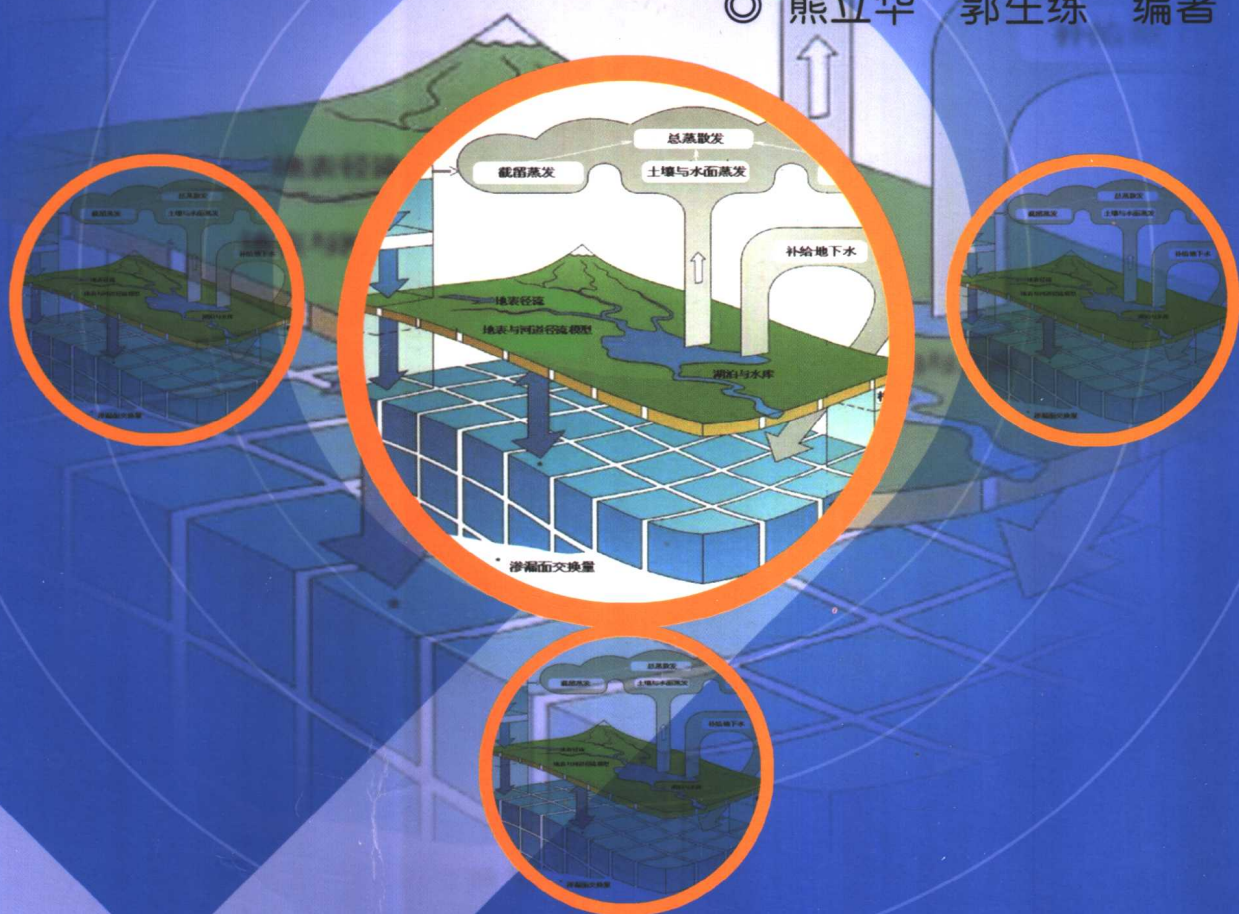


水科学前沿学术丛书

# 分布式 流域水文模型

◎ 熊立华 郭生练 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

水 科 学 前 沿 学 术 丛 书

# 分布式 流域水文模型

◎ 熊立华 郭生练 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了分布式流域水文模型的理论、方法和实例。包括：水文循环中各个物理过程的数学模拟；数字高程模型；流域地貌指数的提取与分析；数字河网的提取；基于数字高程模型的流域等流时线的推求；TOPMODEL；半分布式月水量平衡模型；TOPKAPI 模型；MIKE SHE 模型；SHETRAN 模型；DHSVM 模型；ARC/EGMO 模型。

本书适合于水利、地理、气象、国土资源等领域的广大科技工作者、工程技术人员参考使用，也可作为高等院校高年级本科生和研究生的教学参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

分布式流域水文模型/熊立华, 郭生练编著. —北京:  
中国水利水电出版社, 2004  
(水科学前沿学术丛书)  
ISBN 7-5084-2103-5

I. 分... II. ①熊...②郭... III. 水文—流域模型  
IV. P344

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 044355 号

书 名	水科学前沿学术丛书 <b>分布式流域水文模型</b>
作 者	熊立华 郭生练 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	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	787mm×1092mm 16 开本 14.5 印张 344 千字
版 次	2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—3100 册
定 价	32.00 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

自第一个严格意义上的分布式流域水文模型 SHE (Système Hydrologique Européen) 于 1986 年被提出来之后, 分布式流域水文模型已成为当今水文科学领域中研究的热点、难点和重点之一。分布式流域水文模型不仅可以帮助人们更加深入地研究和了解自然界水文循环在不同时间和空间尺度上的演变过程和规律, 而且为综合解决在实践中各种和水文循环紧密相关的一些工程问题提供了一个有效的框架和平台。随着计算机、地理信息系统、遥感以及全球定位系统等科学技术发展的日新月异, 分布式流域水文模型的研究与应用在过去 20 多年里也相应地取得了重要的进展。

