

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)系列专著

# 流域水循环分布式模拟

刘昌明 郑红星 王中根 等著



黄河水利出版社

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)系列专著

# 流域水循环分布式模拟

刘昌明 郑红星 王中根 等著

黄河水利出版社

## 内 容 提 要

本书是国家重点基础研究发展规划项目(“973”,G19990436)的研究成果之一,主要内容是分布式水文模型系统的研发与集成。全书共分10章。第一章介绍了分布式水文模型的基本概念和国内外研究进展;第二章探讨了分布式水文模型的理论基础;第三章阐述了分布式水文模型的相关支撑技术;第四章介绍了自主开发的流域分布式水文模拟系统HIMS的结构和功能;第五章至第七章介绍了自主开发的三种时空尺度的分布式水文模型;第八章和第九章介绍了国外分布式水文模型在黄河流域的应用;第十章对分布式水文模型的研究进行了总结,分析了分布式水文模型存在的问题及其发展前景。

本书重在理论研究与应用实践的结合,在流域水循环分布式模拟研究方面,具有很好的指导和示范作用,可供水利工程、环境工程、地质工程、地球科学等专业的科技工作者参考,也可作为相关专业教师、研究生、本科生的辅助教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

流域水循环分布式模拟/刘昌明等著. —郑州:黄河水利出版社,2006.7

ISBN 7-80734-086-X

I. 流… II. 刘… III. 水循环—流域模型—研究  
IV. P339

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第059031号

策划编辑:岳德军 13838122133

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路11号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940

传真:0371-66022620

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:12.875

字数:297千字

印数:1—1 500

版次:2006年7月第1版

印次:2006年7月第1次印刷

---

书号:ISBN 7-80734-086-X/P·61

定价:35.00元

# 前言

气候变化、人类活动、土地利用及覆被变化下的流域水文循环过程的研究是当前水科学研究的重要内容之一。国家重点基础研究发展规划项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”(简称黄河“973”项目,G19990436)正是在这样的背景下,以黄河流域为平台,以水资源为核心的一项综合性研究项目。流域水循环过程模拟是黄河“973”项目的重要组成部分,是深入认识黄河流域水循环过程的工具和推动力,同时也是解决黄河水问题重要的技术支撑。

黄河流域面积约 75.2 万  $\text{km}^2$  (如包括鄂尔多斯内陆区,则约 80 万  $\text{km}^2$ ),地处干旱、半干旱与半湿润过渡地区。受大气环流,特别是季风环流的影响,各地区气候差异很大。流域多年平均降水量时空分布极其不均,总的趋势是由西北向东南递增,每年 6~9 月是降水季节,降水总量占全年的 75%。从地形上看,黄河从青藏高原到渤海,流经三个台阶,土壤与土地覆盖及土地利用类型等下垫面条件的分布也极其不均。考虑到黄河流域水文要素的空间变异性,为适应同时结合当前水文模拟的发展态势,我们从不同时空尺度,针对不同的应用目标开展了探索性的研究。经过初步研究,分别面向洪水预报、水资源评价与调度及管理、气候变化与土地利用的影响等三个层次的目标,提出了次降水径流过程、日水文过程、月/年水文过程等三个不同尺度的分布式水文模型。

应当指出的是,分布式水文模型的概念在提出后相当长的一段时间内发展缓慢,这主要是由于分布式模拟需要大量的数据支持以及较大的运算量。“3S”技术、空间技术、信息技术等高新技术的发展和成熟为分布式水文模型的研究提供了条件与技术支撑。基于此,黄河“973”项目研究提出了一个以数据库为基础、以 GIS/RS 为技术支撑、集成资源管理与决策功能为一体的、具有专业扩展性和广泛模拟能力的模块化结构的分布式水文模拟系统。该系统作为一个可扩展的平台,将逐步集成各类时空尺度下的分布式水文模型和其他功能模块的应用。

洪水是黄河流域的心腹之患。分布式次降水径流模型的设计针对次洪水过程的特点,以小时为步长,在栅格 DEM 的基础上生成数字流域,并构建了单元网格模型、河网汇流模型、水库调蓄模型,适用于半湿润半干旱、人类活动相对较少的山坡流域,为半物理结构的模型。模型的显著特点是充分利用了 GIS 技术,并将之与遥感和 DEM 紧密耦合。模型在黄河流域洛河卢氏以上流域得到比较成功的应用。

由于黄河流域下垫面和气象因素显著的空间变异性,需要分布式日过程水文模型的支持,以对流域水资源进行统筹规划与管理。为此,构建了以水文物理概念为基础的分布式水文模型。模型基于 DEM,将流域分成若干子流域,在子流域上建立物理概念模型,产流计算考虑地形坡度影响和变源面积规律,采用地形指数计算方法,汇流演算基于河网拓扑关系,采用分段马斯京根方法。模型已在黄河中游泾河流域进行了初步应用,具有较好的模拟精度,能够满足水资源管理的需要。

