

新一代流域洪水预报系列专著

流溪河模型

■ 陈洋波 著

 科学出版社
www.sciencep.com

新一代流域洪水预报系列专著

流溪河模型

陈洋波 著

国家自然科学基金项目(50479033、50179019)资助
广东省科技计划项目(2006B37202001)资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍流域洪水预报分布式物理水文模型——流溪河模型的原理、方法及研究结果。全书共分七章。首先阐述流域水文模型的发展情况,然后分别对流溪河模型的结构、计算方法、建模的方法以及参数确定方法进行了详细介绍,并对流溪河模型系统 CYB. LMS 的主要功能进行了简要说明。其次介绍研究对象流溪河流域的基本情况、建模数据的收集整理及分析方法和结果,在流溪河水库流域建立流溪河模型的过程及结果,流溪河模型在小型少资料流域的研究结果及建模方法。最后介绍流域梯级开发条件下流溪河模型的建模方法,以及流溪河模型在一个少水文资料的大型流域应用的结果。

本书可供从事水文水资源专业、自然地理专业教学和研究的教师、学生及研究人员,以及各水利部门、流域机构、水库调度部门从事流域洪水预报工作的管理及技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流溪河模型/陈洋波著. —北京:科学出版社,2009

(新一代流域洪水预报系列专著)

ISBN 978-7-03-025316-3

I. 流… II. 陈… III. 流域模型-研究-广州市 IV. P344.265

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 147218 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 9 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 9 月第一次印刷 印张: 13 1/4

印数: 1—2 000 字数: 250 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

洪水灾害是严重的自然灾害,对洪水灾害进行预报是一项十分有效的防洪非工程措施。分布式物理水文模型将流域按一定方法划分成很多个细小的单元,每个单元有不同的物理特性数据和降雨量,每个单元采用不同的模型参数,流域的产汇流过程采用具有物理意义的数学物理方程进行定量描述。分布式物理水文模型的这些特点,使其可以充分描述流域特性的空间变化,更加精细地模拟和预报多种洪水要素,是流域洪水预报模型的最新发展方向。

由于流域洪水预报对结果的精度要求高,分布式物理水文模型在流域洪水预报方面应用的难度更大,已成为国际前沿研究的热点和难点。作者不畏艰难,选择这一技术难度大、实用价值高的方向开展研究,显示了作者勇于攀登科学高峰的进取精神。作者坚持研究十余年,在国家自然科学基金等的资助下,研究工作终有所成,提出了一个专门用于流域洪水预报的、由作者自主命名的分布式物理水文模型——流溪河模型,并开发了相应的计算机软件系统,获得我国计算机软件著作权登记,实属难能可贵。

该书较为系统全面地介绍了流溪河模型的结构、计算方法、建模的方法以及参数确定的方法,并对流溪河模型在几个流域的应用情况进行了详细的介绍和分析。流溪河模型提出了一套基于国际互联网免费获取的 DEM 及遥感影像进行单元划分及对河道单元断面尺寸进行估算的方法,使其可以在我国大多数流域应用;流溪河模型提出的基于敏感性分析的模型参数确定方法,为分布式物理水文模型的参数确定提供了新的思路和方法;流溪河模型软件系统 CYB. LMS 的开发应用,将在一定程度上推进流溪河模型在流域洪水模拟与预报中的应用工作。

该书的出版为广大读者提供了学习、应用流溪河模型的参考材料。祝愿该书的出版能够活跃学术思想、增进研究交流、推动分布式物理水文模型在流域洪水预报中的应用。也希望作者继续努力,不断改进和完善流溪河模型。

中国工程院院士

2009年6月

前 言

1997 年作者在开展葛洲坝水库入库洪水预报方案研究时,试图采用分布式物理水文模型编制预报方案,但在当时的资料条件及技术条件下,这一计划未能付诸实施。作者在赴欧美等国进行学术交流后,这一想法变得更加强烈。在美国普林斯顿大学访学期间,作者对分布式物理水文模型,特别是 VIC 模型进行了系统的学习和研究,产生了研究开发一个专门应用于流域洪水预报的分布式物理水文模型的想法,并得到当时正在普林斯顿大学学习的一部分中国留学生的支持。2001 年作者得到国家自然科学基金的资助,正式开始了研制流域洪水预报分布式物理水文模型的工作。