分布式流域水文模型是在系统水文模型和概念性水文模型的成功经验上发展而来的, 代表着新一代流域水文模型的研究和发展方向, 本书的主要宗旨是将分布式流域水文模型的理论、方法和国际上 (主要是欧洲发达地区) 一些典型的分布式流域水文模型系统地介绍给感兴趣的读者, 来促进分布式流域水文模型在我国的深入研究和广泛应用。由于分布式流域水文模型涉及到很多学科, 并且与之密切相关的许多理论和技术都在不断发展之中, 因此本书仅仅是介绍了一些基本概念和内容。本书内容包含三个方面: 首先介绍建立分布式流域水文模型所需要的一些基本的专业理论知识, 主要是如何模拟流域水文循环中各个物理过程; 然后介绍在水文科学领域中如何分析和利用地理空间信息, 建立地理空间信息和水文过程的联系, 以及将地理空间信息平台和水文模型进行耦合来对全流域上某个或多个水文过程或状态变量进行时间和空间分布模拟; 最后介绍了国外的几个比较成熟的、具有代表性的分布式流域水文模型及其应用。本书的出版, 希望能为我国分布式流域水文模型的发展起到一个抛砖引玉的作用。

本书由熊立华和郭生练负责编写, 研究生杨井、王渺林、周芬、倪雅茜参与了部分研究和编写工作。本书是在综合国内外许多资料的基础上, 经过反复酝酿写成的, 其中一些章节融入了作者近年来的研究成果。由于作者水平有限, 编写时间仓促, 书中必然有许多缺陷和不妥之处, 比如对模型尺度和参数率定等问题并没有做深入的探讨和研究, 在引用文献时, 也可能存在

挂一漏万的问题，希望读者和有关专家批评指出，请将意见寄交给武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室熊立华，以便今后改正。

本书中的主要研究成果是在国家重点基础研究发展规划“973”项目(G19990436)和国家自然科学基金项目(5977908, 50179026)的资助下完成的。在本书的出版过程中，得到了“水文学及水资源”国家重点学科建设经费的支持。刘昌明院士、夏军教授、张建云教授、包为民教授等专家学者对本书进行了评审，提出了许多宝贵的意见和建议。另外，中国水利水电出版社邓群同志对此书的出版付出了大量的心血，在此一并感谢。

**编著者**

2003年8月于武汉

# 目 录

前 言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 分布式流域水文模型.....	1
第二节 目的和全书结构.....	10
<b>第二章 水文时空变化过程模拟基础</b> .....	19
第一节 降雨空间分析方法.....	19
第二节 土壤水运动过程.....	29
第三节 下渗.....	34
第四节 蒸发与散发.....	39
第五节 融雪.....	47
第六节 流域汇流单位线.....	49
第七节 河道流量演算.....	54
第八节 流域分布式汇流演算.....	60
<b>第三章 数字高程模型与地貌指数</b> .....	64
第一节 数字高程模型的数据来源.....	64
第二节 数据采集方法.....	66
第三节 流域地貌指数提取.....	68
第四节 流域地貌指数的水文物理意义.....	72
第五节 湿度指数的空间分布分析.....	75
第六节 河网水系的生成.....	77
<b>第四章 TOPMODEL</b> .....	82
第一节 TOPMODEL 的概念与推导.....	82
第二节 流域降雨-径流关系模拟应用.....	86
第三节 土壤导水率与缺水深函数关系研究.....	88
第四节 结论与讨论.....	91
<b>第五章 基于 DEM 的流域等流时线和分布式水文模型</b> .....	93
第一节 基于 DEM 的流域等流时线.....	93
第二节 基于 DEM 的分布式水文模型.....	98
<b>第六章 半分布式月水量平衡模型</b> .....	105

第一节	月水量平衡模型及其比较研究 .....	105
第二节	两参数月水量平衡模型 .....	107
第三节	半分布式月水量平衡模型 .....	112
第四节	气候变化对水文水资源的影响评价 .....	116
<b>第七章</b>	<b>TOPKAPI 模型</b> .....	120
第一节	概述 .....	120
第二节	分布式 TOPKAPI 模型 .....	122
第三节	集总式 TOPKAPI 模型 .....	128
第四节	应用举例 .....	132
第五节	结论和展望 .....	136
<b>第八章</b>	<b>MIKE SHE 模型</b> .....	139
第一节	概述 .....	139
第二节	水流运动模块 (MIKE SHE WM) .....	140
第三节	平移扩散模块 (MIKE SHE AD) .....	152
第四节	MIKE SHE 应用情况 .....	152
第五节	存在的问题和研究展望 .....	158
<b>第九章</b>	<b>SHETRAN 模型</b> .....	164
第一节	概述 .....	164
第二节	研究进展和应用 .....	167
第三节	模型研究展望 .....	174
<b>第十章</b>	<b>DHSVM 模型</b> .....	179
第一节	概述 .....	179
第二节	模型物理过程及数学公式 .....	181
第三节	模型评价及应用 .....	191
第四节	结论 .....	195
<b>第十一章</b>	<b>ARC/EGMO 模型</b> .....	198
第一节	概述 .....	198
第二节	ARC/EGMO 的结构设计 .....	199
第三节	空间分解和参数估计 .....	200
第四节	模型物理过程及数学公式 .....	204
第五节	ARC/EGMO 应用的数据处理 .....	215
第六节	SAALE 流域应用实例 .....	217
第七节	结论和展望 .....	221

分布式流域水文模型 (distributed hydrological model) 是当今水文科学研究和应用的热点、难点和重点之一。分布式流域水文模型不仅可以帮助人们更加深入地了解水文循环在不同时间和空间尺度上的演变规律和过程, 而且为综合解决实践中各种和水文循环紧密相关的问题提供了一个更加有效的框架和平台。本章主要回顾流域水文模型的发展历史, 总结分布式流域水文模型的国内外研究现状和进展, 探讨分布式流域水文模型在实践中的应用和未来的发展前景。