为考察气候变化及人类活动等因素对黄河流域水循环的影响,还构建了基于系统理论的月尺度分布式水文模型。它既具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,是水文非线性系统方法与空间分布式模拟的一种结合。依据这种思路发展的分布式时变增益模型(Distributed Time Variant Gain Model,DTVGM)通过 DEM 网格化和气候—水文变量的空间数据处理,描述流域降水、气温、蒸散发和不同土地利用条件下产汇流的空间分布变化;通过土壤湿度这一物理量的变化将水循环中的产汇流过程联系在一起,实现了基于网格和河网的流域分布式产汇流模拟。在对全黄河流域的模拟中,表明该模型能够对分布式空间降水输入产生确切的响应。

此外,在黄河流域水循环分布式模拟的研究中,我们还探讨了日本 Ma 和 Fukushima 等人提出的 SVAT & HYCY 模型以及美国的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool),借鉴并积累了一些模型构建和应用方面的经验。这些经验对我们自主开发适合于黄河流域的分布式水文模型提供了有益的帮助和借鉴。

本书试图通过相关模型的综合分析,让读者对分布式水文模型的研究现状有一个更全面和完整的认识。全书共分 10 章。第一章简要介绍分布式水文模型的基本概念以及国内外研究进展;第二章重点讨论分布式水文模型的理论基础;第三章阐述了分布式水文模型的输入和参数的获取手段及方法;第四章结合黄河“973”项目的研究成果,详细探讨了流域分布式水文模拟系统(Hydro-Informatics Modeling System, HIMS)的结构和功能;第五章至第七章从理论和实践相结合的角度,分别介绍了自主开发的、针对不同目标、适用于不同尺度的分布式水文模型;第八章和第九章是对国外的分布式水文模型 SWAT 和 SVAT & HYCY 模型在黄河流域的应用介绍;第十章对分布式水文模型的研究进行了总结,提出了几个方面的认识,并探讨了未来分布式水文模型的发展前景,包括水量、水质评价、非点源污染、水土流失、生态水文效应等的研究。本书各章节的撰稿人分别为:

| 章 节 | 标 题                | 撰 稿 人           |
|-----|--------------------|-----------------|
| 前 言 |                    | 刘昌明 郑红星         |
| 第一章 | 绪论                 | 郑红星 王中根 刘昌明     |
| 第二章 | 流域分布式水文模型理论基础      | 郑红星 王中根 刘昌明     |
| 第三章 | 分布式水文模拟的技术支撑       | 郑红星 王中根 杨胜天 牛存稳 |
| 第四章 | 流域分布式水文模拟系统        | 郑红星 王中根 王纲胜 叶爱中 |
| 第五章 | 分布式暴雨洪水模型及其应用      | 吴险峰 刘昌明         |
| 第六章 | 流域日水文过程分布式模拟       | 王中根 郑红星 刘昌明     |
| 第七章 | 分布式时变增益模型及其应用      | 夏 军 王纲胜 叶爱中     |
| 第八章 | SWAT 模型在黄河流域的应用    | 王中根 郝芳华 刘昌明     |
| 第九章 | SVAT & HYCY 模型及其应用 | 郑红星 马燮铤 王中根 吴险峰 |
| 第十章 | 流域分布式水文模型的发展趋势     | 刘昌明 郑红星         |
| 附 录 | 分布式水文模型:神话还是现实?    | 郑红星(编译)         |

全书由刘昌明、郑红星、王中根统稿。

总之,我们期望通过黄河流域分布式水文模拟的研究,促进我国流域水文水资源研究与量化手段的提高,发现和逐步解决科学领域和生产实际中面临的问题与新的挑战。限于时间和水平,本书错漏之处在所难免,请读者批评指正。

作 者  
2005 年 12 月

# 目 录

## 前 言

|                        |      |
|------------------------|------|
| 第一章 绪 论                | (1)  |
| 第一节 流域水文循环过程           | (1)  |
| 第二节 流域水文循环的数学模拟        | (3)  |
| 第三节 分布式水文模型研究进展        | (7)  |
| 第二章 流域分布式水文模型理论基础      | (10) |
| 第一节 水文模拟中的尺度问题         | (10) |
| 第二节 空间异质性与空间离散         | (12) |
| 第三节 分布式水文模型建模范式        | (16) |
| 第四节 典型的分布式水文模型         | (20) |
| 第三章 分布式水文模拟的技术支撑       | (25) |
| 第一节 GIS 与分布式水文模型       | (25) |
| 第二节 遥感与分布式水文模拟         | (28) |
| 第三节 基于 DEM 的流域特征信息提取   | (30) |
| 第四节 水文信息空间插值           | (35) |
| 第四章 流域分布式水文模拟系统        | (40) |
| 第一节 HIMS 系统的总体设计       | (40) |
| 第二节 基于组建式 GIS 的水循环信息系统 | (42) |
| 第三节 HIMS 水文函数库的构造      | (47) |
| 第四节 HIMS 水文模型系统的建立     | (50) |
| 第五章 分布式暴雨洪水模型及其应用      | (56) |
| 第一节 单元产流模型             | (56) |
| 第二节 汇流模型               | (62) |
| 第三节 水库调蓄模型             | (69) |
| 第四节 黄河小花间产汇流特性分析       | (70) |
| 第五节 黄河小花间暴雨洪水过程分布式模拟   | (73) |
| 第六章 流域日水文过程分布式模拟       | (79) |
| 第一节 模型原理与主结构           | (79) |
| 第二节 单元水文模型             | (80) |
| 第三节 河网汇流演算             | (84) |
| 第四节 模型的运行控制            | (85) |
| 第五节 实例应用研究             | (86) |