研究之初,作者的研究工作面临多方面的困难,如技术力量及研究经费的不足、国内外对该项技术应用前景的不同看法等,在一定程度上影响了研究工作的进展。2003 年,作者主持召开了第一届“GIS 和 RS 在水文水资源及环境中的应用”国际会议,会议期间主持举办了“国际洪水预报与管理新技术”高级研讨会,邀请了国际上一批顶级专家就应用分布式物理水文模型及多普勒雷达遥测降雨进行洪水预报的问题进行研讨,国内一批此领域的技术人员出席了会议。通过研讨,明确了分布式物理水文模型是流域洪水预报下一代预报模型的认识,坚定了作者继续开展此方面研究工作的信心。此后,作者的研究工作再次得到国家自然科学基金的资助,选定了流溪河流域作为研究试验流域,于 2007 年底提出了本书中所介绍的流溪河模型的结构与方法,取得了初步的模拟计算结果。经过 2008 年的继续努力,完善并发布了流溪河模型软件系统 CYB. LMS 第 1 版,获得了国家版权局计算机软件著作权登记(2008SR27060)。同时,在其他几个流域也采用流溪河模型进行了洪水模拟计算,取得了较为稳定的计算结果。

作者的研究生为流溪河模型的研究与开发付出了辛勤的劳动,他们是流溪河模型研究与开发的主力军,包括赵建华、朱德华、任启伟、徐会军、曾昭豪、黄锋华。任启伟对流溪河模型的最终定型作出了较大贡献,徐会军对流溪河模型软件系统的开发起到了重要作用,黄锋华、徐会军对本书中的所有结果重新进行了验证计算,并绘制了大部分图表,在此向他们表示衷心的感谢!没有他们的努力,流溪河模型不可能取得目前的进展。在流溪河模型的研究过程中,中国长江电力股份有限公司三峡梯级调度中心、广州市水务局、广东省飞来峡水利枢纽管理局、广东省水文局等单位为本研究提供了人力、资料及经费的支持。中国长江电力股份有限公司三峡梯级调度中心袁杰、赵云发、李学贵,广州市水务局张虎、乐立航、陈岩,广

东省飞来峡水利枢纽管理局黄善和、黄焕坤、虞云飞、蔡旭东,广东省水文局林旭钿、许扬生、陈芷菁等为流溪河模型的研究提供了大力的支持,三峡大学胡嘉琪参与了部分研究工作。作者与英国 Bristol 大学的 Ian Cluckie 教授、院士和 Dawei Han 副教授,丹麦 DHI 研究院的 Michael Butts 博士,比利时布鲁塞尔自由大学的 Florimond De Smedt 教授和 Yongbo Liu 博士,美国 Oklahoma 大学的 Baxter Vieux 教授,美国 Wyoming 大学的 Fred Ogden 教授开展了学术交流,他们的研究成果和经验为流溪河模型的研究提供了有益的借鉴。在本书完稿后,中国工程院王浩院士审阅了全书,提出了宝贵的建议,并为本书作序。在此一并向他们表示衷心的感谢!

出版本书的目的是希望及时向国内学术界、工程界介绍流溪河模型,以便抛砖引玉,与国内同行共同推进分布式物理水文模型的研究与应用,特别是在流域洪水预报的应用方面。由于作者水平有限,书中介绍的流溪河模型不可避免地还有一些不完善和需要改进的地方,特别是在实际应用中,还可能会出现一些未曾碰到过的问题,恳请读者批评提出,以便不断改进。

