



华夏英才基金学术文库

李 兰 著

有物理基础的LILAN 分布式水文模型



科学出版社



华夏英才基金学术文库

有物理基础的 LILAN 分布式水文模型

李 兰 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了有物理基础的 LILAN 分布式水文模型 (简称 LL 分布式水文模型) 的理论、方法和应用实例。全书共 13 章, 包括水热循环物理过程的数学模型、参数识别、水文反问题模型与数值解法、多源数据融合方法、雷达测雨与降水空间变异、日时间尺度的水动力学机制分析、分布式降水降雪融冰模型与应用、LL 分布式水文模型在洪水预报与水资源管理中的应用、分布式水文模型比较研究。

本书可供水文水资源、水利、地理、气象、环境、林业、农业、全球变化等领域广大科技工作者、工程技术人员参考使用, 也可以作为高等院校高年级本科生和研究生的教材与参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

有物理基础的 LILAN 分布式水文模型 / 李兰著. —北京: 科学出版社, 2012. 12

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-036271-1

I. ①有… II. ①李… III. ①水文模型 IV. ①P334

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 314490 号

责任编辑: 朱海燕 吕晨旭 王淑云 / 责任校对: 李 影

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

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>

骏杰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013 年 5 月第一次印刷 印张: 13 1/4 插页: 12

字数: 289 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

20 世纪以来,水资源危机日益突出,流域水文模型始终是水文科学研究和水资源利用的重要手段与方法之一。为了适应气候变化和人类活动影响下的水文水资源研究之需,流域水文循环的模拟已从集总式模型扩展到基于 DEM 的分布式水文模型。分布式水文模型是现代水文学同高科技(如计算机技术、3S 技术等)相结合的产物,是研究变化环境下水文循环与水资源演化规律的理想工具,代表了水文模型的最新发展方向。近年来,流域模拟面临着许多新的挑战,包括需要处理空间变化和尺度的问题,需要明确考虑水文、地球化学、环境生态、气象之间的耦合。而现有的水文模型(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,无法适应上述挑战。基于 GIS 的有物理基础的分布式水文模型是从水循环的动力学机制来描述流域水文问题,且能够分析流域下垫面变化后的产汇流变化规律的数学模型,是当前地球科学领域中研究的热点、难点和重点。

水文过程十分复杂,人们至今还不能用数学模型严格地描述水循环中的每个子过程。分布式水文模型的发展有助于人们进一步了解水文循环中物理要素的时空变化过程。与传统水文模型相比,它具有以下显著的优点:①具有物理基础,能够描述流域内水文循环的时空变化过程,有助于了解水文时空变异性,加深人们对水文机理的了解,促进水文学科发展;②数值解与计算单元网格化能够满足山洪、水污染、水土流失、全球变化、生态环境保护的需求;③因为很方便集成 DEM、RS、GIS、雷达测雨多数数据源,所以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;④分布式水文生态模型的结构较严谨,参数的物理意义明确,可以利用常规理论来描述各水文要素的变化过程,可以在资料缺乏的地区建模和使用。

本书作者开发了具有国际影响的有物理基础的 LILAN 分布式水文模型,在理论方法、建模技术与高新技术集成等方面具有重大创新,所研发的 LL 分布式水文模型还两度参加“国际分布式水文模型比较计划”,美国气象局在 *Journal of Hydrology* 杂志曾撰文介绍 LL 分布式水文模型。该专著技术资料齐全,既有理论成果,也有应用成果,内容翔实,是相关理论与方法的总结。作者通过发展相关交叉学科理论、融合高新技术信息源与生产应用等途径,系统研究了有物理基础的分布式水文模型理论与集成方法,特别是解决了超蓄兼容产流模式构建、坡地汇流理论、地表水与地下水交换、流域水动力学数值算法、高新技术集成应用、分布式水文动态参数\单宽入流\上游水源单宽入流\实时校正等的反演算法的关键科学技术问题,取得了一批重要研究成果,为分布式水文模型与 GIS、遥感、雷达测雨等高新技术信息的融合和流域水热循环及相关科学问题的数值计算提供了一个有效的框架与平台。

