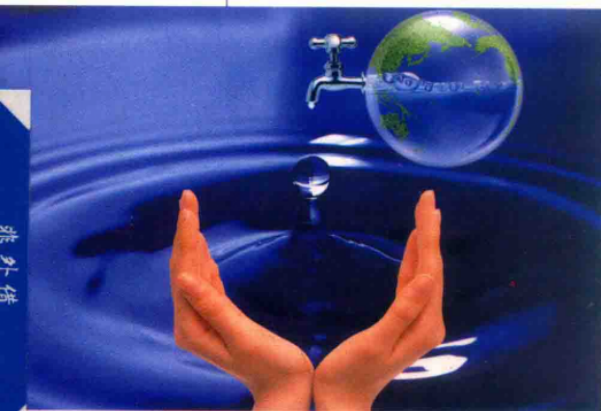




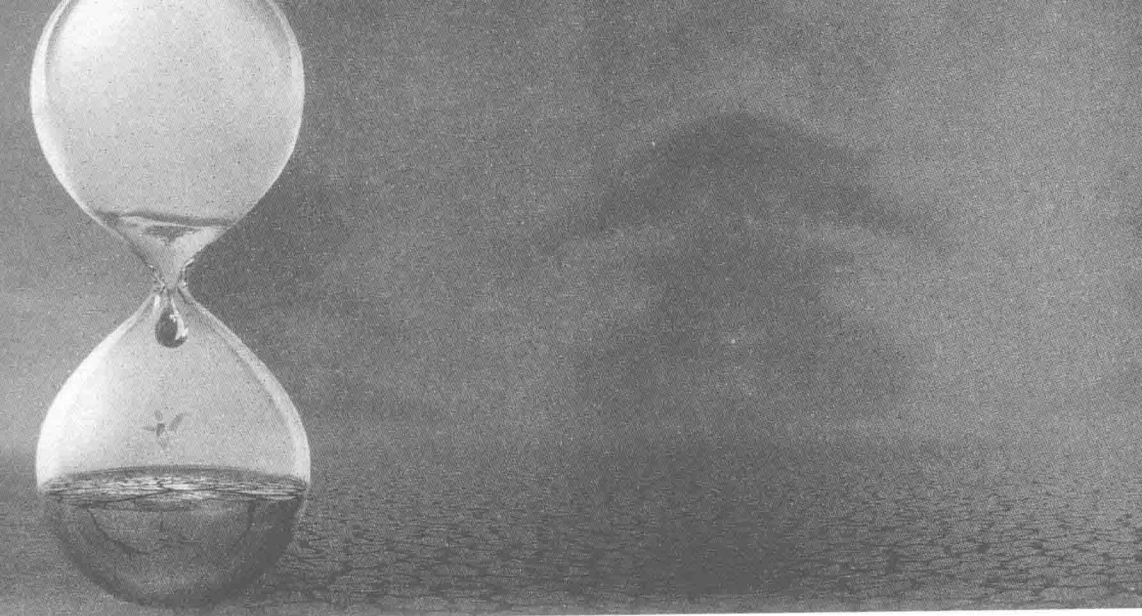
分布式水文模型 应用与实践

李丽 王加虎 金鑫 著

FENBUSHI
SHUIWEN MOXING
YINGYONG YU SHIJIAN

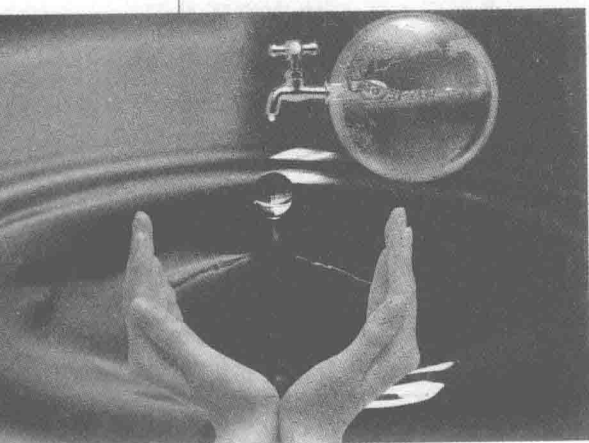


中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS



分布式水文模型 应用与实践

李丽 王加虎 金鑫 著



中国海洋大学出版社

· 青岛 ·

图书在版编目(CIP)数据

分布式水文模型应用与实践/李丽,王加虎,金鑫

著. —青岛:中国海洋大学出版社,2018.12

ISBN 978-7-5670-1855-6

I. ①分… II. ①李… ②王… ③金… III. ①水文模型—研究 IV. ①P334

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 301206 号

分布式水文模型应用与实践

出版发行 中国海洋大学出版社
社 址 青岛市香港东路 23 号 邮政编码 266071
网 址 <http://pub.ouc.edu.cn>
出 版 人 杨立敏
责任编辑 孙宇菲
订购电话 0532-82032573(传真)
印 刷 三河市铭浩彩色印装有限公司
版 次 2019 年 9 月第 1 版
印 次 2019 年 9 月第 1 次印刷
开 本 170 mm×240 mm
印 张 13.25
字 数 237 千
印 数 1—1000
定 价 48.00 元

如发现印装质量问题,请致电 010-82540188,由印刷厂负责调换。

前 言

空间化的建模结构、分布式的资料输入方式以及对水文循环的空间描述等,使得分布式水文模型具有广阔的应用空间和前景,从传统的洪水预报预警、地下水、生态模拟、水资源管理到与新技术密切相关的水文气候耦合、变化环境研究等,都涉及分布式水文模型。然而,分布式水文模型往往需要大量精确的数据作为支撑,其率定和应用也较耗时耗力,使其应用受到了较大的限制。

本书为作者多年从事分布式水文模型应用与系统研发过程中所积累的一些研究成果总结,研究内容涉及分布式水文模型的参数优选、初值设定、敏感区识别、土壤墒情、水情预报和产输沙模拟。另外,范正行高工、刘淼工程师、冯艳高工、张磊磊高工、陈明霞硕士等也参与了本书的部分研究和编写工作。感谢郝振纯教授、王振龙教授等在研究工作中的指导和帮助。