作 者

2009 年 5 月于广州

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 集总式模型	1
1.1.1 集总式模型的发展	1
1.1.2 集总式模型的不足	2
1.2 分布式物理水文模型	3
1.2.1 分布式物理水文模型的发展	3
1.2.2 分布式物理水文模型的优势	5
1.3 分布式物理水文模型在流域洪水预报中应用所面临的挑战	6
1.4 本书的目的与内容	8
1.4.1 本书的写作目的	8
1.4.2 本书的内容	9
第 2 章 流溪河模型的原理与方法	11
2.1 流溪河模型概述	11
2.2 流溪河模型的总体结构与计算方法	12
2.2.1 模型的总体结构	12
2.2.2 流域划分子模型	13
2.2.3 蒸散发计算子模型	16
2.2.4 产流计算子模型	16
2.3 汇流计算子模型	18
2.3.1 国内外现行的汇流计算方法分析	18
2.3.2 流溪河模型中的汇流计算方法概述	19
2.3.3 边坡汇流计算方法	19
2.3.4 河道汇流计算方法	20
2.3.5 水库单元汇流计算方法	22
2.3.6 壤中流汇流计算方法	23
2.3.7 地下径流汇流计算方法	23
2.4 河道单元提取与断面尺寸估算方法	24
2.4.1 D8 法提取河道单元	24

2.4.2	分级提取河道单元的方法	24
2.4.3	单元类型的划分	25
2.4.4	河道分段	26
2.4.5	河道断面尺寸估算	26
2.5	流溪河模型不可调参数的确定	27
2.5.1	流溪河模型参数	27
2.5.2	流溪河模型参数确定的基本方法	28
2.5.3	流向与汇流网络的确定方法	28
2.5.4	坡度的确定	29
2.6	流溪河模型可调参数的确定方法	29
2.6.1	参数调整的一般方法	29
2.6.2	参数的敏感性分析方法	30
2.6.3	模型参数敏感性的理论分析	32
2.7	流溪河模型系统 CYB. LMS 简介	33
第 3 章	资料收集与分析处理	35
3.1	流溪河流域介绍	35
3.1.1	流溪河流域简介	35
3.1.2	流域水文气象条件	35
3.1.3	流溪河流域水利工程建设	37
3.1.4	流溪河水库简介	37
3.1.5	黄龙带水库简介	40
3.2	流域属性数据收集与分析	41
3.2.1	流域 DEM 数据的获取	41
3.2.2	土地利用类型的获取	43
3.2.3	土壤类型数据的获取	44
3.3	黄龙带水库流域属性数据分析	44
3.3.1	DEM 的分析	44
3.3.2	土地利用类型的分析	49
3.3.3	土壤类型数据的分析	50
3.4	流溪河水库流域 DEM 的分析	52
3.4.1	DEM 的分析	52
3.4.2	土地利用类型的分析	56
3.4.3	土壤类型数据的分析	58
3.5	实测历史洪水资料的收集整理	59
3.5.1	黄龙带水库洪水过程资料的收集与整理	59

3.5.2	黄龙带水库降雨的处理	60
3.5.3	流溪河水库洪水过程资料的收集与整理	61
3.5.4	流溪河水库流域降雨的处理	66
第4章	流溪河水库入库洪水模拟	67
4.1	流域属性数据的收集与分析	67
4.2	单元划分与河道断面尺寸估算	68
4.2.1	单元划分	68
4.2.2	水库单元划分	68
4.2.3	河道单元和边坡单元划分	69
4.2.4	虚拟河段设置	72
4.2.5	河道断面尺寸估算	72
4.3	不可调参数和可调参数初值的确定	73
4.3.1	不可调参数的确定	73
4.3.2	可调参数初值的确定	74
4.3.3	模型的初步模拟结果	76
4.4	可调参数的调整	82
4.4.1	第1轮参数调整	82
4.4.2	参数的敏感性分析	86
4.4.3	土壤初始含水率的调整	88
4.4.4	第2轮参数调整	89
4.4.5	模型验证	92
4.5	模型参数的敏感性分析	98
4.5.1	饱和含水率的敏感性分析	98
4.5.2	田间持水率的敏感性分析	100
4.5.3	饱和水力传导率的敏感性分析	103
4.5.4	土壤层厚度的敏感性分析	105
4.5.5	土壤特性参数 b 的敏感性分析	107
4.5.6	河道单元糙率的敏感性分析	110
4.5.7	边坡单元糙率的敏感性分析	112
4.6	河道分级对模拟计算结果的影响分析	114
4.6.1	不同分级时单元划分及断面尺寸的估算	114
4.6.2	模拟计算结果的对比与分析	116
4.7	河道断面尺寸估算对计算结果的影响分析	119
4.7.1	河道底宽的敏感性分析	119
4.7.2	河道侧坡的敏感性分析	121

