

流域分布式 水文学原理及应用

余钟波 © 著



科学出版社
www.sciencep.com

流域分布式水文学原理及应用

余钟波 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书首先介绍了水文模型的发展概况、分类,集总式和分布式水文模型的优劣以及分布式水文模型的主要应用领域。其次重点阐述了分布式水文模型的构建及组成,其中包括土壤水文模型、陆地水文模型、地下水水文模型和地表水、地下水耦合模型四个部分。再次讨论了分布式水文模型结合DEM模型的流域特征提取、模型参数的率定方法及分布式水文模型在洪水预报和土壤大孔隙流中的应用。接着又探讨了大气模型和分布式水文模型的耦合,并将耦合模型应用于单场暴雨、多场暴雨的洪水预报以及大中尺度区域。最后指出了水文模型存在的尺度问题以及水文参数和网格的空间变异性等问题。

本书可供水文学、水资源、水文地质、气象、水利工程等学科的科研人员、大学教师、高年级本科生和研究生,以及从事水资源管理工作的技术人员参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

流域分布式水文学原理及应用/余钟波著. —北京:科学出版社,2008
ISBN 978-7-03-021525-3

I. 流… II. 余… III. 流域-水文学-研究 IV. P343

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 043282 号

责任编辑:吴凡洁 吴伶俐 / 责任校对:宋玲玲
责任印制:刘士平 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008 年 6 月第一次印刷 印张:14 1/2 插页:2

印数:1—2 500

字数:282 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

中国的独特地理位置和气候特征决定了它是一个水旱灾害频繁发生的国家,加上近年来我国经济建设的迅猛发展,对水文水资源研究的需求及解决社会实际问题的需求也越来越迫切。随着计算机、地理信息系统及遥感等相关技术的日渐成熟,具有物理成因参数的分布式水文模型已成为研究水文水资源变化的重要工具。分布式水文模型能够根据我国对水资源和预防自然灾害的需求,综合考虑地形、地表覆盖、土壤和地下水等因素模拟不同尺度下水文过程的时空变化。又由于气候变化、人类活动与水文水资源演变之间相互影响、相互作用,为了更好地研究水文机理,把气候模型与水文模型进行合理耦合是非常有必要的。有了气候与水文相耦合的模型,一方面,在气候骤变的情况下,能够对给定区域的水文情势进行预测;另一方面,在水文响应河道径流发生变化时,能对气候的变化进行预测。这对于增进陆气相互作用机制的理解,为变化环境下的防洪减灾及水资源综合利用等问题提供科学依据和解决办法都具有很大的实际应用价值。现存气候水文模式中的水文过程研究已显得过于简单,因而不能满足发展的需要。这除了由于气候模式与水文模式之间存在着尺度上的不匹配之外,还源于土壤、地表水与地下水模型之间的不相容。因此,建立一个能够更好描述气候-水文之间相互作用的耦合气候-水文模式是非常必要的。这对于研究气候时空变化与水文水资源变化之间的相互作用及其反馈具有十分重要的科学意义。

本书作者为“长江学者奖励计划”特聘教授,其在大气-陆面-地下水相互作用、地表水-壤中流交互影响、数学建模、流域尺度下水文模拟和污染物迁移模拟以及污染治理等研究领域中都做出了卓越的贡献。近些年来,作者带领的研究团队已在国内外学术刊物上发表了研究论文 400 余篇,其中在国际学术刊物上发表 SCI 检索的论文 69 篇(近年来论文被他人引用 100 多次,单篇最高引用达 36 次)。作者创建的气候-水文耦合模型系统已被收入《大型流域水文模型集》,而且有关“水文模拟和预测”的论述也被选入《世界大气科学百科全书》。在国家自然科学基金以及教育部长江学者和创新团队发展计划的资助下,作者与其研究团队一起充分利用雷达、卫星遥感、地理信息系统等新技术,结合室内和野外流域试验,对我国各地区的水文水资源、水环境问题进行深入细致的研究,进一步探讨区域大气和水文的各种物理过程的机理以及变化环境对大气和水文系统反馈的影响,其科研成果对于更深刻地了解这些地区气候变化下的水文过程,提高各种水文过程(如洪水问题)的预测精度以及拓宽气候和水文对人类文明影响等方面的研究都具有重要的