全书共分 10 章,第 1、2 章主要介绍分布式水文模型的框架剖析和应用概述;第 3 章介绍了一种参数优选算法——变域递减随机搜索算法;第 4 章介绍了一种分布式土壤含水量初值的设定方法;第 5、6 章介绍了水文敏感区及 TOPMODEL 在水文敏感区识别中的应用;第 7、8 章分别介绍了平原区和丘陵区分布式土壤墒情模型;第 9 章介绍了一个用于流域洪水预报的分布式水文模型系统;第 10 章介绍了一个分布式产输沙模型。

本书也是多年来课题组研究项目的成果积累,包括国家自然科学基金项目“防洪拦、滞、蓄工程群水文效应的分布式模拟研究”(编号:41271042),国家自然科学基金项目“土壤水蚀过程中的重力侵蚀模拟研究”(编号:51369009),国家自然科学基金青年基金“分布式水文模拟中的尺度问题及其不确定性影响研究”(编号:40801012),国家重点研发计划项目“多尺度水文水资源预报预测预警关键技术及应用研究”(编号:2016YFC0402704),国家自然科学基金青年基金“青藏高原江河源区气候变化及水文响应模拟研究”(编号:41501039)等。

本书的出版得到了中国电力建设股份有限公司科技项目“大流域梯级水库群基于陆气耦合模式的分布式水文预报系统研究”(编号:DJ-ZDZX-

2016-02-03)的资助。

由于作者水平有限,书中还存在着不完善和需要改进的地方希望与国内外水文学界的专家学者共同探讨,恳请读者批评指正,以便更好地完善和进步。

作者

2018年9月

目 录

第 1 章 剖析分布式水文模型	1
1.1 整体认识	1
1.2 建模基础	3
1.3 模型结构	4
1.4 参数确定	6
1.5 单元划分	7
1.6 算法实现	8
1.7 资料及其他	9
第 2 章 分布式水文模型应用概述	12
2.1 洪水预报预警	12
2.2 地下水数值模拟	14
2.3 生态模拟	14
2.4 农田水利	14
2.5 城市雨洪	15
2.6 水资源开发管理	16
2.7 变化环境影响研究	16
2.8 缺/无资料地区水文问题	17
2.9 岩溶地区水文过程模拟	17
第 3 章 分布式水文模型的参数优选	18
3.1 研究区域与资料	19
3.2 算法描述	20
3.3 应用	24
3.4 结论与展望	26
第 4 章 分布式土壤含水量初值设定	27
4.1 定性分析	27
4.2 模型介绍	28
4.3 定量分析	30
4.4 应用实例	32