第 5 章 黄龙带水库入库洪水模拟	123
5.1 概述	123
5.2 单元划分与河道断面尺寸估算	124
5.2.1 单元划分	124
5.2.2 水库单元划分	124
5.2.3 模型分辨率为 30m 时河道单元和边坡单元划分	125
5.2.4 模型分辨率为 50m 时河道单元和边坡单元划分	127
5.2.5 模型分辨率为 100m 时河道单元和边坡单元划分	130
5.2.6 虚拟河道设置	132
5.2.7 河道断面尺寸估算	134
5.3 不可调参数和可调参数初值的确定	135
5.3.1 不可调参数的确定	135
5.3.2 可调参数初值的确定	139
5.4 可调参数的调整	141
5.4.1 模型分辨率为 50m 时的参数调整	141
5.4.2 模型分辨率为 30m 时的参数调整	146
5.4.3 模型分辨率为 100m 时的参数调整	147
5.4.4 参数的敏感性分析	148
5.5 河道断面尺寸估算误差对计算结果的影响分析	148
5.5.1 河道底宽的敏感性分析	148
5.5.2 河道侧坡的敏感性分析	149
5.6 模型的空间尺度效应分析	151
5.6.1 对单元划分及河道分级的影响	151
5.6.2 对流向及坡度的影响	151
5.6.3 对模型可调参数的影响	151
第 6 章 梯级开发下的流域洪水模拟	152
6.1 问题描述及模型修改	152
6.1.1 引言	152
6.1.2 问题描述	153
6.1.3 流溪河模型的改进	154
6.2 数据整理与分析	156
6.2.1 流域属性数据	156
6.2.2 洪水流量与降雨资料	156
6.3 单元划分与河道断面尺寸估算	157
6.3.1 单元划分	157
6.3.2 水库单元划分	157
6.3.3 边坡单元和河道单元划分	157

6.3.4	虚拟河道设置	159
6.3.5	河道断面尺寸估算	160
6.4	不可调参数和可调参数初值的确定	161
6.4.1	不可调参数的确定	161
6.4.2	可调参数初值的确定	163
6.4.3	预警点设置和可调参数分区调整	164
6.5	基于大垵及李溪预警点的模型可调参数调整	165
6.5.1	第1轮参数调整	165
6.5.2	第2轮参数调整	170
6.5.3	模型验证	175
第7章	大型少资料流域流溪河模型洪水模拟	176
7.1	流域简介及水文资料收集	176
7.1.1	浈江流域简介	176
7.1.2	洪水流量资料收集	177
7.1.3	降雨资料收集	179
7.2	流域属性数据整理与分析	180
7.2.1	DEM数据的获取	180
7.2.2	土地利用和土壤类型数据的获取	180
7.3	单元划分与河道断面尺寸估算	181
7.3.1	单元划分	181
7.3.2	河道单元和边坡单元划分	181
7.3.3	河道分段及虚拟河道设置	183
7.3.4	河道断面尺寸估算	183
7.4	不可调参数和可调参数初值的确定	185
7.4.1	不可调参数的确定	185
7.4.2	可调参数初值的确定	185
7.5	可调参数的调整	186
7.5.1	第1轮参数调整	186
7.5.2	土壤初始含水率的调整	188
7.5.3	第2轮参数调整	189
7.5.4	模型验证	192
7.6	河道断面尺寸的敏感性分析	193
7.6.1	河道底宽的敏感性分析	193
7.6.2	河道侧坡的敏感性分析	194
7.7	结论	194
参考文献		196