### 第一节 分布式流域水文模型

#### 一、流域水文模型概论

流域水文模型是水文科学中一个最重要的分支之一, 是研究水文自然规律和解决水文实践问题的主要工具。水文模型以水文系统为研究对象, 根据降雨和径流在自然界的运动规律建立数学模型, 通过电子计算机快速分析、数值模拟、图像显示和实时预测各种水体的存在、循环和分布, 以及物理和化学特性。流域水文模型的研究大约始于 20 世纪 50 年代, 经过半个多世纪的发展, 流域水文模型已在水利工程规划设计、洪水预报、水资源开发利用中得到广泛的应用, 为解决各种工程水文问题和提高人们对水文规律的认识起到了巨大作用<sup>[1-10]</sup>。

严格来说, 流域水文模型可分为确定性模型和随机 (统计) 模型两大类<sup>[5-6]</sup>。但是在实际中, 流域水文模型一般是指确定性模型。从反映水流运动物理规律的科学性和复杂程度而言, 水文模型通常被分为三大类: 系统模型 (也即黑箱子模型, black - box model)、概念性模型 (conceptual model) 和物理模型 (physically - based model)。

系统模型将所研究的流域或区间视作一种动力系统, 利用输入 (一般指雨量或上游干支流来水) 与输出 (一般指流域控制断面流量) 资料, 建立某种数学关系; 然后就可由新的输入推测输出。这种模型只关心模拟结果的精度, 而不考虑输入~输出之间的物理因果关系。系统模型有线性的和非线性的, 时变的和时不变的, 单输入单输出的, 多输入单输出的, 多输入多输出的等多种类型。其中具有代表性的模型有: 简单线性模型 (SLM), 线性扰动模型 (LPM), 约束线性系统模型 (CLS), 线性可变增益因子模型 (VGFLM), Volterra 函数模型, 多输入简单线性模型 (MISLM), 多输入线性扰动模型 (MILPM), 多输入可变增益因子线性模型 (MIVGFLM)<sup>[3-4]</sup>, 以及神经网络模型 (ANN)<sup>[11-16]</sup>等等。



概念性模型利用一些简单的物理概念和经验关系，如下渗曲线、蒸发公式、或有物理意义的结构单元，如线性水库、线性河段等，组成一个系统来近似地描述水流在流域的运动状态。概念性流域水文模型主要有：由美国天气局 Sitten 提出的 API 模型，菅原正已提出的水箱模型 (Tank Model)，Craford 和 Linsley 提出的斯坦福模型，Bernash 等提出的萨克拉门托模型，爱尔兰国立大学工程水文系研制的 SMAR 模型，丹麦技术大学于 1973 年提出，后经丹麦水力研究所在实践中逐渐完善的 NAM 模型，国内原华东水利学院赵人俊教授提出的新安江模型<sup>[1,3]</sup>，意大利 Todini 提出的 Arno 模型<sup>[17]</sup>。

物理模型则依据水流的连续方程和动量方程来求解水流在流域的时间和空间变化规律，比如后面要提到的 SHE 模型<sup>[18-19]</sup>。

从反映水流运动空间变化的能力而言，水文模型又可分为两类：集总式模型 (lumped model) 和分布式模型 (distributed model)。集总式模型认为流域表面上各点的水力学特征是均匀分布的，对流域表面任何一点上的降雨，其下渗、渗漏等纵向水流运动都是相同和平行的，不和周围的水流运动发生任何联系，因此整个流域被当作一个单元体，只考虑水流在单元体内的纵向运动。分布式模型则认为流域表面上各点的水力学特征是非均匀分布的，水流在流域表面上分布并不均匀，应将流域划分为很多个小单元，在考虑水流在每个小单元体内的纵向运动时，也要考虑各个小单元之间水量的横向交换。一般说来，系统模型和概念性模型都是集总式模型，而物理模型都是分布式模型。另外，介于集总式模型和分布式模型之间，还有一种所谓的“半分布式”水文模型，其典型代表是以地形为水文过程空间变异性基础的 TOPMODEL 模型<sup>[86-87]</sup>。在 TOPMODEL 模型中，采用地貌指数  $\ln(\alpha/\tan\beta)$  作为水文相似性指数，流域的地貌指数  $\ln(\alpha/\tan\beta)$  概率分布曲线则反映水文过程在流域上的空间变异性。

目前应用较为广泛的模型多为系统模型和概念性模型，水文物理模型因资料条件难于满足，在实际应用中受到限制。但是，作为集总式水文模型，系统模型和概念模型也有很多缺点，其主要缺点包括不能反映实际暴雨洪水产汇流的空间分布特性，无法全面地刻画水文系统分散输入集中输出的产汇流规律，无法模拟变化环境（如土地利用，水土流失，面源污染，气候变化影响评价等）中的陆地表面过程。因此为了研究和解决变化环境中的水文水资源问题，评估和监测流域的径流过程和水资源量的动态变化规律，实现水资源的可持续利用和发展战略，必须开发研制有物理基础的分布式流域水文模型。

在这里有必要指出，对于有很多不同类型和不同复杂程度的流域水文模型并存这一现象有以下几个原因。第一，由于水文循环的复杂性，人们对水文循环的自然规律并没有完全掌握，不同的水文学家对有些水文现象有不同的理解和解释，反映在水文模型上，则是有不同的数学方程和公式。第二，随着科学技术的不断发展，特别是计算机技术的突飞猛进，水文模型不必再考虑计算机内存和运行速度的限制，因而可以采用更加科学，但也更加复杂的数学公式，相应的计算程序和算法也就更繁琐。第三，随着社会的发展和进步，对水文模型的功能要求也越来越多，越来越高，从单纯的流域某控制断面的洪水预报到全流域的洪水调度和水资源调度，导致模型的框架结构越来越复杂。这样，旧的水文模型不断被改进，而同时又有新的水文模型被提出，使得水文模型成为水文学中的研究热点。

