上的物体就会对由太阳光所构成的电磁波产生反射和吸收。由于每一种物体的物理和化学特性以及入射光的波长不同,对入射光的反射率也不同。各种物体对入射光反射的规律叫做物体的反射光谱。

(2) 遥感技术在水文学中的应用

遥感技术的兴起为水文学发展提供了新的契机,可以提供土壤、植被、地质、地貌、地形、土地利用和水系水体等许多有关下垫面条件的信息,也可以获取降雨的空间变化特征、估算区域蒸发、监测土壤水分等,这些信息是确定产流特性和模型参数所必需的。水文模拟的结果很大程度上依赖于输入数据,而往往由于缺乏足够的、合适的分布式数据而不能很好地描述水文过程。并且只有获得详细的地形、地质、土壤和气候资料,对大范围流域气候变化和土地利用产生的水文影响研究才有可能。遥感技术可以弥补传统地面监测资料的不足,遥感资料在无常规资料地区可能是唯一的数据源,丰富了水文模型的数据源。

遥感技术在水文学中的应用大致可分为直接应用和间接应用两个方面。遥感技术在水文学中的直接应用,包括洪水过程的实时动态监测、水域面积的识别、冰川水文和积雪水文、利用遥感资料进行降雨量计算等。如 1981 年三江平原大水、1984 年合肥大水等的检测都通过遥感取得了很好的效果;许殿元等利用 TM 图像研究了黄河流域的动态演变,进行其动态规律研究;柯长青等(1998)分析了青藏高原积雪分布与变化的特征。遥感技术在水文学中的间接应用包括区域蒸发、对土壤水分的监测、借助水文模型估算河川径流、获得光学水质参数等。

未来水文科学的发展在很大程度上取决于水文数据的获得及其精度。尽管目前遥感在水文学中的应用还受到传感器、分辨率(时空)以及释译图像精度等的影响,但遥感图像可以为水文学提供大量有关数据已是无可辩驳的事实。和传统的数据收集相比,遥感技术

获取数据的优点主要有:①直接获取或经转换后为数字化形式,便于应用,且数据为栅格形式,适合分布式水文模型的要求。②覆盖空间范围广,可以获得区域以及全球尺度的每个点上的数据,是传统野外实地水文观测不能比拟的。③面状数据,不需要再进行点面的转换。④可以提供相对高分辨率的时间和空间信息。⑤可获取偏僻的无人可及区域的资料。综上所述,遥感技术可以提供面状信息,而非点状信息,可以直接或间接测量常规手段无法测量的水文变量和参数,可以提供长期、动态和连续的大范围资料,因此在水文学上有着广泛前景。

(3) 遥感与水文模型的耦合

就目前的研究情况,遥感与水文模型的耦合大致可分成三类:一是遥感信息和地面同步实测资料的回归模型。此类模型基本上没有物理机制,故时空分辨率都较低,可用于较大流域长时段(如月)的水资源规划和管理。二是将遥感信息作为参数输入与估计等应用于各种水文模型中(松散结合和紧密结合两种方式),或者调整模型结构后与具有空间特征的遥感资料相耦合,形成新的遥感水文模型。三是应用遥感资料的水量平衡模型/方程。此类模型的结构非常清晰,但计算过程中存在累积误差,因此需要其他辅助校验手段。利用遥感信息结合地面实测资料,进而求得降水、区域蒸散发及土壤持水量的变化后,即可得到径流量。

由于现行的多数水文模型都无法直接应用遥感资料,因此调整模型结构成为关键问题。分布式水文模型,可以有效地将流域水文参数空间分布特征与遥感信息耦合,卓有成效。

国外早期的研究主要是利用遥感资料提取流域地物信息、估算水文模型的参数等,如进行土壤分类、应用一些经验性模型估算融雪径流、损失参数等,后期则注意适应遥感信息的模型结构的改造和设计。Bastiaanssen 等(1998)研究了陆地遥感地表能量算法,并且给出了相应的公式推导,随后将算法应用与灌溉流域的热通量计算中。Massimo 等(1999)通过卫星遥感和实测数据的对比,估算非均匀下垫面的通量密度。

