

科学前沿丛书

陆面水文耦合模型与应用

余钟波 杨传国 著



科学出版社

水科学前沿丛书

陆面水文耦合模型与应用

余钟波 杨传国 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书首先论述了分布式水文模型和陆面模式的基本原理和模型架构,提出了二者的耦合方法,构建了流域陆面水文耦合模型,系统分析了耦合模型各类不确定性因素;然后以耦合模型为研究工具,探讨了气候变化和人类活动对流域水文过程的影响,并评估了卫星雷达降雨的精度及其在流域水文模拟中的适用性;最后对陆面水文未来研究方向进行了归纳和论述。

本书内容新颖、结构合理、概念清晰、写作严谨,可供从事水文水资源、水利工程、气象学、气候学、农业土木工程、地理科学等专业的科研工作者和工程技术人员参考,也可以作为这些专业的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

陆面水文耦合模型与应用/余钟波,杨传国著. —北京:科学出版社, 2017.12

(水科学前沿丛书)

ISBN 978-7-03-056111-4

I. ①陆… II. ①余… ②杨… III. ①陆面过程-耦合-研究 IV. ①P339

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第316161号

责任编辑:朱海燕 丁传标 / 责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴 / 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>

艺堂印刷(天津)有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年12月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:273 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《水科学前沿丛书》编委会

(按姓氏汉语拼音排序)

顾	问	曹文宣	陈志恺	程国栋	傅伯杰
		韩其为	康绍忠	雷志栋	林学钰
		刘鸿亮	卯智	孟伟	王超
		王光谦	王浩	薛禹群	张建云
		张勇传			

主 编 刘昌明

常务副主编 徐宗学

编	委	蔡崇法	常剑波	陈求稳	陈晓宏
		陈永灿	程春田	方红卫	胡春宏
		黄国和	黄介生	纪昌明	康跃虎
		雷廷武	李怀恩	李义天	林鹏
		刘宝元	梅亚东	倪晋仁	牛翠娟
		彭世彰	任立良	沈冰	王忠静
		吴吉春	吴建华	徐宗学	许唯临
		杨金忠	郑春苗	周建中	

《水科学前沿丛书》出版说明

随着全球人口持续增加和自然环境不断恶化,实现人与自然和谐相处的压力与日俱增,水资源需求与供给之间的矛盾不断加剧。受气候变化和人类活动的双重影响,与水有关的突发性事件也日趋严重。这些问题的出现引起了国际社会对水科学研究的高度重视。

在我国,水科学研究一直是基础研究计划关注的重点。经过科学家们的不懈努力,我国在水科学研究方面取得了重大进展,并在国际上占据了相当地位。为展示相关研究成果、促进学科发展,迫切需要对过去几十年国内外水科学不同分支领域取得的研究成果进行系统性的梳理。有鉴于此,科学出版社与北京师范大学共同发起,联合国内重点高等院校与中国科学院知名中青年水科学专家组成学术团队,策划出版《水科学前沿丛书》。

丛书将紧扣水科学前沿问题,对相关研究成果加以凝练与集成,力求汇集相关领域最新的研究成果和发展动态。丛书拟包含基础理论方面的新观点、新学说,工程应用方面的新实践、新进展和研究技术方法的新突破等。丛书将涵盖水力学、水文学、水资源、泥沙科学、地下水、水环境、水生态、土壤侵蚀、农田水利及水力发电等多个学科领域的优秀国家级科研项目或国际合作重大项目的成果,对水科学研究的基础性、战略性和前瞻性等方面的问题皆有涉及。

为保证本丛书能够体现我国水科学研究水平,经得起同行和时间检验,组织了国内多名院士和知名专家组成丛书编委会,他们皆为国内水科学相关领域研究的领军人物,对各自的分支学科当前的发展动态和未来的发展趋势有诸多独到见解和前瞻思考。

我们相信,通过丛书编委会、编著者和科学出版社的通力合作,会有大批代表当前我国水科学相关领域最优秀科学研究成果和工程管理水平的著作面世,为广大水科学研究者洞悉学科发展规律、了解前沿领域和重点方向发挥积极作用,为推动我国水科学研究和水管理做出应有的贡献。