4.5	结论和展望	36
第5章	水文敏感区	37
5.1	水文敏感区	37
5.2	流域地表产流概率	39
5.3	边界月份敏感线	40
5.4	平均水文敏感线	41
5.5	季节性水文敏感线	43
5.6	水文敏感区范围的界定	44
第6章	基于 TOPMODEL 的水文敏感区识别	45
6.1	流域概况	45
6.2	算例构建	47
6.3	参数率定	51
6.4	典型流域地表产流及平均水文敏感线	54
6.5	典型流域月地表产流概率及季节性水文敏感线	57
6.6	典型流域水文敏感区范围的生成	59
6.7	本章小结	60
第7章	平原区分布式土壤墒情模型	62
7.1	模型构建	62
7.2	参数率定	68
7.3	模型检验	77
7.4	推广应用情况	80
7.5	效益分析	90
第8章	丘陵区分布式土壤墒情模型	93
8.1	模型结构	93
8.2	土壤水逐日递推计算	94
8.3	壤水侧向运动	95
8.4	检验与应用	96
第9章	用于流域洪水预报的分布式水文模型	99
9.1	任务背景	99
9.2	流域概况	101
9.3	数字流域构建	106
9.4	分布式水文模型构建	115
9.5	应用示例	123
第10章	分布式产输沙模型	129
10.1	背景	129

目 录

10.2	可耦合产输沙的分布式水文模型.....	141
10.3	分布式产输沙计算.....	149
10.4	分布式模拟成果.....	169
10.5	结论与展望.....	180
参考文献.....		183

第 1 章 剖析分布式水文模型

1.1 整体认识

分布式水文模型用于小尺度水文过程的模拟已有 20 多年的历史,其中具有代表性的分布式水文模型是 SHE 与 MIKE SHE 模型,目前有一些水文学者在很小流域的研究中应用这种分布式水文模型,但是尚不够广泛。国内对分布式水文模型的研究起步较晚,相关研究尚处于开发阶段。就目前的进展情况而言,学术界对分布式水文模型的研究有一些共识。

1) 传统的水文模型种类很多,但绝大多数模型属集总式水文模型,不能很好地反映水文水资源要素在空间上的变化。这种变化不仅受自然条件本身空间变异性(如气象气候、地质地貌和土壤植被等)的影响,而且受经济社会发展(工农业用水、城市化与土地覆盖及土地利用等)的人类活动的影响,后者在空间上也是不均匀的。在这种情况下,为了识别这种空间变化的影响,过去的集总式水文模型则转向分割较大且流域更小的(如流域的支流流域)的模拟方法,这种方法可视为是一种半分布式的水文模型,而完全分布式的水文模型则是具有更高分辨率的网格格式模型,它能更好地反映水文水资源形成、演化的空间变异的影响,深化流域水文水资源的物理过程的研究。

2) 分布式水文模型之所以成为当前水文水资源研究的热点,在于它具有更多的时空模拟功能平台的作用,能够把单一水量变化的模拟转向更加广泛的水文分析与水资源管理(包括生态环境)问题的模拟,大大拓宽了模拟领域,如地表水与地下水转化计算、水资源数量和质量的联合评价、非点源污染、土壤侵蚀与水土流失、洪水预报预警、土地覆盖与土地利用影响、生态需水、水生生物与生态系统修复、农业灌溉与城市工业用水,以及通过网格格式的尺度转换与大气环流模式耦合,计算与预测全球变化对水文水资源的影响,从而纳入全球变化研究的前沿。由此可见,分布式水文模型理论上的基础性和应用上的广泛性及重要性。