|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| <b>第七章 分布式时变增益模型及其应用</b>          | (94)  |
| 第一节 水文非线性系统模型                     | (94)  |
| 第二节 分布式时变增益模型                     | (95)  |
| 第三节 黄河流域月水文过程模拟                   | (101) |
| <b>第八章 SWAT 模型在黄河流域的应用</b>        | (116) |
| 第一节 SWAT 的基本原理                    | (116) |
| 第二节 SWAT 的结构与控制                   | (120) |
| 第三节 SWAT 的主要子模型                   | (121) |
| 第四节 SWAT 模型的应用研究                  | (132) |
| <b>第九章 SVAT &amp; HYCY 模型及其应用</b> | (152) |
| 第一节 大气—陆面交互作用一维模型                 | (152) |
| 第二节 流域产汇流模型                       | (157) |
| 第三节 SVAT & HYCY 模型的应用             | (159) |
| <b>第十章 流域分布式水文模型的发展趋势</b>         | (164) |
| 第一节 分布式水文模拟的难题与局限                 | (164) |
| 第二节 分布式水文模型发展趋势                   | (166) |
| <b>附 录 分布式水文模型：神话还是现实？</b>        | (169) |
| <b>参考文献</b>                       | (173) |
| <b>附 图</b>                        | (185) |



# 第一章 绪 论

## 第一节 流域水文循环过程

自然界的水循环是连接大气圈、水圈、岩石圈和生物圈的纽带,是自然环境中发展演变最活跃的因素。在整个水循环运动中,流域尺度的水文循环过程更是与人类的生存和发展息息相关。由于受到气象因素(如降水、辐射、蒸发等)、下垫面因素(如地形、地貌、土壤、植被等)以及人类活动(如土地利用、水利工程等)的强烈影响,流域水文循环过程也变得极其复杂。

### 一、水文循环的基本过程

水文循环是指地球上各种形态的水,在太阳辐射、地心引力等作用下,通过蒸发、水汽输送、凝结降水、下渗以及径流等环节,不断地发生相态转换和周而复始运动的过程。从全球整体角度来说,这个循环过程可以设想从海洋的蒸发开始,蒸发的水汽升入空中,并被气流输送至各地,大部分留在海洋上空,少部分深入内陆。在适当条件下,这些水汽凝结,发生降水。其中海面上的降水直接回归海洋,降落到陆地表面的雨雪,除重新蒸发升入空气中的水汽外,一部分成为地面径流补给江河、湖泊,另一部分渗入岩土层中,转化为壤中流与地下径流。地面径流、壤中流与地下径流,最后流入海洋,构成全球性统一、连续有序的巨大动态系统。

陆地表层系统中的水循环包含大气降水在地表系统(Land System)、次地表系统(Subsurface System)和土壤与含水层系统(Aquifer System)中的循环运动(如图 1-1 所示)。常年河流中的径流即来自这 3 个子系统。在地表系统中,降水、地表径流、下渗、土壤水、蒸散发是产流和水分损失的决定性环节。地表系统还可以进一步划分为 3 个子系统,即植被子系统(Vegetation Subsystem)、人工建筑子系统(Structural Subsystem)、土壤子系统(Soil Subsystem)。这些系统相应于截留、填洼和滞蓄等损失。这些损失则成为大气系统或地下系统的水分来源。

水文循环包含降水、径流、下渗、蒸发等环节,伴随着水量的转化和物质及能量的交换,是一个非常复杂的过程(刘昌明等,1988)。水文循环是联系地球系统地圈—生物圈—大气圈的纽带,是全球变化三大主题——碳循环、水资源和食物纤维的核心问题之一(夏军,2002),它受自然变化和人类活动的影响,决定水资源形成与演变的规律。

从全球的角度看,水分在地球上环绕分布构成水圈,因热力状况不同,水圈中的水可以为气态、液态或固态。海洋是液态水的主要载体,而陆地上液态水有地表水(包括江河、湖水与水库蓄水)、土壤水和地下水。在热力、地心吸引力等多种外力的作用下,水不断地运动并进行三态的交替变化,各水体相互转化和不断更新,并通过全球水循环联系起