## 二、分布式流域水文模型

1969年，当概念性水文模型的研究开展得如火如荼时，Freeze和Harlan<sup>[20]</sup>提出了分布式水文物理模型（physically-based distributed models）的概念和框架。在概念性水文模型中，整个流域被简化为一个垂直圆柱体，在圆柱体内的水只有垂直向运动而无水平向运动。而Freeze和Harlan建议用更精致的方法（主要是水力学方法）来研究降水在流域内部的运动规律，既要考虑流域内部垂直方向水量交换，也要考虑流域内部水平方向水量交换。限于当时的计算机水平，水文学家对分布式水文物理模型的研究并不是很多。

到了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而变化的问题，水文过程的空间变异性问题，还有水文、地球化学、环境生态、气象和气候之间的耦合问题。以前研制的大部分流域水文模型（系统模型和概念性模型），由于其自身存在着许多不足和局限性，无法适应这些挑战。因此人们开始对分布式水文物理模型发生兴趣。在20世纪90年代，计算机技术，地理信息系统（Geographic Information System，简称GIS），数字化高程模型（Digital Elevation Model，简称DEM）和遥感（Remote Sensing，简称RS）技术迅速发展，为研制和建立分布式水文物理模型提供了强大和及时的技术支撑，使得分布式水文物理模型成为水文学家研究的前沿热点之一<sup>[21-37]</sup>。

第一个真正的，或者说具有代表性的分布式水文物理模型由英国、法国和丹麦的科学家联合研制而成，发表于1986年，称之为SHE（Système Hydrologique Européen）模型<sup>[18-19]</sup>。该模型是在Freeze和Harlan<sup>[20]</sup>的思想的指导和启发下，于1976年开始联合研制的。SHE模型是一个最早和最有代表性的分布式水文物理模型，其模型结构示意图如图1-1所示。该模型主要的水文物理过程均用质量、能量或动量守恒的偏微分方程的差分形式来描述，当然也采用了经过一些独立实验研究得来的经验关系。SHE考虑了蒸散发、植物截留、坡面和河网汇流、土壤非饱和和饱和流、融雪径流、地表和地下水交换等水文过程。该模型参数都有一定的物理意义，可以通过观测或从资料分析中得到。流域

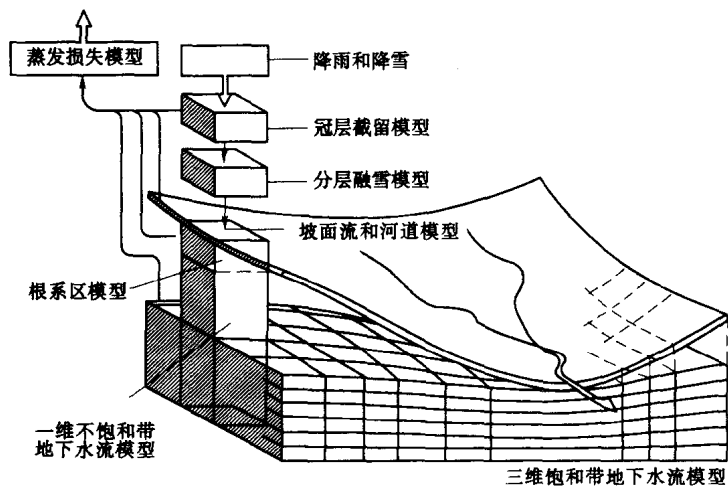


图 1-1 SHE 模型结构示意图

特性，降水和流域响应的空间分布信息在垂直方向用层来表示，水平方向则采用正交的长方形网格来表示。

从 SHE 模型开始<sup>[6]</sup>，人们先后研制建立了一些分布式水文模型<sup>[22-60]</sup>。例如 SHE 模型现在也有很多不同的版本，比如 MIKESHE，SHETRAN 等等，并在许多流域得到检验和应用<sup>[54,59]</sup>。在美国，一个比较典型的分布式模型是由美国工程师兵团研究的 CAS-2D<sup>[45]</sup>模型。由于这些分布式水文模型用数字高程模型来描述流域地形地貌<sup>[82-85]</sup>，因此通常也叫基于数字高程模型的分布式水文模型。

分布式模型与集总式模型有着明显不同的结构。在集总式模型中，单元区域内的物理过程一般由几层垂直方向的蓄水体构成，水平方向则采用简单或概化后的汇流模型。分布式模型着重考虑不同单元之间和子流域之间的水平联系，这种联系起因于径流流向的随机性和河网的连通性，而且正是这种联系直接地决定着分布式模型的结构和复杂性，分布式模型可分为如下两种不同结构：

(1) 紧密耦合型：这类模型的主要特点是应用连续方程和运动方程来建立相邻网格单元或子流域之间的时间和空间关系，采用数值方法进行求解。这类模型包括 SHE 模型和它的变形，这种模型正是人们所指的分布式水文物理模型。

(2) 松散耦合型：这类模型的主要特点是在每个单元网格或子流域上应用现有概念性集总式模型来推求净雨，再进行汇流演算，推求出口断面流量。这种模型正是人们所指出的分布式水文概念模型。比如基于新安江模型的分布式水文模型<sup>[49]</sup>。

通常人们所说的分布式模型主要是指分布式流域水文物理模型。自然界包气带结构的复杂性和降雨的时空分布特性导致了多种产流机制的存在。为此，必须建立考虑地形坡度、土层各向异性、饱和侧向流、非饱和侧向流对产流的影响的分布式水文物理模型。在分布式流域水文物理模型中，一般采用数学物理方程来描述暴雨洪水的产汇流规律，并且产汇流模型中的坡面流、壤中流、地下径流、下渗过程、河道汇流等参数可以随时空变化<sup>[61-69]</sup>。