第 1 章 绪 论

流域水文模型是对流域水文过程进行系统描述和模拟/预测的数学模型。1932 年提出的谢尔曼单位线^[1]是流域水文模型的雏形,但真正意义上的流域水文模型直到 20 世纪 60 年代末才正式被提出来,斯坦福 4 号模型^[2]是开发较早的流域水文模型。

流域水文模型一般可分成集总式模型(lumped model)和分布式模型(distributed model)两大类。

集总式模型将整个流域看成一个整体,将流域物理特性在空间上进行均化,模型参数在整个流域上进行同化。该类模型中,流域降雨采用流域平均降雨,而模型参数也认为在流域上的各处是相同的,即整个流域采用一组模型参数。20 世纪 90 年代以前的流域水文模型主要是集总式模型。

分布式模型将流域按一定方法划分成很多个细小的单元,对每个单元,根据其物理特性进行产流量计算,然后将产生于每个单元的径流沿其流向汇流到流域出口断面。分布式模型一般都是基于物理意义的,因此又称为分布式物理水文模型。分布式物理水文模型与集总式模型的主要不同是,流域产汇流计算采用的是具有物理意义的数学物理方程,而不是纯数学的方程;每个单元采用与其他单元不同的模型参数及降雨量;每个单元的模型参数主要根据流域物理特性从物理意义上直接确定,而不是根据实测历史资料率定。

1.1 集总式模型

1.1.1 集总式模型的发展

集总式模型可分成系统理论模型或称黑箱模型(black box model)和概念性模型(conceptual model)。黑箱模型将整个流域看成一个黑箱子,其不从物理意义上去探索流域水文过程的机理,而是采用纯数学的方法去推求模型的输入(降雨等)及模型输出(河流流量等)之间的关系。黑箱模型不能对其预报结果从物理意义上进行明确的阐述而不易被人们接受,对其研究和应用受到了一定程度的影响。但由于该方法较为简便,易于应用,因此一直是一类重要的流域水文模型。

黑箱模型中早期的代表性模型是线性降雨径流模型^[3,4]。20 世纪 90 年代以来,水文界的研究人员试图采用人工神经网络方法^[5~8]等新的数学方法来改进黑

箱模型的应用效果,并取得了一定进展。

与黑箱模型不同的是,概念性模型对流域水文过程的发生和发展从物理意义上进行描述,并用若干模型参数来定量描述各物理量之间的关系。概念性模型由于物理意义明确而易于被人们理解和接受,较之黑箱模型得到了更多的重视和研究,在目前的实际应用中,大量使用的就是这类概念性模型。

到 20 世纪 80 年代,世界上很多国家都提出了各自的概念性流域水文模型,其原理和算法也趋于成熟和完善,如美国的斯坦福 4 号模型^[2]、萨克拉门托模型^[9]、HEC 模型^[10]、意大利的 ARNO 模型^[11]、北欧的 HBV 模型^[12]、日本的水箱模型^[13]和我国的新安江模型^[14,15]等。这些模型目前仍然是流域洪水预报的主要水文模型。

1.1.2 集总式模型的不足

随着人们对流域水文过程研究的不断深入和模型应用经验的积累,集总式模型的不足日益显示,首要问题在于其难以处理流域物理特性在空间分布上的不均匀性和模型参数的不确定性。一个流域的面积从几百平方公里到几十万平方公里不等,流域的物理特性在不同的空间区域上是不同的,集总式模型将模型参数在整个流域上进行均化,没有提出处理流域物理特性在空间上不均匀分布的方法。虽然有些模型在这方面进行了一些改进,如我国的新安江模型,用一个指数函数来描述流域蓄水容量在空间分布上的不均匀性;意大利的 ARNO 模型,将一个流域划分成多个较小的子流域,对每个子流域采用不同的模型参数。这些方法虽然在一定程度上考虑了流域物理特性空间分布的不均匀性,但并未从根本上解决问题。

降雨空间分布的不均匀性也是集总式模型无法考虑的,因为集总式模型采用流域平均面雨量进行计算,也是将流域降雨在空间分布上进行均化,而流域降雨是影响流域水文模拟/预报效果的重要因素之一。当流域规模较大时,将会严重影响结果的精度。