该书所介绍的模型为解决无资料的中小流域洪水预报问题提供了分解法成功案例,所应用流域的洪水预报方案达到国家防汛抗旱总指挥部办公室(后简称国家防办)规

定的考核乙级以上标准。作者还就气候自然变化和人类活动影响二元驱动条件下的水、热循环问题和水资源预测与评价方面进行了有益的探索研究。作者所开发的 LL 分布式水文模型紧密集成 GIS、RS、GPS、雷达测雨等高新技术，开发了操作方便、计算可靠的数字流域洪水预报系统、数字水库防洪调度系统、LL 分布式水文模型系统、雷达测雨定量分析系统。编制的数字流域相关专业软件已应用于实际流域洪水预报、防洪调度、发电调度、水资源管理等方面，加强了水文预报和水资源预测成果的可视化，提高了数字流域现代化管理水平，取得了一定的防洪效益、经济效益和社会效益。

该专著涉及成果内容丰富、创新显著，在较多流域防洪减灾和水资源管理中有推广应用，是一部值得推荐的参考书。

张勇传院士

2012 年 10 月 10 日

序 二

水循环指地球上的水经过水汽输送、降水、蒸发、植物蒸腾、下渗、地表径流、壤中流、地下径流等环节，在水圈、大气圈、岩石圈、生物圈中进行连续运动的过程。流域水文模型是描述地球系统水循环过程的重要工具，目前主要应用于水文模拟预报、水灾害防治、水资源利用与管理、气候变化、水土流失与山洪防治、非点源污染治理、生态规划与保护、森林资源管理、农业生产等与水相关的领域。气候变化和人类活动影响共同作用于流域水循环，导致地球上流域水循环十分复杂，水文工作者不得不采用经验模型、系统模型和概念性模型对上述各种水文过程加以概化和简化。GIS、RS、GPS、计算机、雷达测雨等高新技术的迅猛发展，加上 20 世纪 70 年代以来的大量野外水文试验观测，为分布式水文模型的研究奠定了基础，促进了有物理机制的分布式水文模型的快速发展。分布式水文模型成为当前水文最热门的研究领域之一。

当前我国面临水资源短缺、气候变化、人类活动影响、水污染等多方面的问题，一方面水资源是生命系统的血液，是人类经济发展不可取代的资源；另一方面，水循环又受到人类活动的严重干扰，人们通过修建水坝、引水灌溉、土地开发利用、森林砍伐、城镇化、工农业生产等方式改变了天然水循环路径和再分配过程。降水的空间变异性、人类活动和流域地形、地貌、土壤质地等的空间分布性，导致水文过程呈现空间分布结构。因此，研究分布式水文模型是水文学科发展的重要里程碑。自 2000 年开始由美国气象局水文实验室主持的“国际分布式水文模型比较计划”专门讨论了有物理机制的分布式水文模型的构建复杂程度问题，与会水文学专家认为能够描述水文实际物理机制的模型才是研究方向。

水循环涉及海陆空大循环，传统的水文模型因集总模式与气候模型、基于水动力学的地下水模型和河湖水动力学模型的网格化都存在不匹配不相容问题。基于水动力学的地下水模型存在输入简化问题，仅采用降雨入渗系数确定上边界条件和输入资料太多，未解决地表水与地下水交换问题；流域地面由于植被和地形变化，水流多呈现细沟流，不易出现片流，不能直接搬用河流水动力学建模。该书作者以上述前沿难题为中心，基于河流水动力学、土壤水动力学和山坡水文学等原理，推导出一系列对流扩散方程组，自成体系构建了既有水动力学基础又需要较少水文资料、有物理机制的 LILAN 分布式水文模型，较好地解决了地表水与地下水、流域单宽入流与河川径流交换问题；并提出分布式水文参数反演方法，解决了水文非线性、不适宜性和多参数维灾问题；LILAN 模型研发出全套集成流域、子流域、网格单元多技术格式的三级框架体系，增加了水文空间尺度处理的灵活性和可行性。该书有物理基础的模型既有理论，又有大量水文水资源研究应用案例，推进了水文科学研究和发展。

该书告诉我们水文科学是如何创立的，这就是多学科交叉研究的完美结合。该书开辟了构建有物理基础的分布式水文模型的新途径。其精深的独创性以及对地球水循

环的深刻理解和精辟的分析，对水文学学科发展和水资源科学利用将产生重要影响。同时，书中的创造性思维正是发展科学的活力，是值得提倡的。该书内容将为更多研究与水相关的人员提供参考与借鉴。