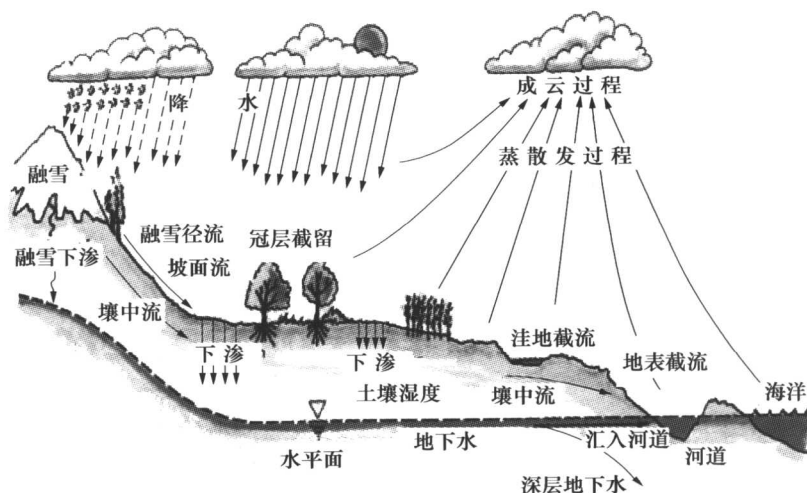


图 1-1 陆地水循环系统示意图

来。受质量守恒定律支配,水循环运动保持着连续性。按系统分析,水循环的每一环节都是系统的组成部分,也是一个子系统(Subsystem)。各个子系统之间互相联系,这种联系是通过一系列的输入与输出实现的。例如,大气子系统的输出——降水,是陆地流域子系统的输入;陆地流域子系统又通过其输出——径流,成为海洋子系统的输入,等等。在全球的尺度上,水循环是一个闭合的系统。但是,就区域的角度看,水循环则是多个环节有机耦合并外部开放的巨系统。从大气到地下水层的耦合关系如表 1-1 所示。

表 1-1 水循环系统开放耦合关系

| 系统       | 系统输入                                          | 系统输出                                                                                                | 蓄变量                                           |
|----------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 大气       | $(A_i + E)_t$<br>$A_i = A_1 + A_2$            | $(P + A_0)_t$<br>$A_0 = A_3 + A_4$                                                                  | $\Delta A = \Delta A_t + \Delta A_{t0}$       |
| 地面       | $(P + I_n + I_g)$                             | $(R + E + O_s + O_g)_t$<br>$R = R_s - R_g$ ;<br>$R_g = R_{g1} + R_{g2} + R_{g3}$<br>$E = E_s + E_v$ | $\Delta W = \Delta W_s - \Delta W_{t0}$       |
| 土壤(通气带)  | $(M + I_0 + C_u + C_m)_t$<br>$M = P - R_n$    | $(E_v + E_s + E_w + P_g + O_0)_t$                                                                   | $\Delta W_s = \Delta W_s - \Delta W_{s0}$     |
| 地下水(饱和带) | $(P_g + r_s + d_s + J_s + m_s + i_s + a_s)_t$ | $(E_w + r_d + m_d + a_d)$                                                                           | $\Delta W_g = \Delta W_{gt} - \Delta W_{gt0}$ |

表 1-1 中: $A_i$  为水汽输入( $A_1 + A_2$ ); $A_0$  为水汽输出( $A_3 + A_4$ ); $E$  为总蒸发; $P$  为降水; $\Delta A$  为大气水汽蓄变量; $I_n$  与  $I_g$  为区外地表水与地下水入流; $R$  为区内径流,为地

表水径流与地下水径流之和,其中地下水径流又包括土壤径流( $R_{g1}$ )与地下径流( $R_{g2}$ ); $E_s$  为土壤蒸发; $E_v$  为植被蒸腾; $E_w$  为地下水上升蒸发; $\Delta W$  为地表水蓄变量,为时段始( $t_0$ )末( $t$ )的蓄水量之差; $M$  为土壤入渗; $I_0$  为壤中入流; $C_m$  为土壤凝结水; $C_u$  为地下水上升; $P_g$  为通过土壤渗入地下水的降水补给; $O_0$  为壤中出流; $\Delta W_s$  为土壤水蓄变量; $r_s$  为河渠水的渗入; $d_s$  为地表蓄水渗漏; $J_s$  为区外水侧渗; $m_s$  为越流补给; $i_s$  为灌溉回归水; $a_s$  为区外含水层流入; $E_v$  为地下水上升与抽水排泄; $r_d$  为地下水河道排泄, $r_d$  与  $R_{g2}$  相当; $m_d$  为越流排泄; $a_d$  为地下出流,不含  $R_{g2}$ ;  $\Delta W_g$  为地下水蓄变量。

## 二、流域水文循环

由图 1-1 可以看出,流域尺度的水循环过程是水循环研究一个重要的支撑点。基于流域的水循环研究作为流域水资源综合利用、集成管理的基本依据,不仅具有重要的实践意义,而且从科学研究的角度讲,它是从宏观全球尺度向微观局地尺度的过渡,是连接微观研究和宏观研究的重要纽带,也是尺度化过程(包括 Upscaling 和 Downscaling)的焦点。