应用价值。

本书共有 12 章。第 1 章介绍了水文学与水循环的一些基本概念;第 2 章主要对水文学及水文模型的发展做了概述,并详细介绍了分布式水文模型的特点与应用领域;在第 3 章中,根据作者创建的水文模型系统详细说明了分布式水文模型中不同水文过程模块的原理与构建;第 4 章的内容着重描述在分布式水文模型中常用的信息源与参数提取方法,如降水与气温、土地利用、土壤数据等;第 5 章则结合实例详述如何基于数字高程模型提取流域特征变量;第 6 章主要介绍分布式模型的参数率定方法;第 7 章基于算例说明如何通过分布式水文模型进行暴雨洪水的每次与每日洪水预报;第 8 章主要介绍了通过水文模型综合考虑植被、土壤结构以及大孔隙流来模拟土壤含水量变化的方法;第 9 章与第 10 章是作者近十年来在大气过程与水文过程相互影响研究方面的成果总结,详细介绍了大气模型与水文模型耦合的方法,以及针对不同的研究目的构建不同结构耦合模型进行模拟的方法;第 11 章对水文尺度如何影响水文模拟做了阐述;第 12 章介绍了降雨与土壤水力参数的次网格变异性,提高模拟精度的研究成果。

本书总结了作者十几年来的研究成果,它包含了大量国际领先的研究技术和方法。陈星、黄勇、杨传国、鞠琴等参与了对本书部分研究的整编、校验以及资料查询工作。

由于编写时间仓促,书中难免存在不足之处,敬请读者和有关专家给予批评指正,以利于对本书的修正与完善。

作 者

2007 年 12 月于南京

目 录

前言

第 1 章 水文学及水循环	1
1.1 概述	1
1.2 水文学与水资源	1
1.3 水文循环	2
1.4 水量平衡	3
第 2 章 水文模型	5
2.1 水文模型发展概况	5
2.2 水文模型分类	8
2.2.1 系统模型	8
2.2.2 概念性模型	9
2.2.3 物理模型	10
2.3 集总式水文模型与分布式水文模型	10
2.3.1 集总式水文模型概述	11
2.3.2 分布式水文模型概述及分类	11
2.4 分布式水文模型的应用领域	12
2.4.1 径流模拟	12
2.4.2 土地利用/覆被变化对流域水循环的影响	13
2.4.3 气候变化对流域水循环的影响	13
第 3 章 分布式水文模型的构建	15
3.1 分布式产流模型	16
3.2 土壤水文模型	20
3.3 流域蒸散发计算	21
3.4 地表水—地下水耦合模型	22
3.5 分布式汇流模型	23
3.6 地下水水文模型	26
第 4 章 多源数据信息利用	28
4.1 水文模型信息源	28
4.2 降水 and 气温资料	28
4.2.1 数据来源	28
4.2.2 数据处理方法	29
4.2.3 雷达降水在水文模型中的应用	32

4.3	全球 1km 数字高程模型及精度分析	33
4.3.1	全球 1km 数字高程模型介绍	33
4.3.2	DEM 精度评定	34
4.4	土地利用遥感信息提取	36
4.4.1	土地利用对水文模拟的重要性	36
4.4.2	遥感监测数据处理	36
4.4.3	土地利用变化信息发现与提取	37
4.5	全球土壤与植被	38
4.5.1	植被与土壤类型的组成和分布	38
4.5.2	全球土壤数据	38
4.5.3	全球植被数据	39
4.6	地下水文参数的提取	40
4.6.1	地下水文参数的确定	40
4.6.2	大尺度地下水文参数的获取	41
4.6.3	基流量分割	42
第 5 章	基于 DEM 的流域特征提取	44
5.1	概述	44
5.2	流域特征提取流程和方法	45
5.2.1	流域特征提取流程	45
5.2.2	流域特征提取方法	45
5.3	复合信息提取流域特征方法	47
5.3.1	复合信息的利用	47
5.3.2	应用示例	49
5.4	大尺度分布式数字流域构建	51
第 6 章	分布式水文模型参数率定及其应用	54
6.1	概述	54
6.2	模型误差来源	55
6.2.1	水头误差	55
6.2.2	流量误差	56
6.3	模型参数率定方法	56
6.3.1	目标函数	58
6.3.2	试错率定法	60
6.3.3	自动率定法	61
6.4	模型参数率定评价	67
6.4.1	率定级别	67
6.4.2	参数敏感性分析和验证	68
6.5	模型预测	69