王光谦_{院士}

2012年8月13日

前 言

水文学作为地球物理学的一个分支,是探求任何给定的时空尺度内水平衡动力学以及水热循环与地球生命系统之间物理的、化学的、生物的传输关系的一门科学。水是地球生态系统的生命血液,水的各种形态几乎在地球系统的各个方面都扮演着举足轻重的角色,任何旨在描述全球系统的模型必须提供一些水文过程的描述。随着 GIS 技术、遥感技术、雷达测雨和计算机技术的快速发展,流域水资源智能化管理已经成为一种新的发展趋势,与之匹配的是基于 GIS 的流域分布式水文物理模型,它不仅将为流域管理决策提供重要的预测信息,而且还是水资源管理和水环境生态保护的重要工具。

我国实际洪水预报和水资源管理应用的流域水文模型主要是经验水文模型、概念性水文模型、系统水文模型,或基于上述模型与 GIS 结合的半分布式水文模型。随着干旱预报、水资源管理、生态环境保护的需求,流域水资源智能化管理已提出更高的要求,与之匹配的是有物理基础的流域分布式水文模型。分布式水文模型通过划分栅格(或三角网)、子流域等计算单元,具有融合 GIS、RS、雷达测雨等空间分布信息的优势。分布式水文模型的空间分布结构是研究流域水文规律的重要工具,能够解决流域内部小流域无资料水文计算问题,特别是在人类活动干扰下的水循环和干旱、水资源模拟预测等问题;方便与气候模式耦合研究全球变化问题;还可以与土壤侵蚀模型和水质模型结合研究水土流失预测、山洪预警和非点源污染问题。因此,近年来分布式水文模型已经成为热门研究领域,发表了大量相关论文和一批著作。

美国国家气象局高度重视分布式水文模型比较计划的研究,2000~2011 年,曾经连续举办了两届“国际分布式水文模型比较计划”,具有自主知识产权的 LILAN 分布式水文模型(简称 LL 模型)是我国唯一参加“国际分布式水文模型比较计划”(简称 DMIP)的模型。DMIP 第一期参加的有美国、丹麦、中国等 12 个分布式水文模型。DMIP 第二期参加模型达 30 多个,参与国家达 8 个。相关 DMIP 成果由美国国家气象局在 *Journal of Hydrology* 上进行了专门介绍。DMIP 就目前水文模型研究与应用中的一些焦点问题进行了讨论。讨论的焦点问题之一,就是分布式水文模型是采用复杂的水动力学模型合适还是简化的水文模型合适。LL 模型选择了面物理量流量为状态变量的对流扩散方程组的模型结构,大大简化了数值计算存储容量和计算速度慢的难题,模型既有物理基础,又是简化的水动力学模型结构。流域水文模型还面临尺度、非线性、不适定性、参数等效性、多参数“维灾”和随机性等问题。LL 模型从模型结构上看,很多参数是水文物理量,如壤中流和地下水的波速、土壤水扩散系数和导水率等,它们随土壤含水率的时空尺度而变化。有些经验系数和物理参数根据遥感信息和 DEM 确定空间分布性,另一些水文分布参数采用反演方法求解(涉及处理非线性、不适定性、等效性和维灾问题),流域采用三级划分单元框架体系方便多尺度确定参数,从多

角度解决上述水文难题。

Vieux 于 2001 年指出具有物理基础的分布式水文模型是通过求解基于质量与能量守恒定律推导出的控制方程来实现的,本书在这方面推导出大量控制方程结果。作者多年研究有物理基础的分布式水文模型的结构、陆-气水热循环相互作用、水循环及水生态环境变化中的人为影响因素定量化、洪水与干旱预报、降水-降雪-融冰-桃汛预报、水资源预测与配置、分布参数确定、水文尺度转换、水文非线性、参数不适定性、参数等效性、在自然水循环和人工水循环二元驱动条件下水资源的多源数据融合与多应用模型集成方面的内容。本书主要研究成果如下:

(1) 以陆-气水热循环、能量平衡和水量平衡为基础,以土壤湿度为核心,建立了超渗与蓄满兼容的变动生态产流模式。

(2) 克服了点尺度物理量(流速、水深)无法外推的尺度问题缺陷,发展了以面水文物理量(流量)来描述流域关键物理过程的对流扩散偏微分方程组,从理论上阐明了地表水与地下水交换,推导 LILAN 全套水动力学汇流模型方程组。

(3) 将数学物理反问题与分布式水文模型结合,基于水动力学的洪水实时校正反演算法-单宽流量反演算法-水文分布参数反演算法等方面做了深入研究,提出了数值反演算法,克服了多维参数优选的“维灾”和非线性难题。

(4) 在分布式水文模型中的时间尺度与空间尺度关系和日尺度水动力学机制方面开展了研究,建立了坡面流、壤中流、地下径流、河网径流的波速与时间尺度和空间尺度的关系式。

(5) 建立了单元栅格、子流域和流域三级划分框架体系的尺度问题解决方案,使得物理参量的尺度选择灵活多变。

(6) LILAN 模型实现了以小时尺度、日尺度等多时间尺度的多年连续运算,为干旱预报和水资源预测建立了模型。

(7) 开发雷达测雨信息提取模式和软件系统,将雷达测雨与分布式水文模型结合应用。

(8) 开展了大量分布式水文模型的比较研究,参与了国际分布式水文模型比较计划 10 年, LILAN 模型应用于美国的 Blue 河流域和 Baron Fork 河流域进行小时径流 10 年连续模拟取得较好效果。

(9) 在我国洪水预报、水资源演变、水资源评价与配置等方面有大量推广应用:自 1997 年开始将 LILAN 分布式水文模型应用于我国丰满水库防洪调度系统以来,已经在我国近 30 个流域有推广与应用研究,模型方案精度全部达到国家水文预报应用乙级以上标准要求。

(10) 开发了一系列基于 GIS 和分布式水文模型的水文软件。

全书共分 13 章:第 1 章为水文模型研究进展;第 2、3、8、9 章为模型结构;第 4、5 章为参数识别和水文反演;第 6、7 章为多源数据融合;第 10~12 章为模型应用;第 13 章为分布式水文模型比较。本书内容是作者带领诸多研究生历经 10 年(1997~2006 年)的研究与应用过程中所积累的成果,胡建华、张东方、武见、王欣、王万、朱芮芮、钟明军、刘晓莽、张俐、李艳萍、董红、刘战友等研究生为本书 LILAN 分布

式水文模型的应用研究、模型比较研究与成果整理做了大量深入工作,其中武见博士对降水降雪耦合模型的建立付出辛勤劳动,在此一并表示感谢!

本书也是项目组多年课题的研究成果的总结,LILAN模型在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”(编号:G1999043606)第一课题“黄河流域水循环动力学机制与模拟”和第二课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”得以应用和发展。作者参加国家重点基础研究发展规划“973”项目“长江流域水沙产输及其与环境变化耦合机理”(编号:2003CB415206)中的第六课题“流域生态与水利工程优化调控”,主持了国家自然科学基金“基于GIS的有物理基础的分布式降水径流模型研究”(编号:50279034)、“基于GIS的非点源污染建模理论与方法研究”(编号:50549017)、“水环境容量和水污染控制反问题的理论和方法研究”(编号:59579022),与美国Oklahoma大学土木工程与环境科学系国际合作研究“分布式水循环机理研究”(编号:5027903401)、中国教育部“数字水资源预测预报模型研究”(编号:20050360668),以及水利部和国家防办支持项目“陕北桃曲坡水库调度综合自动化系统”(2005.1~12)、“黄柏河流域及东风渠灌区水资源管理系统”(2003.10~2004.11)、“数字增江流域洪水预报系统”(2003.8~12)、“新疆卡浪古尔水库调度综合自动化系统”(2002.7~2003.6)、“安徽龙河口水库调度综合自动化系统”(1999.12~2000.6)、“丰满水库调度综合自动化系统”(1998.1~1999.9)、“北京怀柔水库调度综合自动化系统”(2001.12~2002.12)等一系列的科学研究和应用,丰富和发展了LILAN分布式水文模型。

在本书出版之际,对中央统战部华夏英才基金委员会、湖北省统战部、武汉大学统战部、清华大学王光谦院士、华中科技大学张勇传院士对本专著出版的关心和支持表示衷心的感谢!LILAN模型研究过程中特别得到了中国科学院刘昌明院士和中国水利水电科学院王浩院士、湖北省郭生练副省长的项目合作资助和武汉大学水电学院各级领导以及水利界使用LILAN模型的应用单位同行的支持,在此表示深深的谢意!