流域水循环,作为水循环在特定空间范围内的一种具体实现,是由一系列微观尺度的水循环过程嵌套而成的。同时,作为陆地水循环和全球水循环的一个组成部分,流域水循环及其演变过程又受控于全球水循环的一般形势。受特定的地理空间位置和范围的影响,不同的流域其水循环过程和特征各不相同。但是,就流域水循环的结构看,则大多表现为一个多层嵌套的级联系统。总体上看,流域水循环包括降水、蒸发、下渗以及从上游到下游的产、汇流过程。但对流域的局部地区(如支流或蓄水体)而言,同时也是一个包含上述各水循环过程的开放系统。

## 第二节 流域水文循环的数学模拟

水文循环是一个高度复杂的非线性系统。水文模型则是描述水文循环的有效手段。在现代计算机出现之前的 100 多年里,人们用物理模型来了解水文过程,1856 年 Darcy 所做的砂柱试验就是一个很好的例子。目前该试验技术还经常被应用于工程实际和课堂教学,但其在模拟水文复杂系统时存在局限性。模拟模型利用数学相似性模拟水文过程,在坝、渠水的渗漏及地下含水层水文地质条件的模拟方面是个强有力的手段。随着科学技术的发展,数学模型发展最快,应用最广。

### 一、流域水文模型的发展历程

流域水文模型亦属于数学模型,它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。流域水文模拟可以追溯到 1932 年谢尔曼(Sherman)的单位线(unit hydrograph)以及 1933 年霍顿(Horton)的入渗理论,更早期则可以认为是源于 1858 年 Mulvany 发展的水文计算方法。1948 年,彭曼(Penman)提出了蒸发理论。在经历了相对

平静的二三十年降水—径流模型的研究之后,20 世纪 50 年代中期掀起了一个水文模型研究的浪潮。这一阶段的水文模型主要应用线性系统理论,并以最终推导出普适的单位线理论而达到顶点。此后,直到 50 年代末,大部分模型都只对水文循环过程中的单一要素进行模拟。

20 世纪 60 年代的数字化革命使对全流域水文循环过程的多要素模拟成为可能。1966 年由 Crawford 和 Linsley 合作开发的斯坦福模型(Stanford Watershed Model, SWM, 即目前的 HSPF)可作为这一时期水文模型的代表。这基本上是第一次模拟整个水文过程的尝试。数字革命同时催生了两项技术:数值模拟和随机模拟。在随后的 30 多年里,随着计算机技术的飞速发展,流域水文模拟获得了前所未有的发展。20 世纪 70~80 年代是流域水文模型蓬勃发展时期,提出了一些比较著名的模型,如新安江模型、Sacramento 模型、Tank 模型、HEC-1 模型、SCS 模型、API 连续演算流域水文模型等。这一时期许多代表性的水文模型不仅用于模拟流域水文过程,同时还应用在环境和生态管理等领域。80 年代后期,传统流域水文模型(集总式)发展缓慢,几乎没有什么突破性的进展。新模型的开发以及原有模型的改进是持续到今天的研究课题。

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,因此它是一种输入具有分散性、输出具有集总性的模型,传统水文模型在结构上一般与此并不匹配。由于传统的流域水文模型本身所具有的局限性,同时随着水文循环中各个组成要素的深入研究,以及计算机、地理信息系统(GIS)、数字高程模型(DEM)和遥感技术的迅速发展,使构造具有一定物理基础的流域分布式水文模型(数字水文模型)成为可能。另一方面,数值模拟和随机模拟的发展使水文模型增加了更多的物理、数学以及统计等方面的内容,并因此产生了更大的数据需求。在这一发展趋势下,数据获取技术,特别是遥感(卫星和雷达)的研究开始并将继续受到关注。大量的数据需求也使得数据库技术和地理信息系统技术成为模型研究的一个重要组成部分(Singh and Fiorentino, 1996)。

在 2002 年国际水文科学协会(IAHS)启动的新国际水文十年计划“缺资料地区水文预报”(Predictions in Ungauged Basins, PUB),是 IAHS 在本世纪启动的第一个重大科学计划。该计划旨在以 PUB 这个重大的水文问题为依托,在探索解决该问题的新路子的同时,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的需要。分布式水文模型的研究将面临在缺资料地区的应用。2003 年世界四大计划 ESSP 启动了全球水系统计划(Global Water System Project, GWSP),旨在重点研究人类活动对水系统的影响,为分布式水文模型的研究提供一个巨大的舞台,大大扩展并促进其研究进展。