6.6	自动率定法在分布式水文模型中的应用	69
6.6.1	研究区域	70
6.6.2	模型参数率定方法	71
6.6.3	模型参数率定过程	72
6.6.4	参数敏感性分析	76
第7章	暴雨洪水预报	79
7.1	概述	79
7.2	暴雨洪水预报	80
7.2.1	模型数据来源	80
7.2.2	地形描述	83
7.2.3	水文模拟结果	85
7.3	两种产流模式的次洪预报	90
7.3.1	研究区域	90
7.3.2	数据处理	91
7.3.3	模拟结果	93
7.4	地表水与地下水耦合的流域暴雨洪水预报模型	95
7.4.1	流域水文模型	95
7.4.2	耦合模型在流域中的应用	102
第8章	土壤含水量变化规律研究	112
8.1	概述	112
8.2	土壤水力参数模型	112
8.3	干旱区土壤水多样性研究	113
8.3.1	大孔隙流	114
8.3.2	区域概况	116
8.3.3	模型率定	118
8.3.4	模拟结果	120
8.4	湿润区土壤含水量时空分布评价	130
8.4.1	HMS数据和参数	130
8.4.2	模型率定	132
8.4.3	模拟结果	132
第9章	气象-水文耦合模式研究	139
9.1	概述	139
9.2	气象-水文模型耦合方法	139
9.3	气象-水文耦合模型在单场暴雨中的应用	141
9.3.1	研究区域	141
9.3.2	模型数据准备	142
9.3.3	降雨事件描述	144

9.3.4 模拟结果	145
9.4 气象-水文耦合模型对嵌套区域连续多场暴雨的应用	149
9.4.1 区域气象模型简介	150
9.4.2 网格单元空间变异性	151
9.4.3 研究区域与数据准备	152
9.4.4 模拟结果	152
第 10 章 水文-气象双向耦合模型在大尺度与中尺度区域的应用	158
10.1 概述	158
10.2 耦合方法	159
10.3 研究区域与数据采集	165
10.4 模拟结果	167
第 11 章 水文尺度问题研究	173
11.1 水文尺度与水文模拟	173
11.2 降雨和土壤水力参数的解集方法	174
11.3 降雨和土壤水力参数的次网格空间变化对流域水文过程响应的 影响	175
11.3.1 数据和方法	176
11.3.2 模型率定	176
11.3.3 模拟结果	178
11.4 降雨的时间尺度效应和水力参数的空间尺度效应对水文过程的 影响	181
11.4.1 引言	181
11.4.2 降雨时间尺度效应	181
11.4.3 水力参数空间变动性的影响	181
11.5 中尺度气象模型分辨率对地表径流模拟的敏感性分析	184
11.5.1 研究区域	184
11.5.2 不同分辨率下次降雨事件的模拟	185
11.5.3 不同分辨率降雨的水文响应	187
11.5.4 模拟降雨和产流的时空特性	188
第 12 章 流域分布式水文模型的应用前景	197
参考文献	202

第 1 章 水文学及水循环

1.1 概 述

岩石圈、大气圈、水圈和生物圈是组成地球外圈的四个基本圈层,四个圈层之间没有明显的界限,它们相互作用,相互影响。由液态、气态和固态三态水体所覆盖的空间称为水圈,其范围从深层地下水的底层直到大气对流层顶部,水圈中的各态水体同岩石圈、大气圈和生物圈不断存在水量和热量交换,由此形成各种不同尺度的水文循环。水在循环过程中,参与各圈层中的各种物理和化学过程,调节各圈层的能量,塑造各种地表形态,使大气圈呈现出复杂多变的天气现象,并参与生物圈中的生物过程^[1]。

水圈内的总储水量约为 $1.386 \times 10^{18} \text{ m}^3$,其中海洋水储量约为 $1.338 \times 10^{18} \text{ m}^3$,占总水量的 96.53%,在余下的 3.47% 的水量中,地表水储量占 1.78%,地下水储量占 1.69%。人类可利用的淡水储量约为 $3.5 \times 10^{16} \text{ m}^3$,仅占总储水量的 2.53%,并且大部分以冰川、多年冻土和永久积雪的形式存在,小部分分布在湖泊、河流、土壤和地下水中,其中冰川储水量约 $2.4 \times 10^{16} \text{ m}^3$,占淡水储量的 68.6%^[2]。