刘昌明

2012年9月

前 言

水是维系地球上人类社会和自然生态系统正常运行的重要支撑资源。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）的最新报告表明，目前全球气候变化及其影响日趋显著，气温升高，水循环速度加快，极端天气和气候事件频繁发生，未来 100 年全球变暖和自然极端事件将进一步加剧。我国近 20 年来因洪涝造成的直接经济损失平均每年上千亿元，干旱造成的农业受灾面积平均每年高达 2000 万 hm^2 。伐林垦荒、筑坝调水、城市化等高强度的人类活动日益改变着区域下垫面面貌和自然河流系统，直接和间接地加剧了洪水泛滥、河流断流、地下水漏斗、水环境恶化等水问题。在气候变化条件下，水资源的高度时空非均匀性越加显著，未来全球水资源形势严峻。

开发大气（陆面）水文耦合模型系统，有助于提高大气模式和分布式水文模型的预报精度，提高水文模型的短期洪水预报和季度水资源预报能力，并可用于研究当前、过去和未来水循环过程对气候变化和人类活动的响应。对于实时洪水预报预警、水资源可持续利用、水文效应风险评估、缓解水资源供需矛盾，以及促进区域经济规划和发展等方面具有重要的科学意义和广阔的应用前景。

目前，多数大气模式已经实现了与陆面模式的双向耦合，建立陆面水文耦合模型成为大气水文有机耦合的关键步骤。本书基于地理信息系统、卫星遥感、雷达测雨和高性能服务器等先进技术，致力于建立适用于大尺度区域的陆面水文耦合模型，提高对大陆和区域尺度陆面水文自然系统和人类干扰要素的整体认知，分析其影响机理、不确定性因素和模型构建方案，进一步提高陆面水文模型的模拟预报能力和应用领域，改善区域洪水、干旱极值事件评估预警能力和水资源风险预测管理水平，为建立气候水文耦合模型和气象水文耦合模型奠定了基础。

本书围绕多源水文气息信息利用、陆面水文耦合模型构建、时空尺度问题、气候变化和人类活动的水文效应、卫星雷达降雨应用等多个方面展开，共由 10 章和两个附录组成。第 1 章为绪论，介绍了水文学、陆面模式、水文模型的发展，重点归纳了大气水文耦合研究进展；第 2 章主要讨论了陆面水文模型的参数处理，包括 DEM 升尺度算法和数字流域构建等；第 3 章着重论述了各种气象驱动资料及其处理方法，并归纳了用于模型率定的水文资料；第 4 章详细描述了分布式水文模型（HMS）中不同水文过程模块的原理与构建，以及多尺度分布式水文模型的构建方法；第 5 章着重介绍了陆面模式的基本原理和结构，以及陆面模式和水文模型的耦合方法；第 6 章从模型参数、气象要素、时空尺度和模型结构等各个方面详细分析了陆面水文模拟的不确定性影响；第 7 章开展了流域的长时间连续性水文模拟，并据此讨论了气候变化对水文过程的影响；第 8 章从下垫面覆盖变化和水利工程措施两个方面探讨了人类活动对水文过程的影响和研究方

法；第 9 章评估了 TRMM 卫星雷达降雨的数据质量，并应用于流域水文模拟，分析径流空间分布的季节和年际变化；第 10 章对本书的研究内容和未来研究展望进行了总结。另外，本书附录 1 和附录 2 分别对陆面水文耦合模型的模型结构和输入输出进行了详细介绍。

本书的研究成果和编写出版得到国家重点研发计划（2016YFC0402706、2016YFC0402710）、国家自然科学基金（41471016、51539003、51421006、41101016、51190091）、公益性行业（气象）科研专项重点项目（GYHY201406021）、中国科学院战略性先导科技专项（XDA05110102）、江苏高校优势学科建设工程资助项目（3014-Sys1401）等科研项目的共同资助。中国科学院大气物理研究所林朝晖研究员、河海大学郝振纯教授等专家和同事在本书内容的研究过程中提供了诸多指导。河海大学鞠琴、谷黄河、刘娣、陈竟文和李红等在本书准备期间整理了部分材料。由于作者水平有限、编写时间仓促，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请读者和有关专家给予批评指正，以便于今后进一步完善与提高。