自 20 世纪 70 年代,我国开始高度重视遥感技术的发展和應用,在“六五”、“七五”、“八五”、“九五”中,给予重点支持,建立了国家级资源环境宏观信息服务体系和灾害遥感监测评估业务运行系统。洪涝、干旱、林火和雪灾的宏观动态监测与评估系统,具备了针对中国发生多种自然灾害的宏观动态监测和成灾区的区域覆盖评估能力,机载 SAR 数据实时传输系统,实现了 3mSAR 图像的实时网络远程传输、地面接收和处理,在重大自然灾害的监测评估中发挥了重要作用。在运用遥感资料获取流域水文模型的输入和参数率定方面也有一定的应用。如王燕生利用陆地卫星影像获取流域的下垫面资料,将流域按植被和土壤、土地利用分区,并应用气象雷达探测雨区及相应的面雨量,采用 USDAHL 水文模型,进行了少冷河的洪水预报研究。

SCS (soil conservation services) 模型是美国水土保持局研制的小流域暴雨径流估算模型。它是根据降雨径流形成规律,并重点考虑形成径流的下垫面特征来研究暴雨径流的数量关系,同时结合小流域实验观测资料进行统计相关分析所建立的小流域暴雨计算模型。在降雨径流关系上,SCS 模型考虑流域下垫面的特点,在水文模型参数和遥感信息之间建立了直接的联系。

SiB2 (simple biosphere mode, 简化生物圈模型) 是用来研究单层植被中的水、能量以及 CO_2 通量的陆面模型。该模型由 Sellers 等提出, 后经 Sellers 等改进。模型中的水文模块把未来的降雨归入冠层截流和穿透水的组分。当降雨超过冠层的持水能力时, 冠层截流水以潜在速率蒸发或者贡献给穿透水。模型与遥感数据结合紧密, 不同植被类型 (如草地、森林及耕地等)、光合作用率及水文参数等可通过遥感观测获得或估算。Randall 等应用该模型, 结合 GCM (general circulation model) 模型模拟了未来的气候变化, 结果表明降雨普遍减少, 但季风地区增加, 特别是在 1 月的亚马孙流域和 7 月近赤道的非洲及东南亚地区; 同时蒸发也大量减少, 特别是干旱地区如撒哈拉沙漠。另外, 地下水量在多雨地区增加干旱地区减少的现象也普遍存在, SiB2 模型有增加地下水的空间变异性趋势。Kim 等利用卫星遥感资料, 通过 SiB2 模型模拟了泰国 Chao Phraya 河流域的水量平衡, 并把模拟结果与观测站 (观测流域面积 110569km^2) 的观测值进行比较, 结果表明年径流量及水量平衡的模拟值与观测值吻合良好。

SRM (snowmelt runoff model) 是 1975 年瑞士科学家 Martinec 在法国一个 2.65km^2 的小流域建立的第一个半物理机制的融雪径流模型, 也称 Martinet 或 Martinec - Rango 模型, 其目标是模拟及预报以融雪为主要河流补给源的山区流域逐日径流, Martinec 和 Rango 早在 1986 年就对 11 个国家 24 个流域上该模型的应用情况做了回顾, 并评估了模型的参数取值。目前 SRM 模型已经扩展了一个气候变化对流域融雪径流情势影响评价的模块。随着遥感技术的应用, SRM 模型的应用范围已经达到 25 国家, 从北纬 $32^\circ\sim 60^\circ$ 到南纬 $33^\circ\sim 54^\circ$, 超过 100 个流域, 流域面积范围从 1km^2 的小流域到 120000km^2 的大流域不等。它可用来模拟年内或年际融雪季节的逐日流量, 进行短期和季节性径流预报, 评估气候变化对雪盖和融雪径流的潜在影响。

遥感技术极大地拓宽和丰富了水文学的研究内容, 全球水文学的兴起, 在很大程度上得益于遥感技术的发展。遥感技术可以单独用于许多水文问题, 两者结合优势互补。未来水文科学的发展在很大程度上取决于水文数据的获得和精度。在遥感技术的支持下, 水文学研究将会不断深入, 进入新的发展阶段, 更好地为人类服务。