水文学是研究地球上水的性质、分布、循环、运动变化规律以及水与地理环境和人类社会之间相互关系的科学^[3]。因此,水文学是一门研究领域十分广阔的学科,它不仅包括大气、海洋、地表和地下水的研究,还包括水圈同岩石圈、大气圈和生物圈之间相互关系的研究。水文学还涉及溶解态营养物质、能量、泥沙及污染物的输移研究,因为水的运动规律是这些研究的基础。

1.2 水文学与水资源

作为一门认识自然和改造自然所必需的学科,水文学的产生与发展同人类文明史的发展是息息相关的。黄河、尼罗河、幼发拉底河和恒河这些古老的文明发源地的遗迹表明,人们从远古时期就开始进行一些基本的水位观测,在中国大禹治水的传说中,就提到用木尺观测河水水位变化的方法。古时候,人们就能够运用简单的水文学与水力学原理建造一些实用的水工建筑物。例如,中国古代与古罗马的运河、古阿拉伯水井以及古埃及的灌溉工程等。

17 世纪至 19 世纪是水文学的奠基时期。在此时期内,提出了一系列的水文

学基本理论,如佩罗提出的水量平衡理论(它是水文学最基本的理论之一)、谢才提出的明渠均匀流公式、达西发表的描述多孔介质中地下水运动的达西公式。进入 20 世纪,随着人类开发自然步伐的加快,水文学在各种防洪、灌溉和交通建设等方面得到广泛的应用^[4]。特别是 20 世纪 50 年代之后,随着科技日新月异的发展,水文学的发展也迎来了崭新的时代^[5,6]。随着计算和观测技术的日益进步,推动了水文学向更深、更广的层次发展,并且水文学与其他学科间的交叉研究也不断兴起^[7~9]。

水文学既需要理论研究也需要应用研究,理论研究主要致力于研究水在自然界参与的各种物理、化学和生物过程的机制,应用研究则需要解决如何合理利用并保护水资源。在缺水地区,科学合理地分配淡水资源是政府和人民需要面对的重大挑战,直接影响到国家和城市的稳定以及人民的安居乐业。众所周知,水是一种用之不竭的资源,但是在过去的 20 世纪,人口的迅猛增长使得对水资源的需求量急剧增加,再加上水质型缺水和环境的恶化,从而给经济、社会的发展和人民的安居乐业带来了不小的压力。因此,在这样的大背景下,水资源问题成为水文学迫切需要解决的问题。一方面在建设和谐社会的进程中,需要保证水资源的可持续开发利用,减少洪涝灾害以及水污染带来的社会和经济损失;另一方面,随着人类活动的加剧,对自然环境产生了多方面的影响,研究并评价人类活动在水文过程上的影响,也是社会对水文学家提出的迫切需要解决的问题。例如,全球气候变化对水资源的影响、冰川消融对气候的影响以及流域间调水的生态环境效应等^[8,10,11]。

1.3 水文循环

水文学利用基本的科学原理来描述自然现象,在研究分析这些问题时,水文学的一个重要功能就是描述水的运动,即水是如何在地表、地下各种通道中运动的,水文学家利用物理学原理与数学模型来定量化描述水在自然界中的运动规律。

水圈中的水以固态、液态、气态三态的形式分布于大气、地表和地下,通过降水、下渗、径流和蒸散发等水文过程在水圈中相互转化,形成不断运动的动态系统,水的这种周而复始不断转化、迁移和交替的现象称为水文循环^[12]。水文循环包括不同尺度的循环,水文学中常用到的概念是指全球性水文循环^[13]。海洋中的水通过蒸发以水汽的形式进入大气,随气流输送到大陆上空,在一定的天气条件下,以降水(雨、雪、雹等)的形式落在地面,落在地面的这部分降水,一部分通过蒸散发返回大气;另一部分在地面形成地表径流,或渗入地下形成壤中流或地下径流,之后汇入河流、湖泊,或汇入海洋(见图 1-1)。