作 者

2017 年 6 月于南京

目 录

《水科学前沿丛书》出版说明

前言

第1章 绪论	1
1.1 水循环与水问题	1
1.2 水文学进展	2
1.2.1 现代水文学起源	2
1.2.2 现代水文学的发展	3
1.3 水文模型研究进展	4
1.3.1 国外研究进展	4
1.3.2 国内研究进展	5
1.3.3 大尺度水文研究	5
1.3.4 面临的问题	6
1.4 陆面模式研究进展	7
1.4.1 陆面模式及其研究意义	7
1.4.2 国内外研究进展	7
1.4.3 国际陆面过程参数化方案比较计划	8
1.5 大气-陆面水文耦合研究评述	9
1.5.1 利用大气模式输出驱动水文模型	10
1.5.2 加强陆面模式对水文过程的描述	11
1.5.3 构建陆面水文耦合模型	11
1.5.4 双向耦合研究	12
1.6 小结	13
第2章 数字流域构建与模型参数	15
2.1 模型多源资料	15
2.2 数字流域构建	16
2.2.1 数字高程模型	16
2.2.2 数字流域信息提取	17
2.2.3 填洼与子流域划分	18
2.2.4 升尺度方法	20
2.2.5 升尺度方法检验	22

2.2.6	大陆区域数字流域构建	25
2.3	水文地质参数	27
2.4	植被与土壤	28
2.4.1	植被	28
2.4.2	土壤	30
2.5	数据投影与坐标变换	31
2.5.1	数据投影	31
2.5.2	坐标变换	31
2.5.3	坐标转换计算个例	32
2.6	小结	33
第3章	多源水文气象数据库	35
3.1	概述	35
3.2	常规气象数据及其插值	37
3.2.1	气象站网	37
3.2.2	数据插值	37
3.2.3	插值方法分析	38
3.2.4	地形对降雨的影响分析	40
3.2.5	地形校正方案	41
3.2.6	时间解集方案	43
3.3	其他气象数据	43
3.3.1	气象模式的再分析资料	43
3.3.2	雷达降雨	44
3.3.3	TRMM 卫星雷达降雨	45
3.4	水文数据	45
3.4.1	水位与流量	46
3.4.2	泥沙	47
3.4.3	蒸发量	48
3.4.4	土壤含水量	49
3.4.5	地下水水位	50
3.5	小结	51
第4章	多尺度分布式水文模型	52
4.1	概述	52
4.2	HMS 的发展	52
4.3	HMS 的构建	53
4.3.1	HMS 的主要结构	53

4.3.2	陆地水文模型	54
4.3.3	土壤水模型	60
4.3.4	地下水模型	63
4.3.5	地表水与地下水相互作用模型	64
4.4	多尺度分布式水文模型构建	65
4.4.1	尺度与模型	65
4.4.2	地表水文过程	66
4.4.3	地下水文过程	67
4.4.4	河流/湖泊与地下水相互作用	67
4.5	小结	68
第5章	陆面水文耦合模型构建	70
5.1	陆面水文耦合模型结构	70
5.2	陆面过程模式	71
5.2.1	降水截留	72
5.2.2	蒸散发	73
5.2.3	积雪融雪	75
5.2.4	土壤水分	75
5.2.5	地表产流	76
5.3	耦合方法	77
5.3.1	基于“土壤含水量”的耦合方法	77
5.3.2	双向耦合方法	78
5.4	流域应用实例	79
5.4.1	研究流域	79
5.4.2	能量平衡过程	80
5.4.3	水量平衡过程	82
5.4.4	流量模拟	85
5.4.5	地下水模拟	86
5.4.6	湖泊过程模拟	87
5.4.7	空间分布分析	89
5.5	小结	90
第6章	模型不确定性分析	91
6.1	概述	91
6.1.1	模型不确定性因素	91
6.1.2	检验指标	92
6.2	模型参数敏感性分析	92