1.2.3 数字流域与分布式水文模型

流域是由分水线所包围的河流集水区, 在流域上的降水将从流域各处向河流中汇集, 直到流域的出口。数字流域则是流域的信息化, 把流域搬进了实验室和计算机, 是真实流域的虚拟对照体。数字流域使对流域有了一个全面的观察和了解。在数字流域理念出现之前, 不可能对一个流域的地形、地貌、水网河系、植被、土地利用等进行全面的观察和了解, 也不可能对流域上发生的降水和径流过程进行全面的观察和了解。无论是流域还是数字流域, 都无法提供降水所形成的径流过程, 特别是在空间上的径流分布及其过程, 解决这一问题的主要工具是水文模型。水文模型可以根据流域水文气象、下垫面状况, 对流域由降水所形成的径流过程进行模拟, 以再现过去发生的径流过程, 并可对未来可能发生的径流过程进行预测和预报。

从流域的观点看, 数字流域是流域空间、地理、气象、水文和历史信息的数字化, 能在计算机上再现流域的实体, 可以在计算机上观察和了解流域的全貌及其发生的自然变化和过程, 特别是水文的变化过程。由于空间信息的增多, 使流域上空的降水和流域下垫面

的不均匀性显现出来,推动了水文模型特别是分布式水文模型的发展,使分布式水文模型不仅能在时间上模拟径流形成过程,还能在空间上模拟径流的分布及其过程。特别是河道洪水演进、洪水淹没,由于可视化的发展,可以在计算机上看到这一现象的模拟过程。因此,数字流域的提出是有一个发展过程的。随着数字地球的提出,作为其组成部分的有关流域信息集合,数字流域被提出来了。

数字流域作为数字地球的一个重要区域层次,由中国工程院院士张勇传在1998年首次提出,我国进入21世纪以来先后提出了“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,主要因为我国水问题相对严峻,急需建设“数字流域”以解决我国江河水利水害问题。数字流域研究的热点集中在数字流域的定义、内容、架构以及模拟流域自然变化,特别是水文变化的模型和应用决策支持系统等方面。

“水少、水多、水脏、水土流失”的问题都涉及到整个流域,需要对全流域的水过程有透彻了解,全流域模型要能够处理大量流域信息,模拟降雨径流关系,揭示河流运动变化规律,预测河流威胁特定问题。“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。其研究内容,就是将水文模型中的比尺模型搬到了计算机上,所不同的是比尺模型按一定比尺做成后就不能再变化了,而在计算机上,流域的比例尺可以变化,既可再现流域的全貌,也可再现流域的局部;比尺模型通过实验来模拟流域的水文变化过程,而在计算机上利用水文模型不仅能模拟流域的水文变化过程,还能再现流域过去、现在和未来的水文变化过程;如果再根据流域的水文变化过程进行水的管理,比尺模型就无能为力了,而在计算机上可以进行数字化管理,为水的科学管理提供决策支持。

数字流域核心模型之一是水文模型。现有的概念性水文模型虽然可以分子流域作为分布式水文模型来用,但其固有的集总式的特点,仅能反映流域整体的径流形成过程,而不能反映流域降水和下垫面不均匀性对径流形成的影响和空间分布。此外,模型的输出仅反映水量的变化,不能直接反映水质的变化。由于集总式水文模型的上述缺陷,不少学者开展了分布式水文模型的研究,即把流域各处按地形、土壤、植被、土地利用和降水等的不同,将其划分为若干个水文模拟单元,在每一个单元上用一组参数反映该部分的流域特性。

数字流域是实现流域现代化管理的重要工具,对它的研究同时具有理论上的前沿性和应用上的广泛性。分布式水文模型较好地再现了流域上的水文变化过程,包括空间和时间上的变化过程、水量和水质的变化过程,这对做好变化环境下的水资源科学评价、考虑生态与环境的水资源合理配置以及洪水预报调度与防灾减灾等工作,具有重要意义。数字流域仍处于探索阶段,至今还没有公认和统一的学术定义,其基本概念和内涵也尚无定论。因此,在研究中存在着框架结构多样、建设标准不统一、信息和技术不能共享等诸多问题。随着信息采集手段的现代化和空间技术的发展,以及计算机科学技术和网络技术的发展,数字流域的开发研究将会得到更好更快的发展。

1.3 水文模型的分类

1.3.1 水文模型的分类

根据描述的水文现象关系,可分为确定型、随机型及混合型水文模型。其中,确定型