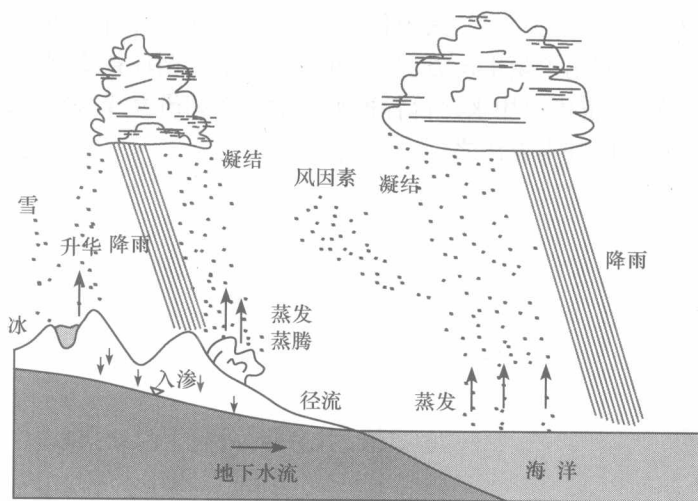


图 1-1 水循环示意图

水文循环的主要能量来源为太阳辐射,地球引力也发挥了重要作用。水汽的形成、运动以及在大气层中的液化大多需要太阳能的驱动,降水、地表和地下水的流动则主要归功于重力的作用。水文循环是自然界中最重要的物质循环之一,它为人类和其他生物提供赖以生存的水资源,塑造了地球上不同的气候和生存环境,影响地球化学物质的迁移^[14]。

1.4 水量平衡

质量守恒定律是描述水文循环的基本定理,在水文学中常被称为水量平衡定理,即指地球上任一区域在一定时段内,收入的水量与支出的水量之差等于该区域内的蓄水变化量。水量平衡的研究区域可以是某个湖泊、流域、海洋、某个地区或整个地球,研究时段可以是日、月,也可以是一年、数十年或更长的时间。例如,从多年平均的角度研究全球水文循环,全球陆地的年入海水量基本不变,全球的年蒸发量与年降水量大体相等。可用数学方法来描述水量平衡定理,即

$$\frac{dV}{dt} = I - O \quad (1-1)$$

式中: V ——某区域内的水量;

t ——时间;

I ——入流量;

O ——出流量。

式(1-1)称为水量平衡方程,其中各收入项、支出项和蓄水变量随研究区域的不同而有所不同。利用水量平衡方程式,可以确定水文循环各要素间的数量关系,估算区域水资源量,也可以用来评价各种水文学方法和研究成果。因此,水量平衡是水文学中最重要的基本方法之一^[14,15]。

第2章 水文模型

2.1 水文模型发展概况

自然界中的水文现象是许多因素相互作用的复杂过程,水文现象虽然发生在地表范围内,但与大气圈、地壳圈、生物圈都有密切的联系,属于综合性的自然现象。水文模型已成为研究水文过程和流域水资源管理必不可少的工具,其实质是一种数学模型,即对一些经验规律加以物理解释,用严密的数学方式表达,再把各个水文过程综合起来,形成全流域的水量平衡模拟计算系统。流域水文模型在解决水文规律研究和生产实际问题等方面都起着显著的作用。计算机技术的广泛应用,为水文模型技术的发展起到推动作用。

自17世纪末建立了水文循环和流域水量平衡的基本概念后,流域对暴雨的响应(即产汇流问题)就成为水文学的一个主要研究课题。在20世纪50年代中期,计算机的发展使水文计算的速度与容量出现了质的飞跃,科学家开始把流域水文循环的各个环节(径流过程、蒸散发过程等)连成一个整体系统进行研究,并提出了“流域水文模型”的概念,随后出现了SSARR模型(1958年)和Stanford模型(1959年)等水文模型。20世纪70~80年代中期是水文模型蓬勃发展的时期,这期间相继提出了新安江模型、Sacramento模型、Tank模型、HEC-1模型、SCS模型和API连续演算水文模型等^[16]。这些模型在计算过程中将流域当作一个整体,根据流域的平均降雨过程和平均状态参数来推求流域出口断面的流量过程,由这种方法构建的水文模型在水文学中称为集总式流域水文模型。我们知道,水文过程具有非线性和很强的时空变异性,对于气候、地质地貌和土壤植被参数的空间变化是十分敏感的,并且人类活动(例如,水资源的区域规划、城市化进程以及水工建筑物)也会造成水文参数在时空上的再变化,然而集总式水文模型不能很好地反映水文要素在空间上的变化。水文学家以及决策者们再也不满足于仅仅能够得到流域出口的流量过程线,而是希望能够获得流域面上水文响应的时空分布信息,以便更好地研究水资源的形成和演变规律,加深对水文过程物理机制的认识,制定更加科学合理的用水计划。在这些需求下,分布式水文模型应运而生。