## 二、流域水文模型的类型

由于流域水文循环过程极其复杂,在水文研究中通常建立水文模型对复杂水文现象进行抽象和概化。目前,水文模型的种类繁多,按模型的性质和建模技术可分为实体模型(如比例尺模型)、类比模型(如用电流欧姆定律类比渗流达西定律的模型)和数学模拟模型,如图 1-2 所示。其中数学模拟模型是人们最常用的一类水文模型。流域水文(数学)模型是运用数学语言和方式描述水文原型的主要特征关系和过程。其中,描述水文现象

必然性规律的模型称为确定性模型,确定性模型的因果关系是惟一、完全对应的。相反,描述水文现象偶然性(随机性)规律的模型称为随机性模型,在一组已知的不变条件下,每次产生的水文现象可能都是不同的,没有惟一的因果对应关系,对这种不确定事件只能做出概率预告。

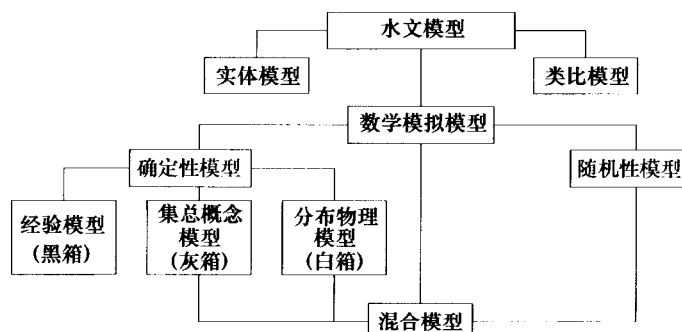


图 1-2 水文模型分类

确定性的水文数学模型又分为以下三种:

(1)数学物理模型。它是以数学物理方法对水文现象进行模拟的模型。它是依据物理学质量、动量与能量守恒定律以及流域产汇流的特性推导出来的描述地表径流和地下径流的微分方程组。这些方程能表现径流在时空上的变化,也能处理随时空变化的降水输入的偏微分方程组。由于流域下垫面情况非常复杂,产流与汇流交织发生,目前建立这样复杂系统的水文数学物理方程还处于探索阶段,具有物理基础的分布式水文模型即属于此类模型。

(2)概念性模型。它是以水文现象的物理概念作为基础进行模拟的,它利用一些简单的物理概念(如下渗曲线、蓄水曲线等)或有物理意义的结构单元(如线性水库、线性渠道等)对复杂的水文现象进行概化,然后建立水文模型。概念性模型可以模拟水循环的整个系统(如流域水文模型),也可以模拟水循环的某个环节(如产流模型、汇流模型、蒸散发模型、土壤水模型、地下水模型等)。

(3)系统理论模型。又叫系统响应模型,是一种具有统计性质的时间序列回归模型,属于确定性模型。它建立在系统输入—输出关系之上,核心问题是通过“系统识别”求出一个脉冲响应函数。“系统识别”常用的方法是最小二乘法。系统响应模型又有线性和非线性之分,以及时变和时不变之分。

微观尺度水文问题与物理学研究对象一致,故多采用非线性水动力学数学物理方法描述。由于数学物理方程的非线性和实际中确定边界条件与初始条件的困难,因此在系统描述模拟中面临很多的问题。概念性水文模型(如斯坦福模型、萨克门托模型、新安江模型等)属于“灰箱”的分析范畴,它将流域内的结构设想为有水文逻辑关系的元素排列,其中各元素有一定的物理概念(或经验关系)。概念性模型可以对系统内部机制作出部分描述或解释,因而易被水文工作者接受。系统理论模型在方法论上属于“黑箱”范畴,其特点是直接描述系统“输入—结构(或状态)—输出”之间的因果关系。模型结构和参数依据原型的观测信息通过“系统识别”来确定,不受验前假定的限制,可避开许多复杂中间环节

构想,有适应环境变化、便于使用等优点,因而在流域洪水特性分析、实时洪水预报等方面应用较多。系统理论模型在应用上最适用于一些复杂系统,即内部结构不便直接观测,水文中间环节信息较贫乏(物理机制不太清楚),但可以从系统的输入与输出信息去认识系统。系统方法的应用归结如表 1-2 所示。

表 1-2 系统方法的应用

| 应用 | 系统输入 | 系统结构 | 系统输出 | 说明   |
|----|------|------|------|------|
| 鉴别 | 已知   | 未知   | 已知   | 识别功能 |
| 预测 | 已知   | 已知   | 未知   | 结果   |
| 评价 | 未知   | 已知   | 已知   | 输入影响 |

另外,水文模型按所研究的对象又可分为水质模型和径流模型(包括地表径流模型和地下径流模型);按所涉及的范围又可分为全球水文气象模型、流域(或地区)水文模型和单株植物的蒸散发模型等;按模型的功能又分为描述型水文模型和预测型水文模型。描述型水文模型用来增强对流域系统行为的理解,主要包括动力波模型、径流产生机制模型和物理分布模型;预测型水文模型用来解决工程上的实际问题,主要包括用系统工程方法建立的模型、用显性土壤水分计算方法建立的模型和应用实时预报技术建立的模型。