3)与采用基于经验与黑箱方法的集总式水文模型相比较,分布式水文模型在理论上的深化与应用上的广阔前景,显示了其优越性。但是理论上的深化却带来了应用上的难度,主要是理论上所需要的资料与数据非常多,而且精度要求很高,往往超出了目前常规水文要素观测的内容与精度,同时大量参数的累积误差往往会降低模拟精度。这是当前分布式水文模型的一个难题,也限制了分布式水文模型的广泛应用,特别是用于较大流域尚属罕见。从严格的分布式水文物理模型来看,应持理性的态度,但是将系统水文学方法与物理水文学方法结合的分布式水文模型,却是一个值得探索的途径。同时,必须指出,采用适应性(指资料限制)方法攻破难题,灵活地运用分布式水文模型的理论框架与概念,发展具有实用性的分布式水文水资源模型是务实之举。

4)在现行的分布式水文模型研究中,水库等人类活动影响和 DEM 的分辨率问题没有被充分地考虑。这两个问题在以洪水模拟和水资源分析为主要目的的分布式水文模型中尤为重要。在河道上修建水库等拦蓄水工程后,水库的淹没区形成了水面,加大了水深和水面面积,汇流条件与建库前的河道汇流相比有了很大的不同,当河道的洪水通过水库时,其过程不仅受水库天然调节的影响,还会受到人为的控制,因此,必须将水库水体作为单独的子流域处理。大量的研究表明,DEM 的分辨率对提取河网的精确性有影响,平原区水流流向的不确定性与 DEM 的分辨率密切相关,局部需要进行人工修正,且不同分辨率的 DEM 提取的流域参数也有差别,面积、长度等有关参数差别不大,但坡度值变化明显。因此,构建分布式水文模型时,需要根据具体情况慎重选取 DEM 数据源。如在结合黄河流域的水文模拟研究中,强调流域自然水循环与人类活动修建水库以及淤地坝的影响的耦合问题,强调水文尺度分析,选择合理的 DEM 分辨率。这方面的研究属自然和人工多种影响作用下的流域水循环研究,是当前国际水科学前沿“变化环境下水循环与水安全研究”中的一个重要方面,其中的关键是如何定量描述不同尺度人类活动对水资源形成过程的影响,除了水文模拟之外,最为重要的是在实地开展水文实验与观测。我国在这一方面正处于探索和发展过程中。

5)水文要素的空间分布信息是流域水文分布式模拟最基本的要求。在当前的观测条件下,水文气象要素(如降水、气温等)都是在特定的观测点上完成的。因此,基于现实观测数据的分布式水文模拟的一个重要的步骤就是依据这些点上的观测信息通过插值而获得面上的信息。插值技术研究的深入固然能改善分布式水文模拟,但更为重要的是观测技术的发展将更有力地推动分布式水文模型的发展和应用。当前,应用雷达测雨技术获得

面上的雨量资料已逐步发展和成熟。可以预料,应用遥感技术获得资料,把遥感和分布式水文模型相耦合将成为今后发展的一个重要方向。

分布式水文模型发展至今,其面临的问题具有明显的时代技术特征。20世纪70~80年代,分布式水文模型的发展主要受到计算机发展水平的限制,进入90年代以后,计算机迅速发展,计算能力已经不是分布式水文模型发展的瓶颈,而对水文系统的深刻认识、复杂系统建模和多学科交叉等问题成为分布式水文建模必须面对的又一难点。

1.2 建模基础

GIS和RS为水文模拟提供了新的研究思路和技术方法,如ARC/EGMO^[1]、SWAT^[2]、DPHM-RS^[3]等。遥感数据(航空照片和卫星影像)能够提供流域空间的特征信息,是描述流域水文变异性的最可行方法,尤其是在地面观测缺乏的地区。在分布式水文建模中,遥感数据的应用可以归纳为^[4]:作为模型输入数据和用作模型参数估计。具体有7个方面:①降水强度观测以及空间格局;②蒸散发计算和土壤湿度反演;③雪被覆盖面积;④地下水埋深;⑤土地覆盖与土地利用分类;⑥水体特征;⑦植被参数提取。相比于GIS,遥感技术在分布式水文模型中的应用水平比较低,其原因主要是:①遥感数据空间分辨率和时间分辨率的矛盾,即空间分辨率较高的数据,其时间分辨率较低,反之亦然,这就限制了遥感数据的应用;②缺乏普遍可用的从遥感数据中提取水文变量的方法;③缺乏必要的教育与技术培训。^[5]

