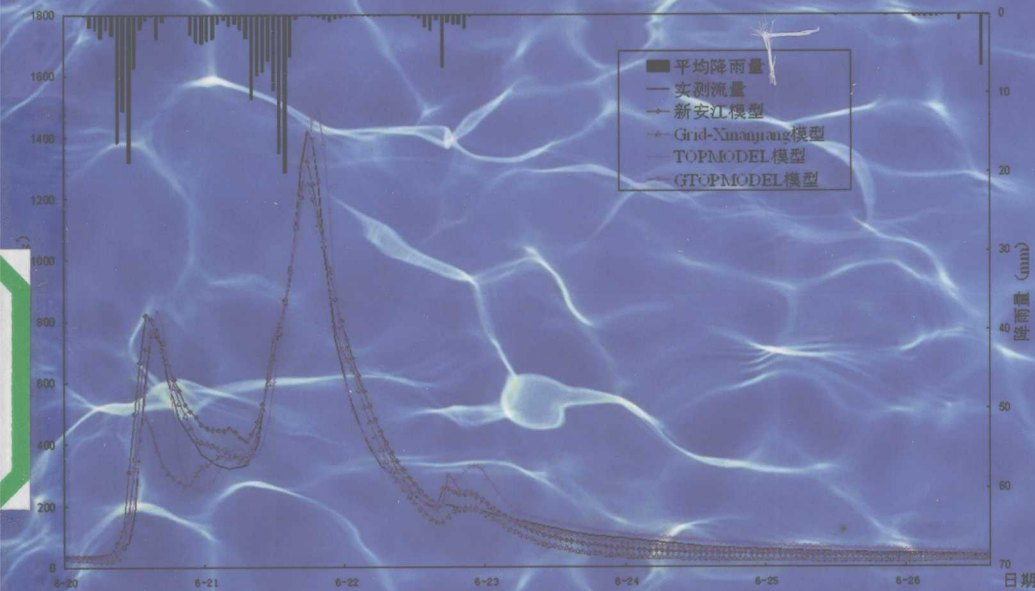


国家自然科学基金 (No. 50279006、No. 50479017)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0717)资助

水文模型的应用与研究

Application and Research of Hydrological modelling

李致家等 编著



河海大学出版社

国家自然科学基金 (No. 50279006、No. 50479017)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0717)资助

水文模型的应用与研究

Application and Research of Hydrological modelling

李致家等 编著

河海大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍用于洪水预报的水文模型原理、方法以及一些最新的进展。主要内容包括:水文模型的发展综述;基于 DEM 数字流域原理、方法和作者开发的软件;新安江模型应用中问题讨论及参数地理规律研究;TOPMODEL 原理与应用以及与新安江模型的比较;基于网格的新安江模型和 TOPMODEL;在新安江模型中增加了超渗产流模型;在半干旱地区对水文模型进行比较研究;雷达测雨以及采用全局优化方法进行新安江模型的参数率定。本书可供从事水情防汛、水文水资源和地理科学等专业科学工作者和工程技术人员参考,也可作为上述专业的大学本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水文模型的应用与研究 / 李致家等编著. —南京:河海大学出版社, 2008. 5

ISBN 978 - 7 - 5630 - 2482 - 7

I. 水… II. 李… III. 洪水—水文预报—流域模型—研究 IV. P426.616 P338

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 059658 号

书 名 / 水文模型的应用与研究

书 号 / ISBN 978 - 7 - 5630 - 2482 - 7/TV · 294

责任编辑 / 魏连

封面设计 / 王志强

出版发行 / 河海大学出版社

地 址 / 南京西康路 1 号(邮编:210098)

电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)

经 销 / 江苏省新华发行集团有限公司

印 刷 / 南京玉河印刷厂

开 本 / 850 毫米×1168 毫米 1/32

印 张 / 9.5

字 数 / 244 千字

版 次 / 2008 年 5 月第 1 版 2008 年 5 月第 1 次印刷

定 价 / 30.00 元

前 言

本书是作者多年来在研究生教学、研究生指导过程以及在科研工作中提炼出来的一些成果,其中包含了部分介绍本研究方向的前辈们及成熟的内容(参考文献已经进行了逐一标注)。部分研究内容是作者本人以及科研团队的研究成果,其中一些已经在有关的科技期刊上发表过。