三、集总式水文模型

集总式水文模型是忽略了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而建立的模型。传统流域水文模型大多数是集总式概念性模型,在许多环节上主要采用概念性元素的模拟或经验函数关系的描述。例如,使用简单的下渗经验公式、带有经验统计性的流域蓄水曲线或具有底孔和不同位置侧孔的水箱等来模拟产流过程;采用面积时间曲线、线性或非线性“水库”、线性或非线性“渠道”,以及它们的不同组合形式来模拟汇流过程。这样的模拟往往只涉及现象的表面而不涉及现象的本质或物理机制,因此传统流域水文模型中的许多参数都缺乏明确的物理意义,只能依据实测降水和径流资料来反求参数的值,而这样求得的模型参数必然带有经验统计性,只能反映有关影响因素对流域径流形成过程的平均作用。这是传统流域水文模型拟合一组资料中的大部分,虽可达到令人满意的程度,但对该组资料中的特殊情况,或者另外一些资料却不一定能获得令人满意的拟合结果的症结所在。

四、分布式水文模型

考虑水源或来水(产汇流)的空间变异的水文模拟,分布式水文模型按流域各处土壤、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,在每一个单元上以一组参数(坡面面积、比降、汇流时间等)表示该部分流域的各种自然地理特征,然后通过径流演算而得到全流域的总输出。

严格意义上的分布式模型应是以物理过程为基础,以一组偏微分方程加以表述的模型。但是,在当前的条件下,特别是对于大、中流域,由于数据和计算能力的限制,大部分

的分布式模型只能采用概念性模型的方法,只是模型的参数是分布式的。从分布式水文模型的研究来看,一般是在集总模型的基础上尽可能考虑空间变异性,将集总模型的产流机制直接或者间接地应用到子流域(水文单元)上,通过建立子流域之间的水力联系(汇流网络)来实现分布式汇流过程,分布式新安江模型就是一个成功的发展实例。因此,一定程度上可以说大部分的集总式模型都可以转变为分布式模型或半分布式模型。这种转变的关键并不在于模型的结构本身,更重要的是在于模型的运行方式。简而言之,对于一个流域而言,在离散的每一个子流域上,假定各种水循环影响要素在空间上是相对均匀的,都可以应用集总的方式进行模拟。从某种意义上来说,许多分布式模型是传统模型与空间分布信息的结合,是对传统集总模型的必然发展。因此,小流域集总参数作为大、中流域子流域,属于一种广义的分布式模型。

### 第三节 分布式水文模型研究进展

在 20 世纪 70、80 年代,由于受计算条件、数据观测与采集手段的限制,分布式水文模型发展比较缓慢,远远落后于同时期的集总式水文模型。同集总式水文模型相比,分布式水文模型“拟合的情况并不特别好,也不特别差,这大概便是这类复杂的理论模型用于资料有限、率定过程存在不确定性且情况复杂的流域中所能期待的结果”(Freeze, 1969)。进入 20 世纪 90 年代以后,集总式水文模型由于自身的局限性,几乎处于停滞状态。随着计算机技术、GIS 技术、RS 技术、信息技术和通信技术的发展和普及,获取和描述流域下垫面空间分布信息的技术日臻完善,水文模拟技术发生了巨大的变革,因此,分布式水文模型也获得了长足发展。而此时分布式水文模型的一个显著特点是同 DEM 相结合,这种基于 DEM 的分布式水文模型也被称做数字水文模型,是数字化时代的产物。基于 DEM 的分布式水文模型融合了传统水文学、信息技术以及其他相关学科的研究成果,已经成为现代水文模拟技术研究的热点,代表了水文模型的最新发展方向。当前国际上提出的分布式水文模型比较多,常见的分布式水文模型主要有 SHE 模型、TOPMODEL 模型、SWAT 模型等,前者尚只限于较小的流域,后两者则已应用到大、中流域。

#### 一、国外分布式水文模型研究进展

自 1969 年 Freeze 和 Harlan 第一次提出了关于分布式水文模型的概念以来,分布式水文模型逐渐得到重视和发展。1975 年, Hewlett 和 Troenale 提出了森林流域的变源面积模拟模型。在该模型中,地下径流被分层模拟,在坡面上的地表径流被分块模拟。1979 年, Beven 和 Kirbby 提出了以变源产流为基础的 TOPMODEL 模型。该模型基于 DEM 推求地形指数( $\ln(\alpha/\tan\beta)$ ),并利用地形指数来反映下垫面的空间变化对流域水文循环过程的影响,模型的参数具有一定的物理意义,能用于无资料流域的产汇流计算。但是, TOPMODEL 模型主要利用了 DEM 推求地形指数的空间变化,对水文过程而言,仍然假定降水在空间分布上是均匀的,利用平均降水推求径流过程。因此, TOPMODEL 模型是不完全的分布式水文模型,其改进和应用是当前水文模拟研究较多的内容。