1958年麻省理工学院Miller和Laflamme首次提出了数字地面模型(Digital Terrain Model,DTM)的概念。DTM是利用一个任意坐标场中的大量选择且已知的X、Y、Z坐标点对连续地面的一个简单的统计表示,其本质属性是二维地理空间定位和数字表达。若DTM所描述的地面特性是高程Z,此时DTM称作数字高程模型DEM。DTM/DEM的出现为数字水文学的发展和数字水文模型的诞生提供了坚实的技术基础^[6]。

模块化结构的水文模型潜力最大,其中基于DEM的分布式水文模型在研究人类活动和自然环境变化对流域水文循环时空过程的影响、区域水资源生成与演变规律方面,具有独特的优势,是现代水文水资源研究的理想工具,被认为是未来水文模型发展的主要方向。

基于DEM的分布式水文模型,通过DEM可提取大量的陆地表面形态

信息, 这些信息包含流域网格单元的坡度、坡向以及单元之间的关系等^[7,8]。同时, 根据一定的算法可以确定出地表水流路径、河流网络和流域的边界。在基于 DEM 所划分的流域单元上建立水文模型, 模拟流域单元内土壤-植被-大气 (Soil Vegetation Atmosphere Transfer, SVAT) 系统中水的运动, 并考虑单元之间水平方向的联系, 进行地表水和地下水的演算。

概括起来, 基于 DEM 的分布式水文模型具有以下特色: ①具有物理基础, 能够描述水文循环的时空变化过程; ②由于其分布式特点, 能够与 GCM 嵌套, 研究自然变化和气候变化对水文循环的影响; ③同 RS 和 GIS 相结合, 能够及时地模拟出人类活动或下垫面因素的变化对流域水文循环过程的影响。

目前, DEM 主要有 3 种格式: 栅格型、不规则三角网 (TIN) 和等高线, 3 种数据格式在 GIS 软件中可互相转化。其中在水文模型中用得较多的是栅格 DEM。基于栅格 DEM 的分布式水文模型主要有两种建模方式: ①应用数值分析来建立相邻网格单元之间的时空关系, 如 SHE 模型等。该类模型水文物理动力学机制突出, 也是人们常指的具有物理基础的分布式水文模型。但它结构比较复杂、计算烦琐, 当前还很难适用于较大的流域。②每一个网格单元 (或子流域) 上应用传统的概念性模型来推求净雨, 再进行汇流演算, 最后求得出口断面流量, 如 SWAT 模型等。该类模型结构与计算过程都比较简单, 比较适用于较大的流域。

1.3 模型结构

模型是对复杂客观实体的概化与逼近。由于水文现象的复杂性, 受测量技术的限制, 一些水文过程和边界条件并不明确。因此, 常用的分布式水文模型都有一定的假设: ①最小水文计算单元的地表面为具有一定坡度的坡面, 单元流域的土层厚度和土壤的特性假定具有均一性; ②单元流域的产流量 (包括地表径流、壤中流和地下径流) 全部经过河道进入下一个单元流域, 即单元流域只有一个水流出口, 不同单元流域的地下水相互独立, 仅通过地表水系统相互作用; ③若单元流域内存在水库, 假定水库位于单元流域的出口处, 并作为一个独立的对象; ④若考虑灌溉影响时, 灌溉用水量平均分配到单元流域上, 并按相同深度的降雨进行处理。以上假设基于单元流域或网格的一致性, 为基本假设。另外, 分布式水文模型力图在水文物理描述基础上, 吸收水文系统理论的优点, 合理处理水文资料不足对分布式水文模拟带来的困难和不确定性。在具体水文过程的模拟上, 不同的模型还存

在各自特定的假设。

分布式水文模型的结构,一方面取决于建模目的或模型的用途,面向洪水预报和面向水资源管理的模型在结构与参数上、时空尺度上具有很大的差异性;另一方面取决于建模方式与流域离散化方法。目前,分布式水文模型尚无一个完善的统一模式,其原因在于水文循环过程的复杂性和流域下垫面条件的复杂性。关于水文过程复杂性,一种解决的途径就是抓住水文循环的区域特征,并找到关键的水文过程(Hydrological Dominant Processes),从而简化水文模型。事实上,新安江模型对湿润地区降雨下渗过程的简化就是一个典型的关键过程概念(Dominant Process Concept)的应用^[9]。但在半干旱和半湿润地区,土壤-植物-大气系统中的水分转换过程是关键,特别是对植物生态耗水和农业水资源消耗而言。关于流域下垫面的复杂性,目前已经有许多成功的尝试,如 TOPMODEL 中采用的地形参数、GBHM模型中采用的地貌参数,以及地貌分形理论的应用等。