分布式水文物理模型在实践中的应用主要包括：①水资源评价；②节水灌溉；③土壤侵蚀；④地表水污染；⑤地下水污染；⑥洪水实时预报；⑦土地利用变化的影响；⑧水生生态；⑨气候变化影响；⑩人类活动影响。

分布式水文物理模型主要研究四类问题。即：径流模拟；模拟人类活动（如森林砍伐，抽取地下水和灌溉）对径流的影响；水质和生态模拟；水文过程物理机理的研究。在上述四个研究问题中，地表径流模拟是最基本和最重要的一环。如果分布式模型不能准确模拟流域水流运动的空间变化，那么其他三个目标就更难实现<sup>[71-76]</sup>。

### 三、分布式水文模型的技术支撑

分布式水文模型的最主要的技术支撑包括如下几个方面：①建立分布式水文模型的平台，例如地理信息系统；②获得大范围空间信息和资料的方法，例如卫星遥感<sup>[81]</sup>。

为了模拟流域水文循环的空间变异性，人们把数字高程模型的资料，作为地理信息系统数据库的一个基本信息来源。目前国外常用的 ARC/Info GRID 模块可提供一些基本的地形分析算法。根据数字高程模型，还可以生成一些反映流域水文特性的地貌参数。

分布式水文模型通常需要大范围上的各种观测资料，而一般的常规站网观测很难满足这种要求。遥感则是解决在研制分布式水文模型时资料缺乏的一个很有前途的手段。例如，利用地球同步卫星和轨道卫星以及最新的 MODIS，可以获得大面积的地形、地貌、土壤、植被、水文和气象观测信息，利用遥感微波技术还可以估算土壤含水量等。尽管遥感在很多方面仍不能直接观测水文变量，但是通过间接的转化的确可以获得一些传统水文方法观测不到的信息，使建立描述时空变异性、多变量或参数化的耦合流域水文模型成为可能。

#### 四、国内分布式水文模型代表性成果

我国分布式水文模型的研究起步较晚。20 世纪 90 年代以来，在国家自然科学基金的支持下，我国一些学者进行了探索性的研究工作。尽管起步较晚，但也取得了较大进展。郭生练、夏军、刘昌明、芮孝芳、王中根、吴险峰等都对国内外分布式模型的研究进展做过全面评述<sup>[88-97]</sup>。现将主要代表性成果<sup>[98-113]</sup>作简要介绍：

1997 年，黄平等<sup>[98]</sup>对国外具有物理基础的分布型水文数学模型的研究进展进行了回顾与评述，分析了国外一些模型中存在的缺点，并在此基础上提出了流域三维动态水文数值模型。该模型由流域坡面流方程与三维饱和、非饱和流方程组成，并针对该模型的数值解法，提出了两种差分格式：一种是 MacCormack 差分格式，该格式在计算空气中的冲击波或间断波方面有许多优点；另一种差分格式是近年来国外流行的隐式剖开算子法，该方法具有离散格式灵活和稳定性好以及收敛速度快等优点。应用该模型可以了解任一时刻坡面流，饱和、非饱和和带流在降雨过程中相互作用与影响的情况，以及产流面积的空间变化与位置，有助于更深刻地了解流域产汇流的基本物理过程。

任立良和刘新仁<sup>[99-102]</sup>在数字高程模型（DEM）的基础上，进行子流域集水单元勾画、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（新安江模型）；再根据河网结构拓扑关系建立数字河网汇流模型（马斯京根法），从而形成数字水文模型（属于松散耦合分布式模型）。该模型应用在淮河史灌河流域，用于模拟时段日流量过程，效果不错。

2000 年，李兰等<sup>[103-104]</sup>提出和建立了一种分布式水文物理模型，该模型由各小流域产流模型、汇流模型、流域单宽入流和上游入流反演模型、河道洪水演进四大部分组成。要合理进行产汇流方案率定和预报，必须知道进入河道的人流过程（等于单宽入流过程×单宽距离），但一般流域仅有出口断面的实测流量资料，缺乏上游入流过程（即上边界条件）和出流过程。根据降水资料和各个子流域的面积比，将总径流过程分配到各个子流域，采用逆时间逆边界原理和不确定问题算法，研制出流域单宽入流和上游入流反演计算模型。该模型将数学物理反问题与洪水预报相结合，分别给出了流域产流、河道汇流和水库洪水演算三个动态分布式预报耦合模型，该模型可计算出参数、水文物理变量等随时间和空间分布变化的动态过程，不仅可以用来分析流域内降水径流演变规律，而且还可以进行洪水实时预报。该模型应用于王瑶、陆浑、怀柔等水库的洪水预报，效果均不错。

2000 年，郭生练、熊立华等<sup>[105-106]</sup>提出了一个基于 DEM 的分布式流域水文物理模型，该模型详细描述了网格单元的截留、蒸散发、下渗、地表径流、地下径流、融雪等水

文物理过程，在每一个网格上用地形高程来建立地表径流之间的关系。其中：引入植物截留能力的物理参数—植物蓄积容量来描述植物截留过程；流域的蒸散发主要考虑了太阳辐射、日云量、反射率、植物叶面指数、可供土壤水、大气温度等因素；用一维圣维南方程的运动波近似法模拟坡面水流运动，用运动波模型模拟地下径流。不同网格单元之间的水流流向及流量采用多流向法确定。该模型仅需优化调整一个参数，即下渗能力校正系数，其他参数均可从基础资料中分析求得。将该模型应用于美国缅因州 BMW 流域检验模型的结构和精度，模型的效率系数平均值为 85.2%，水量平衡指数平均值为 0.98，与新安江模型的计算结果相比精度略有提高。