希望本书的出版对相关学科专家、工程师、研究生和本科生等研究人员系统研究水文规律,全面了解流域水循环、水资源利用、环境生态保护的科学问题、水资源管理及防灾减灾应用有所裨益。

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,恳请读者和国内外水文专家探讨与批判指正。

作 者

2012年8月

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 概论	1
1.1 流域水文模型研究进展	1
1.2 LILAN 分布式水文模型研究进展	7
1.3 分布式水文模型研究意义	11
1.4 关键问题	13
1.5 主要研究成果	15
第 2 章 LILAN 分布式水文模型产流原理	16
2.1 土壤-植被-大气-水能循环系统	17
2.2 模型总体结构	18
2.3 截留子模型	22
2.4 热传输子模型	29
2.5 土壤水扩散子模型	34
2.6 入渗子模型	40
2.7 蒸发子模型	45
2.8 能量平衡子模型	53
第 3 章 水循环系统汇流模型	59
3.1 径流形成与径流分类	59
3.2 坡面流	60
3.3 壤中流	60
3.4 地下径流	60
3.5 河网汇流	61
3.6 对流扩散方程组在分布式水文模型建模中的应用	63
第 4 章 参数识别	65
4.1 LL-Ⅲ 分布式水文模型	65
4.2 水文模型的参数识别方法	66
4.3 模型评定标准	69
4.4 应用实例	69

第 5 章 水文反问题模型与数值解法	74
5.1 分布式水文模型反演技术简介	74
5.2 分布式水文反问题模型	74
5.3 LILAN 分布动态参数反问题	75
5.4 单宽入流过程和上游入流过程反问题	79
5.5 水动力学实时校正反问题	80
5.6 应用实例	83
5.7 扩散波的时空反演实时校正技术计算实例	87
第 6 章 多源数据融合方法	90
6.1 基于 DEM 的水文分析	90
6.2 基于 DEM 的流域数值演算排序	91
6.3 土地利用遥感资料和土壤质地数字化信息的应用	96
第 7 章 雷达测雨与降水空间变异	104
7.1 雷达测雨定量估算	104
7.2 部分运行界面	110
7.3 水循环要素空间分布	112
7.4 气温空间插值	117
7.5 蒸发空间分布	117
7.6 雷达测雨面雨量计算实例	117
7.7 降水空间插值与变异分析	118
第 8 章 日时间尺度的水动力学机制分析	123
8.1 坡面流水动力学分析	123
8.2 壤中流水动力学分析	124
8.3 地下径流水动力学分析	125
8.4 结论	125
第 9 章 分布式降雨降雪融冰模型与应用	126
9.1 分布式降雨降雪混合径流模型	126
9.2 冰凌预报	128
第 10 章 LL-I 分布式水文模型及其应用	132
10.1 LL-I 分布式水文模型在丰满水库应用	132
10.2 LL-I 分布式水文模型在龙河口水库防洪调度中的应用	134
第 11 章 LL-II 分布式水文模型及其应用	136
11.1 LL-II 分布式水文模型	136
11.2 LL-II 分布式水文模型在增江流域洪水预报中的应用	138

第 12 章 LL-Ⅲ 分布式水文模型在水资源管理与防洪减灾中的应用 145

12.1 LL-Ⅲ 分布式水文模型 145

12.2 LL-Ⅲ 分布式水文模型在无定河流域的应用 150

第 13 章 LILAN 分布式水文模型与国内外模型比较研究 170

13.1 有物理基础的 LILAN 分布式水文模型与概念性分布式水文模型比较
研究 170

13.2 LL-Ⅱ 和 LL-Ⅳ 模型在 DMIP 中的比较研究 179

参考文献 191

彩图

第 1 章 概 论

1.1 流域水文模型研究进展

水文学作为一门专业研究领域和自然科学基础学科,几十年来一直是由水文科学家和地理学家大力推动和发展起来的科学体系。水旱灾害、全球变暖、环境污染、生态破坏、水土流失、山洪和水资源短缺等问题日益突出,这些问题均与水有关,它们的需求正在推动水文学科和流域水资源管理的快速进步。