6.2.1	试验设计	92
6.2.2	含水层厚度	94
6.2.3	水力传导度	95
6.2.4	孔隙度	96
6.2.5	参数敏感性比较	98
6.3	气象要素不确定性	98
6.3.1	试验设计	98
6.3.2	降水	99
6.3.3	气温	101
6.3.4	比湿	103
6.4	时空尺度	105
6.4.1	地形特征与网格尺度	105
6.4.2	试验设计	106
6.4.3	不同网格尺度的流量过程模拟	106
6.4.4	空间分布差异	108
6.4.5	时空尺度效应	109
6.5	小结	113
第7章	流域气候变化及其水文响应	114
7.1	淮河流域水资源状况	114
7.2	流域气候变暖事实	115
7.2.1	增暖趋势	115
7.2.2	温度周期变化	116
7.3	长时间连续性陆面水文模拟	117
7.3.1	模拟试验构建	117
7.3.2	模拟结果	118
7.3.3	精度检验	119
7.3.4	Pearson-III型分布	120
7.3.5	降雨极值频率分析	121
7.3.6	径流极值频率分析	122
7.4	洪水和干旱周期分析	124
7.4.1	降水	125
7.4.2	地表径流量	126
7.4.3	极值事件与气候变暖	128
7.5	小结	129
第8章	人类活动的水文效应评估	130
8.1	人类活动的水文效应	130

8.1.1 研究主题	130
8.1.2 研究方法	131
8.2 土地利用变换的水文效应	131
8.2.1 土地利用数据	131
8.2.2 植被情景	132
8.2.3 植被参数对比	133
8.2.4 能量平衡影响	133
8.2.5 水分过程影响	135
8.2.6 径流过程影响	138
8.3 工程取水措施的水文效应	140
8.3.1 流域工程措施	140
8.3.2 工程措施影响分析	140
8.3.3 观测径流校正	141
8.3.4 考虑人类工程措施的水文模拟方案	143
8.3.5 水文模拟方法	144
8.4 小结	145
第9章 卫星雷达降雨的应用	147
9.1 概述	147
9.2 卫星降雨观测数据	148
9.2.1 TRMM 计划	148
9.2.2 TRMM 数据产品	150
9.2.3 TRMM 3B42 数据	151
9.2.4 降雨事件个例	151
9.3 卫星数据处理与精度分析	152
9.3.1 数据处理	152
9.3.2 时间序列精度	152
9.3.3 空间精度分析	155
9.4 TRMM 卫星降雨应用	156
9.4.1 参数与初始化文件	156
9.4.2 模拟结果	156
9.4.3 流量空间分布的年际比较	158
9.4.4 流量空间分布的季节变化	159
9.5 小结	162
第10章 陆面水文研究展望	163
10.1 内容总结	163

10.1.1 数据与模型	163
10.1.2 变化环境下的陆面水文模拟	164
10.1.3 卫星雷达降雨	165
10.2 主要创新点	165
10.3 研究展望	166
参考文献	168
附录 1 耦合模型程序结构图	177
附录 2 耦合模型输入与输出 (I/O)	180

第 1 章 绪 论

1.1 水循环与水问题

水是生命之源。水通过海洋和陆面蒸发，以水汽形态被大气环流输送到大气中，遇冷凝结，以雨或雪的形态降落，被植被截流后在地表形成径流，入渗补给土壤水和地下水，汇入江河，最后流入海洋，再次从海洋蒸发。水的这种循环运动被称为水文循环，它在太阳辐射和地球引力的共同作用下进行周而复始、永不间断的运动（张建云等，2002），如图 1.1 所示。水文循环是自然界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，对地球表层结构的演化和人类可持续发展具有重要意义。本书的重点研究内容为陆面水文循环过程，主要包括水在陆面表层圈层（包括陆面植被、积雪、河流、湖泊和含水层等）的运动与相互转化。