2001 年，郭生练、杨井等建立了基于 GIS 的分布式月水量平衡模型。其中月水量平衡模型采用郭生练等提出的两参数月水量平衡模型。该模型结构简单、物理概念明确；优选参数少、易于率定检验、便于在无资料地区推广应用；模型参数间的相关性较弱，对初值不敏感。建立分布式月水量平衡模型需要解决的主要技术难题之一就是模型参数的网格化，即分析模型参数与地理信息和气候条件等因素的关系，将率定的参数移植到无资料地区应用。由于所掌握的资料有限，只能根据有限的资料来将模型的参数网格化。因为水量平衡模型参数少，使得应用 GIS 技术，建立模型参数与地理信息的相关和经验关系，进而对流域模型参数进行网格化成为可能。将该分布式水量平衡模型应用于赣江和汉江流域，取得了较高的模拟精度。

2002 年，俞鑫颖、刘新仁等<sup>[107]</sup>建立了分布式冰雪融水雨水混合水文模型。在以冰雪融水雨水混合补给为主的流域中，产流空间分布的不均匀性十分突出。为此，建了一种基于数字高程模型（DEM）和地理信息系统（GIS）的网格化空间分布水文模型。模型中主要包括以下几个方面的问题：生成河网系统；确定网格温度；确定网格降雨和降雪量；确定网格积雪或融雪、融冰水量；确定网格蒸发能力；计算网格产流和计算流域汇流（产汇流计算基本采用新安江模型）。模型需率定的参数包括三类：融雪参数、产流参数和河网汇流参数。该模型可在分别考虑不同网格的热量和水分状态的基础上计算产流和汇流，并在乌鲁木齐齐河山区流域上得到应用，取得了良好效果。

2002 年，夏军等<sup>[108-112]</sup>将时变增益非线性水文系统（TVGM）与 DEM 结合，开发了分布式时变增益水文模型（DTVGM）。传统的或基于物理途径的分布式水文模型参数多，要求的水文资料等条件比较高，往往适宜实际流域应用的能力不太理想。分布式时变增益水文模型的特色在于将集总的时变增益水文系统模型（TVGM）模拟通过 DEM 平台，并结合单元水文模拟，推广到分布式流域水循环模拟。它既有分布式水文概念性模拟的特征，同时又具有水文系统分析适应能力强的优点，能够在水文资料信息不完全或者有不稳定性干扰条件下完成分布式水文模拟与分析。DTVGM 的优势来源于以下几个方面：① 分布式模型 DTVGM 以 DEM 为基础，利用 DEM 模型，可以方便地提取出流域边界、河网等信息，从而实现汇流网格等级的划分，建立起网格单元与河道之间的联系，为模型的分级河道汇流提供了依据。② DTVGM 产流发生在分布的网格单元上，汇流包括坡面汇流过程和分级网格河道汇流过程。③ DTVGM 输入数据是分布式的，甚至有些水文参数也是分布式的，这样模拟的水文过程就能反映出各水文物理要素的时间、空间分布特性。当输入数据存在空间变异特性时，分布式模拟能够产生积极的响应，这一点是集总式模型

无法实现的。④ DTVGM 通过以土壤湿度（土壤含水量）为变量的时变增益因子控制地表水产流，体现了产流的非线性机制。⑤ 根据不同的流域下垫面特性、地形特性，DTVGM 模型能适当地耦合其他模块。DTVGM 是水文非线性系统方法与分布式水文模拟的一种结合，在潮白河流域的应用中该模型的效率系数高达 85%，峰现误差亦在允许误差范围内，基本上能满足水资源管理的要求。

2002 年，唐莉华<sup>[113]</sup>等提出了一个针对小流域的分布式水文模型，包括产汇流和产输沙模型。该模型包括了从降雨到流域出口径流过程的各子过程，主要过程用有限差和有限元求解。

张建云等<sup>[114]</sup>建立了参数网格化的分布式月径流模型，并应用模型进行了华北、江淮流域的水资源动态模拟评估，取得了不错的效果。

另外值得一提的是 SWAT 模型在中国的应用。SWAT 是一个具有物理机制的长时段的流域分布式水文模型。该模型亦适用于具有不同的土壤类型、不同的土地利用方式和管理条件下的复杂大流域，并能在资料缺乏的地区建模，在加拿大和北美寒区具有广泛的应用。它能够利用 GIS 和 RS 提供的空间数据信息，模拟复杂大流域中多种不同的水文物理过程，包括水、沙、化学物质和农药的输移与转化过程，还能够用来分析水土流失、非点源污染、进行农业管理等。夏军<sup>[108]</sup>等将 SWAT 模型成功地用于模拟马连河各子流域的月径流过程，基本可以满足水资源管理的需要。王中根、刘昌明<sup>[115]</sup>等曾探讨了 SWAT 模型的水文学原理和模型的基本结构与独特的分布式运行控制方式，并将其成功应用于西北寒区（黑河莺落峡以上流域）的分布式日径流过程的模拟。

## 五、分布式水文模型关键技术问题的研究

### 1. 流域离散化方法

集总式水文模型能够很好地模拟水文时间变化过程，但没有考虑水文变量和水文参数的空间变化与空间不均匀性。流域降水是分散地、不均匀地降落在流域地面上，各点产生的径流流至同一出口断面，它具有分散输入、集中输出的特点。分布式水文模型考虑了降雨的空间变化，并将流域离散成具有一定尺度的网格单元。用于分布式模型的离散方法很多，常用的有典型单元面积（REA）、水文响应单元法（HRU）、群体响应单元（GRU）法、聚合模拟单元（ASA）法。万洪涛<sup>[116]</sup>等讨论了河道汇流模型中常用到的有结构网格和无结构离散网格，并认为地理信息系统技术对计算域离散有辅助作用，有利于无结构离散网格的自动生成和交互修改，还可结合遥感技术，使水文模型能获取精确的空间分布的水文参数和水文变量。