模型参数的不确定性则是另一类问题。集总式模型依赖实测历史径流过程来率定模型参数,并采用优化技术对模型参数进行优选。这就会出现下列的一些问题。

1) 在无资料或少资料流域的不可应用问题

对于无资料或少资料流域,没有实测的水文资料或实测的水文资料年限不长,采用集总式模型就难以率定模型参数,因而难以实际应用,这种情况在中小流域是一个普遍存在的问题。

2) 异参同效问题

研究表明,对于集总式模型,当利用实测历史径流过程并采用优化技术率定模型参数时,往往可以得到一组不同的模型参数而其径流的模拟效果相近,即一组不

同的模型参数可以得到相似的模拟结果,但这组模型参数对未来的流域水文过程的模拟/预报会产生大相径庭的结果,从而使得模型参数出现不确定性。

3) 人类活动的影响

由于人类活动的影响,流域的下垫面条件一直都是在变化的,对于人类活动剧烈的地区,这种变化还相当大,在此情况下,用过去的水文资料率定的模型参数还能否应用于未来的流域水文模拟,就成为一个很大的不确定性问题。这一问题在有水利工程的流域特别明显。

4) 同参异效的问题

集总式模型的参数一般是通过率定和检验后就固定下来的。但是,不同的径流过程,其发生、发展的水文气象条件各不相同,用一个固定不变的模型参数很难准确描述和模拟所有的水文过程。这组模型参数可能对某些场次的洪水的模拟效果较好,而对另外一些场次的洪水的模拟效果则较差。使用相同的模型参数来模拟所有的水文过程难以对所有的水文过程获得满意的模拟效果。如果用一组固定不变的模型参数来模拟和预报所有的水文过程,就可能出现意想不到的效果,或出现所谓的强迫水文模型按照可能与实际的水文规律不符的方式模拟水文过程的现象^[16],本书称这一现象为同参异效。这也就是为什么集总式模型对有些水文过程的模拟效果较好,而对另外一些则效果不好的原因。

集总式模型的上述不足,主要原因是其不能有效处理流域空间信息。在当时条件下,空间信息处理技术还不成熟,计算机技术也没有达到相应水平,因此集总式模型的发展受到当时条件下其他相关学科技术水平和社会整体技术水平发展的限制,难以有根本性改变。但是,从20世纪80年代末、90年代初以来,GIS空间信息处理技术得到快速发展,出现了商用的GIS软件,同时计算机信息处理技术也以前所未有的速度发展,使得处理流域空间信息不再是一道不可逾越的鸿沟。另外,随着遥感技术的发展,可以获取大范围高分辨率的流域物理特性数据,如土地利用类型等,以及通过多普勒雷达估算的、可以反映流域降雨时空分布不均的高分辨率的流域降雨数据。分布式流域水文模型开始受到水文界越来越多的重视,对其研究越来越多,出现了一批有价值的研究成果。

1.2 分布式物理水文模型

1.2.1 分布式物理水文模型的发展

分布式物理水文模型(physically-based distributed hydrologic model, PB-DHM)的蓝图早在1969年就已经由Freeze和Harlan提出^[17],但直到1986年才正式发表世界上第一个完整的分布式物理水文模型——SHE(systeme hydrolo-

gique europeen)模型^[18,19],由此看来,分布式物理水文模型的发展远较集总式模型缓慢。主要原因是由于应用分布式物理水文模型需要有较高分辨率的流域物理特性数据和降雨数据,而这在当时却不易获得,从而限制了分布式物理水文模型的发展。但自20世纪80年代中期以后,出现了有利于分布式物理水文模型研究和应用的一些情况。