一般认为,分布式水文模型的研究始于1969年,即Freeze和Harlan发表了一篇有关“一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图(FH69)”的文章^[17]。但是之后的十多年里,由于受计算机运算能力以及流域空间数据采集的瓶

颈限制,分布式水文模型并没有得到长足的发展。直到 20 世纪 80 年代以后,计算机技术的飞速发展使计算能力大大提高,地理信息系统及遥感等相关技术的出现与发展为获取空间数据提供了强有力的支持,这些技术促进了分布式水文模型的发展并突破了瓶颈限制,使水文学家开始致力于具有物理基础的分布式水文模型的开发研制与应用,并取得了丰硕的成果。

Hewlett 和 Troendle^[18]提出了基于植被覆盖良好流域的变源面积水文模型(简称 VSAS),该模型主要基于饱和产流机制来模拟地表径流。Beven 和 Kirkby^[19]提出了以变源产流为基础的 TOPMODEL,并通过数字高程模型(digital elevation model, DEM)来计算地形指数,该指标可以反映下垫面的空间变化对流域水文循环过程的影响。SHE(systeme hydrologique europeen)模型则是一个典型的具有物理基础的分布式水文模型^[20],在 SHE 模型中,流域在平面上被划分成许多矩形网格,用来反映模型参数、降雨输入以及水文响应的空间分布,在垂直面上也划分为若干层来模拟土壤水运动,并且考虑了相邻网格单元之间的水量交换。此外,具有代表性的分布式水文模型还包括 CAS2D^[21]、THALES^[22,23]、SWRRB 模型^[24]、R. WATER. FEA^[25]、SMR^[26]、SWAT^[27]、HSPF^[28]、HMS^[29]与 HYDRO-TEL^[30]等。与集总式水文模型相比,分布式水文模型能够方便地利用遥感与地理信息系统提供的空间信息,基于严格的物理基础来描述水文过程,采用偏微分方程来定量描述水文参数和过程的空间分布。分布式水文模型中的参数通常具有明确的物理意义,能够反映天气以及下垫面因素的空间变化,根据野外实测数据确定模型控制参数。

大多具有物理基础的分布式水文模型都是基于 FH69 的框架所构建的,虽然不同的分布式水文模型使用的流域离散化方法、描述水文物理过程的微分方程及其求解方法各有不同,但是其都是通过质量、能量和动量方程来描述水文现象,采用连续控制方程描述水量和能量的变化过程,并由此考虑水文参数及水文响应的空间变异性。

自 20 世纪 70 年代开始,我国一方面积极引进国外有关的流域水文模型;另一方面也致力于研制新的流域水文模型。将 TOPMODEL、SWAT、VIC、HEC-1 和 HMS 等在国外发展较为成熟的水文模型应用在国内的有关流域,取得了较好的模拟结果^[31~42]。将概念水文模型——新安江模型发展为半分布式水文模型^[31,43~51],该模型也成功地应用于不同流域的水文模拟中。黄平和赵吉国^[52]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;李兰^[53,54]提出了基于山坡水文学原理的 LL-II 模型;郭生练等^[55,56]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雨径流时空变化过程;吴险峰等^[57,58]提出了一种松散耦合型结构的分布式水文模型,该模型适用于人类活动较少的半湿润和半干旱地区。

可以看出,分布式水文模型已经成为当前水文科学研究的重要工具与研究热点。分布式水文模型之所以能够得到迅猛发展,是与数字高程模型(DEM)、地理信息系统(GIS)和遥感(RS)等支撑技术的逐步完善和发展分不开的^[59],尤其是DEM的广泛使用。目前,绝大多数的分布式水文模型都是建立在DEM栅格基础之上,并依托DEM的栅格结构来提取模型所需的下垫面信息以及设计模型的计算结构。

DEM不仅能够描述流域的地形、地貌,还可以自动生成流域的河网和流域边界,自动提取坡度、坡向等地貌参数。RS是一种宏观的采集与处理信息技术,作为一种信息源,其具有范围广、周期短、信息量大和成本低的特点。RS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,因此能够很方便地进行应用。随着遥感资料与数字化数据的增多,地理信息系统已经成为处理数据以及显示结果不可缺少的工具。GIS是一种对空间数据进行收集、存储、更新、管理、操作、分析及显示的一种系统工具,为遥感等数字化数据的解译、分析、处理以及观察比较模型参数与结果的时空变化提供良好的技术环境与支持。