### 2. 分布式水文模型参数网格化的技术途径

流域水文模型的参数一般由实测的模型输入输出变量系列（如降水、蒸散发、流量等）率定得到。张建云<sup>[115]</sup>等在研究气候异常对区域水资源的影响时，采用了 30km × 30km 网格大小的分布式水文模型进行模拟计算，如何模拟和评估不闭合或无资料地区和指定网格内的水资源量是研究的技术难点，因此，在分布式水文模型中，模型参数的网格化是关键技术。在研究中，首先在各流域选择若干有实测资料又有一定代表性的流域作为试验流域，率定各模型参数。然后再选用适当的方法进行参数移植，即将试验流域的模型

参数移植到各网格点上。张建云等主要介绍了以下两种模型参数网格化技术。

(1) 模型参数的区域分析法。利用地理信息系统, 根据各网格和试验流域的地理信息(土壤特性、植被、坡向、坡度等)和区域气候特性(干旱、湿润等)进行对比分析, 建立各网格模型参数与相似流域模型参数的函数关系, 然后进行模型参数的移植。例如, 在海河流域分布式水文模型研究中, 发现较灵敏的参数有两个: 蒸散发参数  $K$  和水源(地表水、壤中流和地下水等)划分参数  $SM$ 。研究表明,  $K$  值的大小主要取决于气候条件, 而  $SM$  则与网格内的岩性、土壤和植被等条件有密切关系。在试验流域, 应用参数区域分析法确定的模型参数的模拟效率系数 ( $R^2$ ) 均大于 80%, 与用水文资料率定的结果基本一致。这说明用土壤和岩性以及气候区域特性分析移植模型参数是可以满足精度要求的。

(2) 模型参数等值线插值分析法。对于有较好资料的地区, 如淮河干流分为 23 块率定了各块的模型参数, 汉江流域选择了 41 个子流域作为试验流域率定出模型参数。在整个流域上模型参数已有一定密度的分布, 可以绘制出模型参数的等值线图, 然后根据参数等值线图确定各网格上的参数值。

### 3. 遥感和地理信息系统在分布式流域水文模型研制中的应用<sup>[117-118]</sup>

作为一种信息源, 遥感技术可以提供土壤、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, 也可以测定估算蒸散发、土壤含水量和可能成为降雨的云中水汽含量。栅格式的遥感数据与分布式流域水文模型的数据格式有一致性, 给概念理解和使用上都带来了方便。以遥感为手段获取的上述信息在确定产汇流特性或模型参数时是十分有用的。在对遥感影像作校正、增强、滤波、监督或非监督分类以后, 可以转化为图形, 纳入到地理信息系统中去, 成为分布式流域水文模型建模与参数率定时的数据支持。

### 4. TOPMODEL 中地形指数的计算及应用研究

地形指数  $\ln(\alpha/\tan\beta)$  或土壤-地形指数  $\ln(\alpha/T_0\tan\beta)$  是 TOPMODEL 的最关键部分和模拟径流计算时最基本的输入资料。由于平坦区域中网格单元的坡角为  $0^\circ$ , 使得目前普遍使用的、直接利用数字高程模型计算地形指数或土壤-地形指数的单向流或多向流方法不能进行。孔凡哲、芮孝芳<sup>[119-120]</sup>等提出了一种简单的地形指数计算方法, 该方法分别提取数字高程模型网格单元的  $\alpha$  和  $\tan\beta$ , 对坡度为 0 的网格单元进行专门处理, 然后计算每一个网格单元的  $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 。该方法应用于沿渡河流域(位于长江上游, 流域面积  $601\text{km}^2$ ), 将计算的地形指数用于 TOPMODEL 进行洪水模拟计算, 其洪水模拟计算的精度与新安江模型基本相当, 但 TOPMODEL 中需率定的参数比新安江模型少。

刘青娥、夏军等<sup>[121-122]</sup>曾研究过 DEM 网格尺度对 TOPMODEL 中地形指数分布和径流模拟的影响, 并以潮河流域为例。结果表明, 随着网格增加, 地形指数高值的面积百分比增大。河道附近的地形指数越大越容易先达到饱和, 而这对径流模拟的主要影响是从 300m 网格之后湿润前期的流量模拟越来越精确。同一网格尺度下, 峰值模拟与模型效率相矛盾; 同一标准时, 500m 网格的模拟结果最佳。在 500m 网格最佳模型效率参数下, 粗化网格比细化网格得到更好的结果, 而在 500m 网格最佳洪峰模拟情况下, 结论却相反。由此, 他们建立的 TOPMODEL 模型采用 500m 的 DEM 网格, 并用来模拟潮河流域

降雨径流关系。

邓慧平<sup>[123]</sup>将 TOPMODEL 模型与 SCS 模型结合起来研究流域土地覆被变化的水文影响,并以长江源头区梭磨河流域为例进行了 40 年的模拟研究。在对流域地形平坦的高原地区饱和区作判断并进行修改后, TOPMODEL 模型可以运用于梭磨河流域并能取得较好的模拟结果。

郭方等<sup>[124]</sup>应用 TOPMODEL 模型对淮河流域史河水系的白河流域进行日径流模拟研究,并与新安江模型做了初步比较。结果表明,两者的预报精度差异很小, TOPMODEL 能达到日模型模拟精度要求。