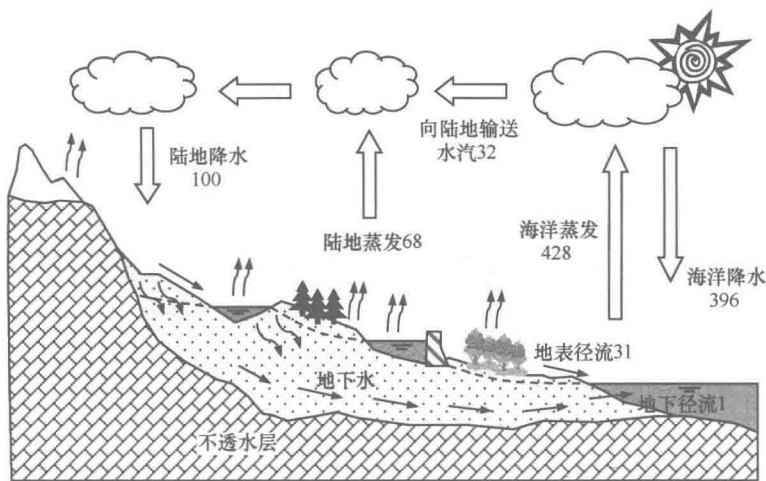


图 1.1 全球水文循环示意图

图中数字表示相对水分通量以陆地降水为 100 计，全球陆地降水量大约为 $119\ 000\text{km}^3/\text{a}$

IPCC 第五次评估报告根据观测和模式结果，进一步强调目前气候变化及其对水文循环过程影响的紧迫性（IPCC，2013）。全球变化将导致极端水文气象事件（如暴雨、干旱、台风、高温等）不断增多（Allan and Soden，2008），加之人类活动的直接和间接影响，进入 21 世纪全球自然灾害造成的损失大幅增加。地理信息系统（geographic information system, GIS）、全球定位系统（global positioning system, GPS）、遥感（remote sensing, RS）、雷达和超级计算机等先进技术的兴起与广泛应用为环境监测和科学研究等提供了强有力的保障，为水文气象研究迈进新时代带来了机遇。

我国地处北半球亚欧大陆东部，东临太平洋，西部深入大陆内部；南北纬度跨度范围广，气候特性差异很大。特殊的地理位置和季风气候条件决定了我国降水年内时空分布不均，年际变幅很大，水旱灾害频发，加之受水旱灾害威胁的土地不断被开发利用，因洪涝和干旱造成的经济损失严重，如图 1.2 所示。据不完全统计，自公元前 206~1949 年的 2155 年间，我国共发生较大的洪水灾害有 1092 次，干旱灾害有 1056 次，其中，造成 10 万人以上伤亡的水旱灾害时有发生（国家防汛抗旱总指挥部和中华人民共和国水利部，2007）。近几十年来，自然因素和人类活动引起的全球气候变化加剧（Fedorov et al., 2006），土地利用/地表覆盖变化显著，极端天气事件频率增多、强度增大，同时，人口、社会财富向洪水高度风险区集中，加剧了区域水环境、水生态负荷，洪涝、干旱、水污染、地下水过度开采等水资源问题日趋复杂，对我国社会经济的发展产生了严重影响（刘昌明和陈志凯，2001）。