(1) 卫星遥感技术日益成熟,卫星遥感产品进入民用和科技领域,使得科研人员可以获取分辨率很高的流域物理特性资料。如美国USGS等部门利用遥感图像制作的全球地表覆盖类型(植被指数)数据库(Global Land Cover Characteristic Data Base)(<http://edc2.usgs.gov/glcc/>),可提供全球范围内分辨率为1km的植被指数;美国USGS等部门制作的全球数字水利数据库HYDRO1K(<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/hydro/readme.html>),可以提供全球范围内分辨率为1~4km的DEM及其导出参数。上述产品均可以通过国际互联网免费下载。另外,局部地区分辨率更高的上述产品也不断出现并可获取。由于有了这些资料,研究人员可以获取非常详细的流域物理特性资料,并可直接利用这些资料推求各单元的模型参数。这是分布式物理水文模型研究的重要资料。

(2) 数字气象雷达的普及应用提供了分辨率很高的流域降雨资料,从而可以充分考虑降雨空间分布的不均匀性。由美国研制开发的多普勒88D型气象雷达(weather surveillance radar-88Doppler,WSR-88D)^[20],可以提供在任何气象条件下分辨率为1km²的降雨量,其有效覆盖半径达230km。美国全国已部署了一个由此类雷达组成的网络,覆盖全美所有地区。按照国家气象局部署,我国将逐步建成一个由156台新一代多普勒雷达站组成的雷达网,这些站点的探测范围基本上覆盖了我国沿海、沿江、沿河等地区,使我国成为继美国之后全球第二大布设世界最先进雷达网的国家。应用多普勒雷达测雨,将成为水文气象界的一个趋势。

(3) GIS空间信息处理技术的不断发展,商用的GIS软件的出现大大方便了分布式空间信息的处理及计算,应用这些软件在普通的微型计算机工作站上就可以对大规模的流域进行计算,从而大大加快了分布式物理水文模型研究的步伐。

由于上述利于分布式物理水文模型研究和开发情况的出现,分布式物理水文模型的研究与应用得到了快速发展。国内外学者提出了一系列的分布式物理水文模型。国外学者提出的有WATERFLOOD模型^[21]、VIC模型^[22]、DHSVM模型^[23]、CASC2D模型^[24]、WetSpa模型^[25]、Vflo模型^[26]等。国内学者也提出了一些模型,如黄平等提出了一个分布式物理水文模型的构想^[27],并建立了一个森林分布式物理水文模型^[28]。杨大文等在日本期间提出了GBHM模型^[29],并在黄河等国内一些流域进行了应用研究^[30]。贾仰文、王浩等提出了WEP模型^[31],并在黄河流域水资源评价中将其发展成了WEP-L模型^[32]。郭生练等提出了一个基于DEM的分布式流域水文物理模型^[33]。穆宏强、夏军等提出了一个分布式水文生

态模型的理论框架^[34]。李兰等提出了 LL 模型^[35]。陈洋波等提出了一个分布式物理水文模型的框架^[36]。刘昌明、王中根、郑红星等结合黄河流域水文循环研究提出了三种尺度的分布式物理水文模型^[37~39]等。

1.2.2 分布式物理水文模型的优势

分布式物理水文模型根据研究与应用的需要,理论上可以将一个流域分成任意小的单元,并通过多种手段,确定各个单元上的物理特性数据,并根据这些流域特性,从物理意义上确定模型参数,而不再是像集总式模型一样,通过实测数据率定模型参数。与集总式模型相比,分布式物理水文模型的优势体现在如下四个方面。

1) 充分反映流域物理特性的空间变化

随着卫星遥感及航空测量技术的不断发展,获取高分辨率的流域物理特性数据不再是困难的事情。有了高分辨率的流域物理特性数据,就可以给不同的单元确定不同的模型参数,从而充分反映流域物理特性的空间变化。分布式物理水文模型的这一特点使其可以更容易应用于受水利工程影响的流域。在河流上修建水利工程已成为现代社会一个非常普遍的现象,水利工程的修建大大改变了流域的产汇流规律,进而引起流域水文过程的变化,分布式模型则可以在模型结构中直接体现出相应的变化,从而使它可以更准确地模拟和预测流域水文过程,提高水文模拟和预测的精度。