本书第1章为水文模型发展综述,该章由河海大学李致家教授编著;第2章为基于DEM流域河网生成与特征提取,讲述基于DEM数字流域的基本原理、方法、主要软件介绍,最后介绍作者研制的一个软件,该章由河海大学姚成、安徽省水文局胡余忠高级工程师编著;第3章为新安江模型的应用,介绍新安江模型用于研究人类活动影响、旱情模拟和径流还原等应用、模型参数的地理规律以及大流域洪水预报研究,该章第一节到第三节由安徽省水文局胡余忠高级工程师和第四节由河海大学李致家著;第4章为TOPMODEL的应用与比较研究,介绍了TOPMODEL原理与应用、参数分析以及与新安江模型的比较,该章由河海大学李致家和谢帆编著;第5章为基于网格的水文模型,介绍基于网格的新安江模型和基于网格的TOPMODEL模型GTOPMODEL,该章由河海大学李致家、姚成和张珂著;第6章为增加超渗产流的新安江模型、模型的比较研究及雷达测雨的应用,该章由河海大学李致家、淮委沂沭泗水利管理局孔祥光教授级高级工程师、河海大学刘金涛著;第7章为全局优化方法在新安江模型参数优化中的应用研究,该章由河海大学李致家、上海市南汇区水务局翁明华高级工程师和河海大学辛朋磊编著。全书由李致家统稿,包红军、董小涛、徐倩参加了部分书稿的计算工作,李晓参加了部分书稿文字的整

理工作。

本书得到了河海大学水文水资源学院的出版资助。这些研究得到过国家自然科学基金委员会与水利部黄河水利委员会联合资助基金(No. 50279006)、国家自然科学基金(No. 50479017)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0717)和淮河流域气象开放研究基金以及淮河流域气象中心的资助,在此一并表示感谢。

编著者

2008年5月

目 录

前 言	(1)
第1章 水文模型发展综述	(1)
1.1 水文模型的发展历史	(1)
1.2 水文模型分类	(5)
1.3 尺度及其影响	(9)
第2章 基于 DEM 流域河网生成与特征提取	(14)
2.1 数字高程模型(DEM)简介	(14)
2.2 DEM 模型之间的相互转换	(19)
2.3 基于 DEM 的流域信息提取	(22)
2.4 常见数字流域参数提取工具应用分析	(37)
2.5 数字流域地形信息提取系统(TACS—01)	(42)
第3章 新安江模型的应用	(50)
3.1 新安江模型在人类活动影响等方面的应用	(50)
3.2 新安江模型汇流参数规律	(76)
3.3 模型参数调试与相关处理	(88)
3.4 新安江模型在大流域洪水预报中的应用	(95)
第4章 TOPMODEL 的应用与比较研究	(105)
4.1 TOPMODEL 的原理	(105)
4.2 TOPMODEL 在钱塘江流域的应用	(117)
4.3 TOPMODEL 与新安江模型的比较	(124)

4.4	TOPMODEL 中初值问题的探讨	(134)
4.5	TOPMODEL 参数规律的研究	(139)
4.6	结论	(145)
第5章	基于网格的水文模型	(148)
5.1	GTOPMODEL 模型	(148)
5.2	Grid - Xinanjiang 模型	(178)
第6章	增加超渗产流的新安江模型和模型比较研究及雷 达测雨的应用	(208)
6.1	增加超渗产流模型的新安江模型	(208)
6.2	3 个水文模型在半干旱地区的应用与比较	(215)
6.3	雷达估测降雨与水文模型的耦合在洪水预报中的应 用	(226)
第7章	全局优化方法在新安江模型参数优化中的应用研究.....	(241)
7.1	引言	(241)
7.2	单纯形方法的应用	(250)
7.3	SCE—UA 方法的应用	(260)
7.4	结论与展望	(292)

第 1 章 水文模型发展综述

1.1 水文模型的发展历史

水文模型一直是水文学研究的热点。水文模型研究和应用朝着两个明显的方向发展,其一是用于洪水预报、水文设计及其流域管理;其二是用于水文机理研究、气候变化和下垫面变化对水文过程的影响、流域的水文与环境过程模拟与预测。

从水文学的产汇流机制发展过程来看,有两个重要的发展阶段:一是 20 世纪二三十年代霍尔顿产流理论和谢尔曼经验单位线;二是西方国家在六七十年代以来开展的野外山坡水文机理实验,揭示了非饱和侧向流、壤中流和饱和地面径流多种产流机制的存在^[1~7]。第一个发展阶段,诞生了用于洪水预报的概念性水文模型的雏形;第二个发展阶段,不但促进了概念性水文模型的发展和深化,也诞生了基于物理基础的分布式水文模型。