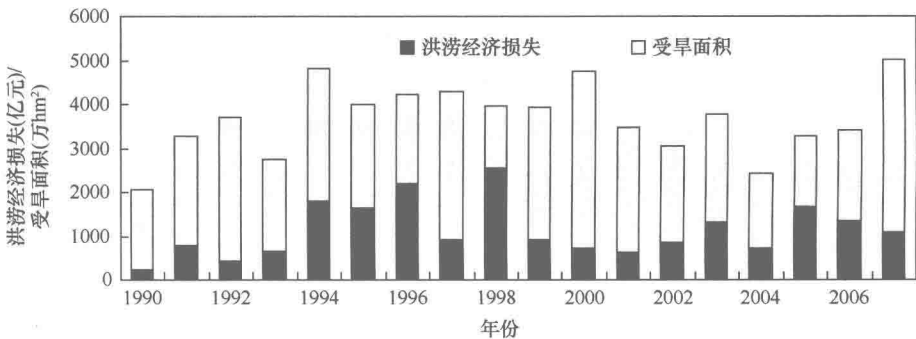


图 1.2 近年来我国因洪涝和干旱造成的损失

开发陆面水文耦合模型系统，并与大气模式实现连接和耦合，有助于提高大气模式和水文模型的预报精度，以及延长水文模型的预报期，并可用于研究水循环过程对气候变化和人类活动的响应。在实时洪水预报预警、水资源可持续利用、缓解水资源供需矛盾，以及促进区域经济规划和发展等方面具有重要的科学意义和广阔的应用前景。

1.2 水文学进展

1.2.1 现代水文学起源

作为自然地理学的一个分支，水文学是关于地球上水的起源、存在、分布、循环、运动等变化规律，以及应用这些规律为人类服务的知识体系，属于地学及工程科学的重要分支学科（叶守泽和夏军，2002；芮孝芳等，2007）。研究对象包括存在于大气层、地球表面和地壳内部各种形态水体在水量和水质上的运动、变化、分布，以及与环境 and 人类活动之间的相互联系与作用。

水文学的产生和发展同人类认识自然、改造自然的活动息息相关。人类在与水旱灾害做斗争的过程中，对各种水文现象进行观测，研究它们的运动规律，积累水文知识，

逐渐形成并不断发展水文科学。在古老的四大文明发源地遗迹中,已出现了原始水文观测的记录和治水活动。现代水文学被公认开始于法国水文学家 Perrault 于 1674 年提出的水量平衡概念,成为水文科学最基本的原理之一,他把观测的年降水量与塞纳河的估计流量做了比较,得出塞纳河年径流量是降水量的六分之一的结论。

1.2.2 现代水文学的发展

现代水文学自 1674 年定量研究塞纳河流域的水量平衡以来,通常认为经历了以下发展阶段。

1738 年瑞士数学家 Bernoulli 发表了描述水流各种形式的机械能相互转化和守恒的水流能量方程。水量平衡原理和能量平衡方程构成了水文科学最基本的理论框架。1769 年法国工程师 Chezy 提出了计算明渠和管道均匀流平均流速和沿程水头损失的主要公式。19 世纪水文学理论取得了快速的发展。1802 年英国科学家 Dalton 根据水面蒸发的形成原理和维持机制,建立了研究水面蒸发的道尔顿公式。1856 年法国水力学家 Darcy 通过大量的渗水试验,提出了多孔介质中的线性渗透定律,即著名的 Darcy 定律。1871 年法国科学家 de Saint-Venant 提出了描述河道和其他具有自由表面的浅水体中渐变非恒定水流运动规律的著名方程组。1891 年爱尔兰工程师 Manning 提出计算明渠均匀流流速的曼宁公式。这些科学理论的创立为水文科学在河道水流、蒸发、地下水运动、径流形成和水文循环等领域的发展奠定了理论基础,进而建立水文学理论体系的近代科学方法论。

进入 20 世纪,水文学在观测方法、理论体系和研究领域等方面得到了进一步完善,并取得了诸多新成就。Green 和 Ampt (1911) 根据土壤毛管理论提出了近似的积水入渗模型。美国著名水文学家 Richards (1931) 导出了非饱和渗流方程,其数学物理方法被逐步引入土壤水运动规律研究中。经过大量的试验设计和分析,1933 年美国生态土壤学家 Horton 创立了径流形成的下渗理论,得出了著名的霍顿下渗公式 (Horton, 1933; Beven, 2004)。爱尔兰科学家 Nash (1957) 给出了瞬时单位线的数学表达式,逐渐形成了完整的单位线理论体系。从 20 世纪 60 年代开始,赵人俊和庄一鹄 (1963)、Dunne 和 Black (1970) 分别总结提出了适用于湿润-半湿润地区的蓄满产流机制。上述理论的发展和完善为水文学走向现代化奠定了基础。