分布式水文模型虽然有不同的建模目的和方式,可以采用不同的流域离散化方法,但模型的基本结构却大同小异。模型所涉及的水文物理过程主要包括降水、植被截留、蒸散发、融雪、下渗、地表径流和地下径流,各部分的联系如图 1-1 所示。

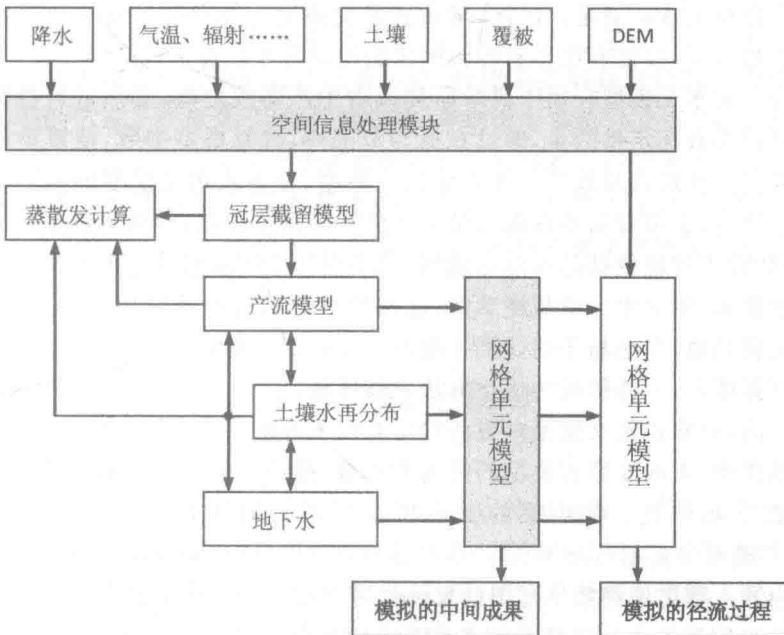


图 1-1 分布式水文模型的通用结构

分布式水文模型按照系统内部功能的聚集程度,可以划分成功能相对

独立的子系统,每一个子系统实现了对水文循环某一环节的数学描述。分布式水文模型的通用功能模块有:①一维降水冠层截留模型;②一维辐射传输模型;③一维蒸散发模型;④一维融雪模型;⑤一维包气带水分垂向运移模型;⑥一维河流/渠道模型;⑦二维表面漫流模型;⑧二维饱和壤中流/地下水模型等。如果模型考虑水质和土壤侵蚀问题,还应包括:①一维包气带内溶质运移和化学反应过程模型;②三维饱和带内溶质运移和化学反应过程模型;③土壤侵蚀和沉积物运移模型等。分布式水文模型通过上述子系统描述水文过程的各个重要环节,如融雪过程、冠层截留、蒸散发、地表漫流、渠道汇流、不饱和与饱和土壤水分运动等。

1.4 参数确定

与传统集总式水文模型不同,分布式水文模型的参数是一个反映流域下垫面和气象因素空间变化的数集。传统集总式水文模型的参数一般是通过历史系列数据进行优化率定。显然,用传统最优化方法率定分布式水文模型的参数,在数学上很难通过。而且,受测量技术的限制,所需的足够历史系列数据也难以满足。因此,分布式水文模型的参数要求应尽量具有明确的物理含义,以便利用容易得到的流域空间分布信息进行确定和计算。

分布式水文模型在用于科学研究或者生产实践之前,必须进行参数标定。所谓参数标定指的是,通过在适当范围内,调整模型参数,使模型的预测结果更加接近观测数据。相对集总式模型,分布式水文模型的参数标定有以下特点:①模型需要标定大量空间位置的多个参数,而观测数据非常有限,例如降水和流量都是有限点观测;②模型的参数取值受到模型计算单元尺寸的影响,例如水力学粗糙系数;③模型参数具有明确物理意义,尽管难于确定精确值,但是易于估计变化范围^[10],例如土壤水力学性质;④参数优化计算强度大,一些传统的优化方法不能胜任。