用于洪水预报的水文模型是由于人们为了抵御大洪水危害需要而发展起来的。洪水一直是威胁人们生命财产的最大自然灾害之一,据统计由洪水造成的年平均损失居于自然灾害的首位,如我国 1998 年长江与东北洪水、2001 年长江洪水、2003 年淮河与黄河大洪水、2005 年与 2007 年淮河大洪水,给国民经济和人民生命财产带来了巨大的损失,我国各地政府部门投入大量的经费,利用最新遥感、遥测与卫星等技术,实时地监测与预测洪水灾害的发生和评估洪水灾害。洪水预报追求的是高精度和预见期长。大江大河的实时洪水预报由流域的降雨—径流预报和河道洪水预报组成,水库的入库洪水预报主要是降雨—径流的预报。要得到高精度和长预见期预报必须从降雨开始,采用降雨—径流模型。降雨—径

流的预报精度制约了流域洪水预报的精度。因此,如何提高降雨—径流模型的预报精度就成为目前洪水预报乃至水文学研究中的难点和热点之一。降雨量是洪水预报中需要的最重要的信息。如何精确并及时的测得下到地面的降雨一直是水文部门追求的目标。水文部门雨量信息主要是由地面人工观测或者自动遥测雨量计测到的,对于大江大河湿润地区,一般站网密度是 $200\sim 300\text{km}^2$ 布设一个雨量站,对于我国北方半干旱和干旱地区,由于局部雷暴引起的洪水,则需要更密的雨量站网。目前我国基本完成了大江大河自动遥测雨量站网系统,将原来几个小时的报讯时段缩短到一个小时以内,大大提高了大江大河水情信息传输的速度。而且,近年来气象部门又在全国布设了现代天气测雨雷达系统,可以得到 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 网格上的面平均雨量。与此同时,气象部门开始了中尺度数值天气预报的研究和业务,可以得到一定精度的预报雨量。所有这些都为采用降雨—径流模型提高洪水预报的精度和增加预见期提供了非常好的基础。从 20 世纪 70 年代起欧美等发达国家就开始研究利用天气雷达进行暴雨观测^[8],在 80 年代之后又与水文模型结合起来进行洪水预报和洪水调度,2004 年美国天气局进行 DMIP(Distributed Model Intercomparison Project)项目的时候采用了新一代天气雷达估测 $4\text{km}\times 4\text{km}$ 的网格雨量资料^[9~17],我国也进行过类似的研究^[18~19]。

在洪水预报中,对于降雨—径流预报目前国内普遍采用的是经验的降雨—径流预报方案与降雨—径流模型,如新安江模型^[1~2]。在用于洪水预报的降雨—径流水文模型研究方面,国际上进行了三个比较研究:第一是在 1974 年,世界气象组织(WMO)曾对当时有代表性的十个模型进行验证对比,当时参与的模型有概念性模型和黑箱模型,如萨克拉门托(SAC)、坦克、包夫顿以及 CLS 模型等^[1],这是第一代的水文模型。在 20 世纪 90 年代中期,从实时洪水预报的角度对水文模型进行过比较研究,该比较研究的结论之一是,采用水文资料可以率定的水文模型参数

最多是3~4个。新世纪的到来,随着计算机与遥感科学的飞速发展,分布式水文模型成为水文学研究的热点,开发出了很多分布式水文模型,同时公众社会对水文预报和洪水预报提出了更高的要求,因此,如何评价分布式水文模型在水文预报和洪水预报中的应用,是一个需要研究的问题。为此,在2002—2004年,美国天气局水文办公室(National Weather Service, Office of Hydrologic Development, NOAA)组织了该比较研究工作,即DMIP^[20~27]。参加该比较的分布式水文模型有13个,能够用于洪水预报的有8个,如美国天气局的基于SAC模型的HL—RMS,美国Utah大学开发的基于TOPMODEL的TOPNET,丹麦的MIKE 11, Massachusetts大学开发的tRIBS,加拿大Waterloo大学开发的WATE-FLOOD。选择了7个流域,流域面积65~2 484 km²,在流域内还有实测的流量站,以便于比较,流域年雨量均为1 200 mm,属于湿润地区,另外,测雨天气雷达覆盖了这些流域,流域内有4 km×4 km的网格雷达测雨资料。经过比较研究有几个主要的结论:按照现在的标准,虽然对于大多数情况集总模型优于分布式模型,但是率定过的分布式模型优于或者至少相当于率定过的集总模型;通过仔细的模型率定可以发挥分布式水文模型的优点;分布式水文模型不但可以预报流域出口的流量过程,也可以预报流域内某个没有率定的子流域的流量过程;研究显示对于大部分的流域,采用概念性的降雨—径流模型和基于物理基础汇流模型的分布式水文模型较好,但特别小的流域除外;对于精度较高的雨量资料,分布式水文模型能够得到很好的预报成果。