2) 可采用基于网格的高时空分辨率的流域降雨

流域降雨量是决定流域径流模拟/预报精度的重要因素之一。由于分布式物理水文模型将流域分成细小的单元,可以充分利用由数字气象雷达遥测的高时空分辨率的流域降雨量,或根据雨量计实测降雨进行空间插值得到的基于网格的流域降雨进行径流模拟和预报,从而充分考虑降雨在流域空间分布的不均匀性,有利于提高径流模拟及预报的精度。

3) 可进行精细化的流域径流模拟/预报

分布式物理水文模型将流域分成细小的单元,并研究各个单元上的径流过程,因而可以充分模拟/预报径流在整个流域上的分布及其运动过程,预测径流在整个流域内的发生、发展过程,进行精细化的流域径流模拟/预报。当用于流域洪水预报时,可以提供流域内更加细致的洪灾信息,为防洪救灾方案的制订、防洪救灾物资的输送提供依据;也可以用于研究流域的土壤侵蚀过程等。

4) 从物理意义上推求模型参数

分布式物理水文模型不再通过历史实测的水文过程来率定模型参数,而是通过流域物理特性直接推求,只需要极少量的水文资料就能确定出有物理意义的模型参数,因此适用于少水文资料的流域,以及受人类活动影响而引起流域物理特性

变化较大的流域和用于对稀遇水文过程(大洪水及特大洪水)的模拟和预报(此种水文过程的水文及气象条件难以简单重复,无法率定相应的模型参数)。

1.3 分布式物理水文模型在流域洪水预报中应用所面临的挑战

分布式物理水文模型目前的应用主要集中在流域或全球水文循环及土-植-气系统的水及能量平衡计算方面,在流域洪水预报中的应用虽然已取得一定进展,但目前国内外的应用还主要局限于规模较小的流域,对于在面积大于 1000km^2 的流域上的应用,国内外还很少见。流域洪水预报对结果的精度,特别是对洪水过程模拟和预报的精度要求较高,分布式物理水文模型在应用于流域洪水预报时,还面临下列的一些挑战。

1) 数据获取方面的挑战

分布式物理水文模型将流域划分成细小的单元,每个单元需要有独立的流域物理特性数据,因此对数据提出了较高的要求。随着卫星遥感技术的日益成熟,卫星遥感产品进入民用和科技领域,测量和制作大范围的流域物理特性数据已不再是困难的事,一批全球范围的高分辨率的流域物理特性数据库已可通过国际互联网免费获取。但此类数据库的分辨率较低,对大尺度的分布式物理水文模型的模拟,可以满足精度要求。如对土-植-气系统的模拟,因为单元的尺寸是十公里或百公里级,系统的范围为地区级,其对数据分辨率的要求不高,目前公用数据库的分辨率一般在 1km 左右,基本能满足研究工作的需要。但是,对于洪水预报,应用对象的范围一般是流域级,更由于结果要满足工程应用的要求,对单元尺寸的要求一般在十米或百米级,因此,目前公用的数据库的分辨率还难以满足流域洪水预报的工程应用要求,其中以 DEM 数据对分辨率的要求特别明显。根据作者经验,要利用 DEM 对流域进行汇流计算,DEM 的分辨率在百米级以内才能达到比较好的效果,否则由此推求的流域的流向及汇流路径就会出现误差,从而影响模型应用的效果。随着航空摄影测量的不断发展,分辨率更高的数据库不断出现,如互联网上新出现的一个空间分辨率为 90m ,覆盖全球范围的 DEM 数据库——SRTM 数字地形高程数据库(以下简称 SRTM 数据库)(<http://srtm.csi.cgiar.org/>)为构建流域洪水预报分布式物理水文模型提供了新的数据,此数据的分辨率可满足各类流域洪水预报的要求,但该数据库中数据的应用效果还有待于进一步验证。SRTM 数据库的出现,大大缓解了分布式物理水文模型在流域 DEM 数据获取方面的压力。

另外,由于在分布式物理水文模型中采用水力学方法进行流域汇流计算,需要有较详细的河道断面尺寸数据,这在大流域,特别是在流域的上游地区往往不易获