美国国家气象局(NWS)高度重视分布式水文模型比较计划的研究,于2000~2004年和2005~2011年连续举办了两届“国际分布式水文模型比较计划”,LILAN分布式水文模型(简称LL模型)参加了“国际分布式水文模型比较计划”(简称DMIP)的第一期、第二期。DMIP第一期参加的有美国、丹麦、中国等12个分布式水文模型。DMIP第二期参加模型多达30个,相关DMIP成果由美国国家气象局在*Journal of Hydrology*上进行了专门介绍。DMIP就目前水文模型研究与应用中的一些焦点问题进行了讨论。讨论的焦点问题之一,就是分布式水文模型是采用复杂的水动力学模型合适还是简化的水文模型合适。流域水文模型还面临尺度、非线性、不适定性、参数等效性、多参数“维灾”和随机性等亟待解决的科学问题。

1.1.1 流域水文模型

流域水文模型一直是水文科学家研究与应用的重要工具。由于流域的复杂性,科学家很难从物理意义上建立模型描述降水落在地面上的水流运动过程。因此,2000年以前,大中流域洪水实时预报几乎都是采用概念性水文模型、系统水文模型和经验统计模型。Freeze和Harlan于1969年最早提出分布式流域水文模型概念,描述了分布式水文模型的应用前景(Freeze and Harlan, 1969)。到1995年,分布式水文模型研究发展缓慢,处于研究探讨时期。1996~2000年是分布式水文模型应用探讨期,这一时期大多数研究成果是应用于较小流域(大多应用于 10km^2 以下的实验流域)。GIS技术、遥感技术、雷达测雨和计算机技术的快速发展,为水文模型建模带来了新的发展机遇,美国国家气象局2001年开始实施“国际分布式水文模型比较计划-I期”,探讨有物理基础的分布式水文模型和半分布式水文模型之间的主要区别,以及雷达测雨、3S技术与水文模型的结合研究,开始在试验流域加测流域中间站点的水文过程,以便检验分布式水文模型的精度和有效性。2003~2004年,美国130多个水文预报中心已经安装了Vflow分布式水文模型洪水预报系统。此时,美国雷达测雨、数字高程、土地利用遥感信息和土壤质地数字化等数据库已经在互联网上公开使用。美国国家气象局于2005年开始实施“国际分布式水文模型比较计划-II期”,继续探讨如何改进有物

理基础的分布式水文模型和雷达测雨估算问题。流域水资源智能化管理已经成为一种新的发展趋势,与之匹配的是基于 GIS 的流域分布式水文模型,它不仅将为防洪减灾、流域管理决策提供重要的预测信息,也是水资源保护、水环境生态保护的重要工具。

传统的流域水文模型不考虑流域内部的空间差异对流域水文过程的影响。流域上的降水扣除蒸发、截留和下渗中的损失项后就产流,产流过程中适当考虑对包气带缺水过程的补充,这方面的考虑也十分粗糙,水文产流模式基于蓄满产流和超渗产流的概化,或者雨强超过下渗率就产流,或者流域全部蓄满后才产流,两者不能兼容。而蒸发、截留和下渗都与流域湿度有关,流域湿度简化成前期影响雨量或流域蓄水量。汇流过程中常将流域坡地汇流忽略不计,只注重研究水流汇入河道后的水文过程,包括河道内的流量变化、洪峰形成、洪水位过程等。它通过水文观测站长期观测的河流断面洪水流量和水位的变化过程,拟合水文模型的参数,以预报河流洪水位和径流过程。模拟预测水资源的模型则更加简单,主要关注月平均径流的模拟预测,典型的有 SCS 模型,简化为一个参数和简单的经验关系式,即在很大程度上把流域看成一个黑箱,只有降雨输入和径流输出,无法反映流域内部自然因素和人类活动对流域水文过程的影响(张世强,2003)。