20 世纪 80 年代,由丹麦、法国及英国的三个机构提出的 SHE 模型被公认为是最早

的分布式水文模型的代表之一。SHE 模型考虑了截留、下渗、土壤蓄水量、蒸散发、地表径流、壤中流、地下径流、融雪径流等水文过程。流域参数、降水及水文响应的空间分布,垂直方向用层表示,水平方向用方形网格表示。该模型的主要水文过程可由质量、动量和能量守恒偏微分方程的有限差分表示,也可由经验方程表示。模型有 18 个参数,具有较强的物理意义,可由流域特征和水文试验过程确定。SHE 模型在欧洲和其他地区得到了应用和验证。但是,由于 SHE 模型是以精细物理基础为内容的水文模拟计算,需要大量的数据来率定众多的水文参数,实际在水文流域应用面临许多资料缺乏和不确定性方面的困难,因此其应用研究还较为有限,通常也只应用在较小的流域上。

除上述两类模型外,还有一些考虑流域空间特性、输入/输出空间变化的分布式物理模型,如 CEQUEAU 模型。该模型将流域分为方形网格,输入所有网格的地形、地貌、雨量等特征,对每一个网格进行计算,适用于水质模拟、防洪、水库设计等诸多方面。Susa 流域模型强调地表水和地下水的合成,在模拟径流的同时,还可以用于预测土地利用的水文效应。1980 年,英国的 Morris 进行了 IHDM(Institute of Hydrology Distributed Model)的研究,根据流域坡面的地形特征,将流域划分成若干部分,每一部分包含有坡面流单元、一维明渠段以及二维(在垂面上)表层流及壤中流区域。1994 年,Jeff Arnold 为美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)开发了 SWAT 模型,它能够利用 GIS 和 RS 提供的空间信息模拟复杂大流域中多种不同的水文物理过程。模型可采用多种方法将流域离散化(一般基于栅格 DEM),能够反映降水、蒸发等气候因素和下垫面因素的空间变化,以及人类活动对流域水文循环的影响。1995 年,Grayson 等提出了 THALES 模型,它是一个基于矢量高程数据的分布式参数模型。Yao 等提出了基于网格的集降水空间输入估计降水—蒸发—径流过程模拟、河流演算和空间参数校准为一体的分布式水文模型。Dawen Yang 等提出了基于山坡和基于 10 km 网格的大尺度分布式水文模型。此外,USGS 模型、WATFLOOD 模型、SLURP 模型、PRM 模型、VIC 模型等可广义地纳入分布式水文模型的范畴。

## 二、国内分布式水文模型研究进展

国内在分布式水文模型方面的研究与应用开展较晚,目前仅处于探索阶段。当前国内的研究主要体现在以下两个方面:一方面对国外较成熟的模型进行应用性研究,如 TOPMODEL 模型在淮河流域史河水系拓展应用,SWAT 模型在黑河流域的径流模拟研究,等等;另一方面在借鉴国外模型的同时,尝试开发适合我国数据条件的分布式水文模型。

20 世纪 80 年代初,中国科学院地理所水文室的径流实验室利用人工降雨的方法,开展了试验模拟研究,曾把模拟试验流域( $24 \text{ m}^2$ )分为上、中、下流域三种不同的降雨强度,地面条件用塑料草被与三种雨强结合,形成多种雨强与下垫面的空间分布,在模拟流域出口测定流量过程,试图探明流域雨强与地面不同的流量过程线。这是国内最早考虑流域空间参数分布的一次试验。该类试验在 1999 年后结合黄河“973”项目重新开始,但由于实验室搬迁,未能继续分布式参数对流域径流过程影响的试验,只是进行了雨强雨型对汇流的研究。



1995 年,沈晓东等在研究降雨时空分布与下垫面自然地理参数空间分布的不均匀性对径流过程影响的基础上,提出了一种在 GIS 支持下的动态分布式降雨径流流域模型,实现了基于栅格 DEM 的坡面产汇流与河道汇流的数值模拟。1997 年,黄平等在分析国外一些具有物理基础的分布式水文数学模型不足的基础上,提出了流域三维动态水文数值模型的构想。其后,又建立了描述森林坡地饱和与非饱和带水流运动规律的二维分布式水文模型,并用加辽金有限元数值方法求解模型,该模型比较适用于资料条件好的小流域。2000 年,郭生练等建立了一个基于 DEM 的分布式流域水文物理模型,用来模拟小流域的降水径流时空变化过程。2001 年,提出了两参数月水量平衡模型,用来评价气候异常变化对水文水资源的影响。任立良等进行了流域数字水文模型研究,并基于 DEM 考虑流域空间的变异性,建立数字高程流域水系模型。2002 年,夏军等建立了将 DEM 与水文非线性系统理论方法结合进行产流计算的分布式时变增益模型(DTVGM),该模型的特点是结构简单、参数较少,容易建立流域土地利用/覆被变化与水文产流参数的联系,应用到中国西部的黑河流域、黄河的马莲河流域和华北地区的潮白河流域,取得了较好的模拟效果。