由于模型的输入、输出必须在模型与GIS之间进行转换,如果将模型本身嵌入GIS的工作环境,这种转换就简便得多。在GIS环境中构建的基于DEM的分布式水文模型能够充分利用遥感与雷达等技术提供的时空分布的水文数据,极大地推动了分布式水文模型在反映物理机制、描述水文循环的时空变化过程方面的优势。分布式模型的这些特点,使其能够方便地模拟人类活动或下垫面因素的改变对流域水循环及水资源的影响。因此,分布式水文模型在水文科学研究与应用中越来越显示出其重要性。

具有物理基础的分布式模型同传统的集总式模型相比其结构更复杂,偏微分方程的数值求解计算量大,并且需要解决一些复杂的问题,如模型率定等,花费精力较大^[60,61]。分布式水文模型的另外一个缺点就是它虽然能够考虑气象、土壤和地形等水文数据的空间变异性,能更好地描述水文过程的物理机制,但是分布式水文模型对流量过程线的模拟精度同集总式水文模型的模拟结果相比并没有优势,其原因是多方面的。第一,不管是分布式水文模型还是集总式水文模型,其建模过程都受限于一些假定条件,这些假定条件都是对真实物理过程的一种理想化,因此模型并不能完全再现真实的水文过程。第二,分布式水文模型的控制方程都是基于点尺度建立的,然而在实际应用时则认为控制方程对于不同尺度流域的分辨率(数米到数十千米)都是有效的,并未考虑模型参数与尺度之间的关系。另外,由于分布式水文模型所用到的数据以及参数都是栅格平均值,许多参数的测量尺度与模型中的使用尺度不匹配^[23,29,60,62,63]。第三,由于水文过程为非线性过程,对于模型的

初始条件和边界条件是非常敏感的,在真实的模拟中,很难获得精准的初始条件与边界条件。第四,仅仅根据流域输出的流量过程线来率定模型也是片面的,因为流量过程线是各个水文过程综合作用的结果,准确地模拟了流量过程线并不代表模型能够准确模拟各个水文过程,但是由于水文状态变量缺乏测量数据,流量过程线的拟合度仍然是水文学常用的模型率定标准之一。

分布式水文模型之所以得到越来越多的关注,是因为分布式水文模型与 GIS、RS 等技术的结合,将水文科学推向了更广阔的应用领域。例如,地下水与地表水补给关系的研究^[64~66]、污染物随水文循环迁移转化研究^[67~69]、与气象模型的耦合研究等^[70]。分布式水文模型使得描述时空变化的水文循环成为可能,并且能够方便地结合气象以及下垫面等空间分布数据研究人类活动、环境变化与水文循环之间的互动关系,更真实地描述水资源的演变规律。因此,无论在理论研究还是在应用研究中,分布式水文模型都发挥着越来越重要的作用。

2.2 水文模型分类

流域水文模型发展至今,由于不同的应用目的,国内外出现了大量结构和功能不同的水文模型。水文模型众多,其分类方法也各异,可以根据研究范围、研究对象、研究内容以及建模技术等方法对其进行分类。综观这些分类方法,总体上可以将模型分为两大类,即确定性模型和随机性模型。随机性模型也叫做统计模型,它是建立在水文现象统计规律基础上的,应用概率理论和随机性过程来描述水文环节,其预测结果多为条件概率的形式,在应用上受到太多的局限,所以目前并不常用。根据水文过程是经验性描述、概念性描述还是完全物理描述,将确定性模型进一步划分为系统模型(黑箱模型)、概念性模型和物理模型。

2.2.1 系统模型

系统模型又称为黑箱模型,是把流域看成黑箱,利用系统的输入、输出时间序列资料,建立某种数学关系,通过统计分析来推求系统的脉冲响应函数。这种模型是流域内地形、土壤、植被等众多要素及其空间特征对水文影响的概括,但其忽略了流域内部的水文过程,其结构和参数需要依据原型的观测信息通过系统识别来确定,当流域内部发生变化时不能再使用原来的模型参数,需要对模型参数重新进行修正。黑箱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、单输入多输出的、多输入多输出的等多种类型。

系统模型根据起源不同可分为三大类:①经验水文法。例如,最著名的单位线模型,该模型应用单位线原理,只注重系统反应,不考虑系统的状态,对资料要求少,方法简单,并且具有一定精度。因此,这种方法在水文上起到很大的作用。