流域尺度的水循环研究应该能够反映不同下垫面类型、供用耗排、水库闸坝调控、植被生态等对水循环的影响,通过模型把不同尺度的水文过程和不同维数的水动力学方程耦合起来,以模拟多尺度水文过程的时空分布与变化。由于地球生态系统中水循环和地形地貌的复杂性,要严格从数学物理意义上描述水循环过程比较困难。因此,以往的水文学者们受到计算条件、实验技术和计算技术的限制,更多应用是解决流域洪水、干旱及供水、水利工程设计等流域尺度上的工程水文问题。所采用的水文模型是计算量较小的概念性水文模型、系统水文模型、随机水文模型和统计水文模型,因此,水文科学在地球科学中的作用受到限制。

随着 3S 技术和计算机软硬件的迅猛发展,作为研究地球上水的循环转换及分布规律的水文学面临着挑战和发展机遇。基于 3S 技术和分布式水文模型理论与方法,水文学家能够得心应手地来研究多尺度(全球尺度、大尺度和中小尺度)的水循环问题。信息技术和模拟技术不断提高,如应用地理信息系统 GIS、卫星遥感资料和土壤水同位素监测,可获取更多的信息源。多源数据融合是流域水文模型发展的一个趋势。尽管遥感在很大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或多变量或参数化的流域水文模型成为可能。

水文与其他学科不断交叉渗透正在成为 21 世纪水文学的主要研究内容。水文学是地球科学的一个重要组成部分,地圈、水圈、气圈和生物圈的很多问题交融在一起,多学科的相互渗透是近代水文发展的又一突出特征。未来水文问题与环境、气候变化和全球范围的污染有关,这些水文问题需要多学科共同解决。水文学逐步与大气科学、海洋科学、生物科学、环境科学、生物能源科学联系在一起,地球上的水循环与这些学科相联系,山洪防治、污水处理、农业干旱、水质性缺水、生态恢复、温室气体减排、高产油高蛋白藻类生物质培育等都离不开水循环模拟预测、防洪调度、防污调度

和水资源调度。有物理基础的分布式水文模型将水文学与土壤水动力学、地下水动力学、放射性物理学、地球物理学、流体动力学、微气象学、植物生理学和生态学等学科联系起来开展交叉科学研究,提出很多新问题,极大地促进了近代水文学的研究和发展。与GIS结合的有物理基础的分布式水文模型是水文学发展史上的一个划时代产物。

目前,世界上各个国家的水文科学和地球物理科学的研究者们正积极探索水热循环系统、生态系统和人类影响相互作用的关系。分布式水文模型的研究与开发将在与水相关的多学科交叉研究方面发挥重要的作用。

1.1.2 不同尺度的水循环研究

目前有关水循环的研究主要集中在以下四个尺度水平上的水循环:毛管或分子水平的水循环过程、生态系统水平的水循环过程、流域尺度上的水循环过程和全球尺度上的水循环过程(于澎涛,2001)。毛管或分子水平的水循环过程的研究偏重于水动力学的研究,研究水在分子力和毛管力的作用下,在土壤-植物-大气系统内存在水势差的两点间的运动过程、运动速率及其影响因素等,该水平的水分运动过程的研究结果可以说明水分运动的机理,如土壤入渗就是由于土壤上层的水势比下层的水势高,水从土壤上层向下层运动从而形成水分的入渗(于澎涛,2001)。流域尺度的水文学研究需将多学科结合起来,特别是分布式水文模型模拟网格单元尺度上水的循环运动,综合了毛管或分子水平的水循环过程、生态系统水平的水循环过程、水动力学等领域的研究成果,又需要拓展应用到流域尺度或全球尺度上研究水循环过程,所以在方法原理上应该与微观尺度研究有所不同,因此是当前的研究热点。分布式水文模型的发展与生态水文学、森林水文学、水文学、土壤水动力学、地下水动力学、河流水动力学、气候动力学等交叉学科的发展密切相关。同时,它的发展和推广应用也与地理信息系统(GIS)、计算机技术、遥感技术(RS)的发展紧紧地联系在一起,因此是一个多学科的综合与集成。