目前,分布式水文模型参数的确定有以下方法:①在单元上采用传统的概念性模型,不改变原有模型的结构和参数,但每一个单元上水文模型的参数值随空间变化。参数值的大小根据空间信息图进行分类计算。如 SWAT 模型中利用 SCS 模型计算产流时,CN(Curve Number)值是根据土地利用和土壤类型等数字地图信息分类进行确定的。②重新设计单元水文模型的结构与参数。尽量选择或者重新构造既反映空间变化,又具有物理意义,且便于计算的指标作为模型的参数。如 TOPMODEL 提出了一个能够反映流域下垫面空间变化的地形指数,并利用 DEM 计算地形指数,根据

地形指数分类进行产流计算。③将原有模型的参数同易于获取的空间指标(主要是通过 RS 图像或者 DEM 提取的空间指标)建立起某种对应关系(一般是统计关系),从而得到分布式水文模型的参数计算方法。如计算冠层截留和蒸散发时需要 LAI(Leaf Area Index)的空间分布信息,而 LAI 与 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)具有简单的对应关系,很容易通过 RS 手段得到。如姜红梅等^[11]将遥感技术和模型参数率定结合起来进行洪水模拟。

模型参数率定与验证需区分自然变化(如气候变化)与人为活动(土地利用、耕作方式、引水工程等)的影响结果。对于短期水文影响研究,由于气候变化不明显,可以忽略不计,但对于长期水文影响研究,需考虑气候变化的影响,进一步探讨土地利用变化对水文的影响的贡献率。近年的研究已考虑到了气候变化与土地利用变化对水文影响的定性比较^[12],缺乏定量化的分析。国内的曾涛等^[13]利用分布式水文模型,研究出山西省近 40 年来的径流衰减量中,气候因素与下垫面变化的贡献比约为 4:6。陈军锋等^[14]选择了长江上游的一个中等流域,分析其 40 年来的气候波动以及土地覆被变化情况,得出由于气候波动造成的径流的变化占 3/5~4/5,由于土地覆被变化所造成的径流的变化占 1/5。

目前,集总式水文模型参数标定的研究和讨论已经相当丰富,但针对分布式水文模型标定方法的研究,尚处在起步阶段^[15]。分布式水文模型明确的物理意义和微分方程日益广泛地应用,使得其参数标定研究可以借鉴大气模型的已有工作成果,伴随模型方法、自动微分理论以及 Kalman 滤波方法已经用于分布式水文模型的参数率定和实时更新。伴随模型是描述水文过程的微分方程在已有数据集上的反向表达,并受一定优化条件限制。Vieuxetal^[16]曾经应用伴随方法,计算成本函数的梯度来优化分布式水文模型的参数,取得了很好效果。

1.5 单元划分

在传统集总式水文模型中,往往忽略或以简单的蓄水容量曲线(或下渗容量曲线)来反映流域下垫面(如地形、土壤、植被覆盖等)的空间变异性,而几乎不考虑气象因素(如降水、气温、辐射等)的空间分布对流域水文循环的影响。在现代分布式水文模型中,对流域下垫面和气象因素的空间变异性的响应,一般是通过将流域离散成若干子单元(子单元也可进一步细分)的方式进行。目前,基于 DEM 的流域离散化方法主要有 3 种:网格、山坡和

子流域。

1) 基于栅格 DEM 将研究区域(或流域)划分为若干个大小相同的矩形网格,是分布式水文模型比较常见的做法。该种划分方法视研究区的不同,又可细分为两类:一类是对于较小的实验场或小流域(如几百平方千米以内),直接用 DEM 网格划分。每个网格的大小一般为 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 、 $50\text{m} \times 50\text{m}$ 等。该类方法在一些小流域分布式水文物理模型(如 SHE 模型等)中比较流行。另一类是针对几十万到几百万平方千米的大流域,如一些大尺度的分布式水文模型,通常将研究区划分为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 或更大的网格。每个网格单元根据 DEM 分辨率和模型精度要求,又可分为更小的网格。