## 六、分布式水文模型的发展前景

鉴于我们目前对气候系统,水文循环,地表过程,气圈和水圈相互作用的了解甚少,需要进一步分析模拟非均匀陆地表面水文过程,研制新一代水文物理模型,探讨不同时空尺度水文变量的相互转换,提供网格数值化的水文模拟预报结果。分布式流域水文物理模型的研究,涉及到水文、水资源、气象、气候、地理、地貌、土壤、植被、环境生态和社会经济等学科领域。陆地表面水文过程参数化,水文物理模型的研制和建立,不仅是一门边缘学科和交叉学科,也是水文科学发展的前沿课题。从 20 世纪 80 年代中期开始,西方发达国家在该领域已投入大量的人力和物力,开展许多基础性的探索工作,并取得一些重大的进展。美国水文科学国家委员会 1991 年强调<sup>[70]</sup>,当今水文科学研究的重点应放在下列五个方面:①水文循环的化学和生物分支;②不同水文尺度之间的相互转换;③陆地表面与大气之间的相互作用;④人类活动的水文效应;⑤水量和能量的全球尺度观测。上述这五个方面的内容都与水文模型有关。

分布式水文物理模型是当今国际水文科学研究的重点和前沿方向,其开发研究具有重要的理论价值和实用意义。从技术上讲,要构成分布式水文模型框架并不难,关键问题是如何进行水文单元的划分,参数的空间分布尺度如何确定、如何在模型中模拟产汇流机制和能否提出适用于实际流域的有效模拟算法,这些都是亟待解决的问题<sup>[85]</sup>。

一般而言,分布式降雨径流模型不仅能推求一个或多个站的流量,而且能推求如地表径流和地下径流的空间水文信息。但实际上,由于分布式降雨径流模型只拟合一个或多个站的水文过程而不是拟合不易得到的空间水文信息,因此要检验推求的空间信息的精度还有一定的困难。作为分布式流域水文物理模型的典型代表, SHE 模型已经提出了近 20 年,但它的应用范围还比较有限,主要是由于下列三个原因造成:

(1) 缺少资料:分布式水文物理模型的应用需要大量空间信息资料,包括地形、地貌、地质、土壤、植被、人类活动影响等。这些资料在一般流域或机构很难得到满足。

(2) 模型的科学性和技术水平:在流域水文模拟中,水流、输移和水质过程从小尺度到大尺度转化的问题,目前从科学上还没有完全解决好<sup>[125-133]</sup>。分布式水文物理模型的科学性和合理性还有待进一步完善。另外,现有模型使用不方便也是一个因素,模型的设计和研制者应尽快开发出用户友好的人机交互界面。

(3) 水文和水资源工程师的习惯和知识的局限性:分布式流域水文物理模型(如 SHE)同概念性和系统模型相比,其结构和解法要复杂得多,许多水文工作者和工程师对



它了解不深，这样一来也就限制了它的推广应用。

尽管目前分布式水文物理模型还有一些不足和不完善的地方，推广应用还有许多困难。但随着计算机技术，空间技术，遥感遥测技术，地理信息系统等技术飞速发展，必将大大促进和推动分布式水文物理模型的研究和应用。国际上近年开展的一些重大研究课题，如世界气候计划中的 GEWEX，国际地圈和生物圈中的 BAHC 项目，我国国家自然科学基金，国家重点基础研究规划“973”项目，也都在鼓励和支持该领域的研究，尽管难度很大，但发展前景十分光明。分布式流域水文物理模型的研制，对推动我国水文水资源科学事业的发展，提高水文模拟预报精度、探讨水资源演化规律和可持续利用，均具有重大的理论价值和现实意义。

## 第二节 目的和全书结构

该书主要目的是系统介绍国外，特别是欧洲发达国家的重要或有特色代表性的分布式水文模型。全书共分十一章。每章主要内容简介如下。

第一章是“绪论”。该章对流域水文模型的发展历史进行了回顾，总结分布式流域水文模型的国内外研究现状和进展，探讨分布式流域水文模型在实践中的应用和未来的发展前景。

第二章是“水文时空变化过程模拟基础”。本章简要介绍了模拟水文循环中最主要的几个物理过程（降雨、下渗、蒸发、流域汇流以及河道洪水运动）的一些基本概念和方法。主要内容有降雨空间分析的各种插值方法（例如克里金插值方法）、地下水运动的基本方程、不同假设条件下的下渗公式、各种下垫面条件下（水面、土壤及流域）的蒸发公式、流域汇流的纳西单位线和地貌瞬时单位线、河道洪水演算的一维圣维南方程组和马斯京根法。

第三章是“数字高程模型与地貌指数”。这一章重点介绍几个重要的流域地貌指数，包括地表坡度、流量分配系数、单宽集水面积、集水面积以及湿度指数，解释它们的计算方法，探索它们所代表的水文物理意义，以及分析它们反映流域水文状态变量空间分布的能力。另外还介绍了根据数字高程模型来提取流域河网水系的一种最常用的方法，即“集水面积方法”。

第四章是“TOPMODEL”。这一章的主要内容是 TOPMODEL 的介绍、应用和改进。该模型结构简单，优选参数少，物理概念明确，在集总式和分布式流域水文模型之间起到了一个承上启下的作用。在对 TOPMODEL 进行了详细的介绍和推导的基础上，比较该模型在各种流域和气候条件下对降雨-径流关系模拟的能力，并对该模型中土壤导水率与缺水深函数关系进行了理论探讨和实际检验。

第五章是“基于 DEM 的流域等流时线和分布式水文模型”。这一章详细讨论了根据数字高程模型（DEM）推导等流时线的方法，并举例说明。该方法能够充分考虑汇流流速的空间变异性，操作自动化程度高。另外提出一个基于 DEM 的分布式水文模型，主要用来模拟蓄满产流机制。如同新安江模型一样，采用土壤蓄水能力作为模型参数来反映流域土壤特性，并假设各点的土壤蓄水能力和对应的湿度指数有关，由此来描述土壤蓄水能力