1950 年以后,水文学理论日趋发展完备,同时,计算机科学技术有了飞速发展,流域水文循环各个环节得以作为一个整体来研究,流域水文模型开始出现,并得到了快速发展 (芮孝芳等, 2006)。例如,美国国家气象局天气预报系统业务采用的 Stanford 模型 (Crawford and Linsley, 1966)、意大利的 ARNO 模型 (Todini, 1996),以及日本常用的 TANK 模型 (Sugawera, 1995)。我国的新安江模型 (赵人俊, 1984) 在洪水预报和水资源评价中得到了广泛的应用,其核心理论和技术方法被国内外众多陆面模式和水文模型所采用。现代科学技术促进了水文信息获取和分析方法的长足进步,如遥感技术和巨型计算机,为分布式流域水文模型的发展提供了重要的数据支撑和计算条件。这些水文模型在防洪减灾、水资源可持续利用、水环境保护与生态修复、气候变化和人类活动对流域水文水资源的影响等领域发挥了重要的作用。

1.3 水文模型研究进展

传统的集总式水文模型由于其自身的局限性,近年来发展较慢。在当前水文科学研究领域中,计算机技术、GIS、RS、GPS 和雷达测雨技术得到了快速发展和应用,为研究人员提供了丰富的下垫面资料(地形、植被、土壤等)和降雨时空分布信息。研究人员开始集中于流域的单元离散化模拟计算,从而建立分布式水文模型,更好地理解各个水文物理过程。目前,常用的流域离散化单元主要有矩形网格、子流域、山坡、水文响应单元(hydrological response unit, HRU)、典型单元面积(representative elemental area)、分组响应单元(group response unit, GRU)等。分布式水文模型可以模拟各个水文变量的空间分布,从而为泥沙和污染物运移的模拟提供基础;同时,其也可用于研究土地利用/植被覆盖变化(LUCC)、气候变化、人类活动等对水文过程造成的影响。

1.3.1 国外研究进展

1958 年麻省理工学院的 Miller 和 Laflamme 为了高速公路的自动设计,首次提出了数字地形模型(digital terrain model, DTM)的概念(Miller and Laflamme, 1958)。DTM 的高程属性,即数字高程模型(digital elevation model, DEM),在水文研究领域的广泛使用,标志着水文学研究真正进入了数字化时代(任立良和刘新仁, 2000)。Freeze 和 Harlan (1969)开创性地提出了具有物理基础的数字水文模型的蓝图(FH69 蓝图)。此后的近 40 年,有学者以该蓝图为框架建立了诸多具有物理基础的分布式水文模型。

Stephenson 和 Freeze (1974)发展了一个分布式水文模型,模拟一个山坡的水文过程。Hewlett 和 Troendle (1975)提出的变源面积模拟模型中,分块模拟地表径流,同时对地下径流进行分层模拟。Beven 和 Kirkby (1979)对理论结构做了必要简化,提出了以变源产流为基础的 TOPMODEL。该模型基于 DEM 计算地形指数,并以此反映下垫面的空间变化对流域水文循环过程的影响,模型的参数具有物理意义,得到了广泛的检验和应用。但 TOPMODEL 并未考虑降水、蒸发等要素的空间分布对流域产汇流的影响,不是真正意义上的分布式水文模型。1980 年以后,由丹麦、法国、荷兰及英国的水文学者联合研制的 SHE 模型系列,是一个真正意义上的具有物理基础的分布式水文模型(Abbott et al., 1986)。该模型采用矩形网格进行流域离散化,反映了模型参数、输入数据的空间非均匀性,主要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。1994 年美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)开发了一个具有很强物理机制的 SWAT (soil and water assessment tool)模型(Arnold and Allen, 1996),利用 GIS 和 RS 提供的空间信息,模拟复杂流域中的各种水文物理过程。模型可采用多种方法将流域离散化,能够模拟降水、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。SWAT 模型应用现有的概念性模型在每一个单元上进行产流计算,然后再进行汇流演算,最后求得出口断面流量。其他国外典型的分布式水文