2) 将分布式水文模型的最小计算单元落脚于一个矩形坡面,是分布式水文模型中关于流域离散的又一种常用方法。首先,根据 DEM 进行河网和子流域的提取。然后,基于等流时线的概念,将子流域分为若干条汇流网带。在每一个汇流网带上,围绕河道划分出若干个矩形坡面。在每个矩形坡面上,根据山坡水文学原理建立单元水文模型,进行坡面产汇流计算。最后,进行河网汇流演算。

3) 基于 DEM 能够自动、快速地进行河网的提取和子流域的划分。将研究流域按自然子流域的形状进行离散,划分为下垫面特征相对均匀的子流域,这些子流域再与干流河道相联结。把子流域作为分布式水文模型的计算单元,其最大好处是单元内和单元之间的水文过程十分清晰,而且单元水文模型很容易引进传统水文模型,从而简化计算,缩短模型开发时间。当然子流域还可以根据需要进行第二级的划分。

4) 水文单元划分不局限上述 3 种情况,也可以是它们的组合,如子流域和网格相结合等。在流域离散时,还有其他单元划分方法、典型单元面积 REA(Representative Elemental Area)、水文响应单元 HRU(Hydrological Response Unit)、分组响应单元 GRU(Grouped Response Unit)、聚集模拟单元 ASA(Aggregated Simulation Area)、水文相似单元 HSU(Hydrological Similar Unit)等。

1.6 算法实现

黑箱模型、概念模型和物理模型分别代表确定性水文模型的不同发展阶段。黑箱模型基于传输函数,几乎没有任何物理意义;概念模型处于完全物理描述和经验式黑箱分析的中间位置;基于物理的水文模型建立在人们对控制流域响应的水文过程的物理认识的基础上。由于流域的水文异质

性,物理模型必须对流域进行离散化,使得模型计算单元内的水文性质满足物理学的均一性要求,因而,物理模型是空间分布式的模型。分布式物理模型能够模拟整个径流过程,可以预测多个水文变量(如径流量、土壤含水量以及蒸散发等)的时空格局。在分布式模型中,物质、能量和动量的传输直接应用控制微分方程描述,例如应用 St. Venant 方程描述坡面漫流、应用 Richard 方程描述包气带水分运移以及应用 Boussinesq 方程描述地下水流动。分布式模型中的偏微分方程多采用数值解,如有限单元法和有限差分法。因此,相比于集总式概念模型,分布式模型需要更多的计算时间和性能更好的计算机。

从程序实现的角度,分布式水文模型的结构可以分解为计算单元上的一维通量过程和计算单元的能量、物质空间集总过程。一维通量过程包括功能结构划分中的各个一维模型,即在计算单元上,分布式水文模型要实现降水截留计算、蒸散发计算、边界层短波辐射传输以及长波辐射计算、降水下渗计算和产流计算。在计算单元空间集总过程中,要实现功能模块中的二维和三维模型,如表面漫流模拟、饱和带土壤水/地下水运移模拟,如果模型涉及水质问题,还需要模拟空间上溶质和沉积物的运移。模型单元的计算结果通过空间集总,最终通过一维河流/渠道模型,给出流域出口断面的流量。分布式水文模型的功能结构通过子程序设计实现,其程序结构通过多重循环实现,模型单元的计算过程位于多重循环的最里层。

基于 DEM 的分布式水文模型在程序上一般分为三大部分:①分布式输入模块,用于处理流域空间分布信息,为水文模块提供空间输入数据和确定模型参数的信息,也是同 RS 和 GIS 相连接的接口部分。目前,降水、气温和辐射等分布信息主要通过空间插值模型来获得。有关土壤和植被的分布数据主要利用遥感技术获得。②单元水文模型,是坡面产汇流计算的核心部分。在第一类分布式水文模型中,一般基于网格单元建立水力学模型,采用简化的圣维南方程组进行网格单元汇流计算。在第二类分布式水文模型中,一般采用水文学方法建立概念性模型,产流计算可以采用经验方法或下渗公式;汇流计算一般采用等流时线、单位线或地貌学方法^[17]。③河网汇流模型。有些基于网格的分布式水文模型忽略了该部分。河网汇流演算一般采用动力波方法和类似马斯京根方法。

1.7 资料及其他

松散耦合型和半分布式模型相对而言结构简单,在集总式模型的基础