全球尺度的水文将是包括气象、水文、土壤水、生态及众多学科的研究领域。对全球水文过程的认识、表述和模拟,向水文界提出了许多新问题,也对传统水文学提出了挑战。气候变化和人类活动将改变全球水热循环的现状,从而引起水和物质在时空上的重新分配,并对降水、蒸发、径流、土壤湿度、氮/磷/碳等要素造成直接影响。土壤水分及植被不但影响太阳辐射转化成潜热和感热、降水转化成蒸发和径流,而且陆地上土壤水分和蒸发又影响大气降水和气温的分布。而水循环的变化将进一步影响水资源管理系统及社会经济系统,如供水、灌溉、航运、洪水调度、水土保持及水污染控制等。全球气候变化将如何影响水热循环,以及水热循环的变化又怎样反过来影响气候条件的改变?这些问题的提出使原先在工程水文阶段主要着眼于工程地点控制面积上的水文情势的预测和设计,扩展到需要认真研究全球水热循环的全过程。为了确定大尺度区域水热循环及能量收支,能够根据大气环流模式(general circulation model, GCM)给出的气候预测,研究和解决变化环境中的水文水资源问题,评估和

分析大流域的径流过程和水资源量的动态变化规律,需要研制和建立大尺度分布式水文模型。水文学者不仅要研究水文过程,还需对陆面-大气界面上水分和能量的交换问题进行系统研究。

1.1.3 流域水文模型的研究进展

水文模型是水文学发展到一定阶段的产物,并伴随水文学的发展而发展。水文学作为一门独立的应用学科起始于1930年(Anderson and Burt, 1990)。早期的水文模型主要用于预报洪峰,洪峰预报方法最早可追溯于1851年(Dooge, 1977)。水文模型出现于1932年Sherman提出水文单位过程线的概念(Sherman, 1932),以及Horton提出经典的地表径流入渗理论以后。

流域水文模型主要分为三种类型:黑箱式、集总式、分布式(于澎涛, 2001)。早期的水文模型多为黑箱模型,把流域看成黑箱,只有输入和输出,也就是一个流域降雨与径流的统计关系,采用各种统计相关图或回归方程解决工程水文问题,这类模型又称为统计模型(于澎涛, 2001);系统水文模型和概念性水文模型属于集总式水文模型;分布式水文模型又分为有物理基础的分布式水文模型和概念性半分布式水文模型。

第一代水文模型可以追溯到20世纪50年代,随着人们对入渗理论(Horton, 1933; Philip, 1957)、河道理论(McCarthy, 1938)、土壤水运动的Richards理论(Richards et al., 1956)以及地下水运动理论的综合认识,利用最简单的数值方法和计算机进行计算的流域综合径流模型逐渐出现。Nash(1957)等对单位过程线进行了改进,提出了连续变化的暴雨响应模型。

第二代集总式概念性水文模型产生于20世纪60年代,第一个概念性水文模型是1960年建立的斯坦福模型(Linsley and Crawford, 1960)。这是一个以入渗理论、单位过程线和回归函数为基础的以日为时间步长的模型,随后又发展成为一个包含土壤水平衡、蒸散发估计以及汇流技术等以小时为步长的模型(Crawford and Linsley, 1966)。在60年代到80年代初期,出现了大量的集总概念性水文模型,如HEC、RORB、TANK、HYMO、SSARR、PRMS、ARNO、HBV模型等,我国则出现了著名的新安江模型和陕北模型(赵人俊, 1984; Zhao, 1992),我国自行研制的概念性水文模型还有姜湾径流模型、双超产流模型、河北雨洪模型、双衰减曲线模型、综合约束线性系统(SCIS)模型等。概念性水文模型得到了广泛的应用。

概念性水文模型在产流方面有一定的物理意义。但是,概念性模型因没有描述产流的空间变化,一般需要假定整个流域是蓄满产流或超渗产流,而超渗产流或蓄满产流仅能够描述同向均质土壤的一种特殊情况,陆地表面大多数是非均质土壤,存在多种产流机制,蓄满产流和超渗产流仅是流域多种产流机制的两个特例(李兰和钟名军, 2003)。集总式模型在一个流域根据长期水文观测资料建立的概念性模型,是对该流域地形、土壤、植被等众多要素及其空间特征对水文影响的概括或平均,而忽略了流域内部的水文要素的空间分布和动态过程,综合参数的物理意义不明确,只是流域水文特性的一个综合反映,无法移用于其他无资料的流域,当流域内部发生变化时也不能