与用于洪水预报的水文模型一样,用于研究水文机理和下垫面变化对水文过程的影响的水文模型,也是由于研究水文机理以及国内外从20世纪70年代之后,由于人们需要研究下垫面的剧烈变化而引起的水文过程变化而快速发展起来的。

结合产汇流机制研究的发展历史可以看出,第一代的降雨—径流经验预报是与霍尔顿产流理论和谢尔曼单位线联系在一起

的,第二代以后的水文模型则与山坡水文学的理论联系在一起。20 世纪 70 年代初,水文模型的发展就沿着两个方向进行:其一是为了进行洪水预报而设计的概念性模型,如美国的 SAC 模型、日本的水箱模型、中国的新安江模型、瑞典的包夫顿模型和 MIKE 系列中的产流 NAM 模型。其二是根据山坡水文学构造的基于物理基础的分布式水文模型^[7,29~35],如英国水文学家 Freeze 和 Harlan 在 1969 年提出了分布式水文模型的构造框架:考虑各向异性土壤一、二维产流、三维的地下水和一维具有侧向和下渗的明渠非恒定流模型。这个框架的实质就是对于壤中流采用达西定律以及采用微分形式的质量和能量守恒方程。MIKE SHE 就是按照这个框架构造的。在这段时间,由于欧美等国家需要评估流域下垫面的变化对水文的影响,急需具有物理基础的分布式水文模型,水文学家们对 Freeze 和 Harlan 提出的框架充满着希望。

英国著名的水文学家 Beven 教授在 2002 年 Hydrological Processes 上发表的论文《Towards an Alternative Blueprint for a Physically Based Digitally Simulated Hydrologic Response Modeling System》和 2006 年在河海大学讲学时提到^[35~36]:由于土壤的各向异性以及由于大孔隙而形成的某个方向的壤中流,实际上很难采用微分形式的达西定律计算壤中流。1996 年把 MIKE SHE 模型在丹麦和法国进行了应用比较,发现模拟的结果具有很大的不确定性^[31,42]。为此 Beven 教授在 20 世纪 80 年代设计了 TOPMODEL,该模型是一个大大简化的、基于物理基础的半分布式水文模型^[32,35]。Beven 教授还指出:应该采用新的框架代替 Freeze 和 Harlan 提出的框架,虽然 Beven 教授没有提出具体的框架内容,但还是提出:不采用微分形式,而是采用积分形式的控制体积的物质和能量守恒方程,这样自然把模型的参数与流域的尺度联系在一起了。实际上 TOPMODEL 就是这样的。

针对 Freeze 和 Harlan 框架的问题,1998 年 Reggiani 提出了根据热力学第二定律和熵理论,采用控制体积法建立分布式水文

模型的理论和方法,并提出建立流域产汇流结构方程的设想。该框架提出的模型由于引进了许多与流域尺度相关的参数但却没有提出参数的估算方法而遭到了怀疑^[37~38]。

综上所述可以看出,近十几年来基于物理基础的分布式水文模型一直是国际上水文学家研究的热点,虽然有不少争论和分歧,但有几点还是可以肯定的:①由于土壤的各向异性,Freeze 和 Harlan 提出的基于物理基础的分布式水文框架应当被摒弃或者至少被修改,应当考虑采用积分形式的控制体积的物质和能量守恒方程作为物理基础的框架;②分布式水文模型的参数与单元流域尺度有关,目前还没有找到不同尺度之间的转换规律;③分布式水文模型的变量是单元流域的平均量,如土壤含水量、壤中流流速等。水文学上还没有测量单元土壤含水量和单元流域壤中流流速的方法,目前能够测量的只有点的地下水位、河道断面流量和断面水位。因此,分布式水文模型的率定主要还是依赖于流域出口实测的流量和水位。只有等到水文上可以进行单元流域水文变量的测量时,才能真正地进行分布式水文模型的研究;④分布式水文模型能够用于洪水预报。适用于洪水预报的分布式水文模型是概念性的降雨—径流模型和基于物理基础分布式的汇流模型;⑤用于洪水预报的分布式水文模型大都采用网格型的单元流域,可以是正交的,也可以任意三角形的网格,模型参数可以通过遥感和 GIS 提取^[39~41];⑥不同的参数组合可能会得到相同的精度,使模型具有一定的不确定性^[42]。

1.2 水文模型分类

有很多为了不同目的而设计的流域水文模型,很多模型结构相似,因为其基本的假设是相同的,也有一些模型有明显的区别^[32]。流域模型可以根据不同的标准分类:对流域水文过程描述、模型尺度以及模型的求解方法。如图 1-1,图 1-2 和图 1-3 所示。



图 1-1 水文模型按过程分类



图 1-2 水文模型按尺度分类



图 1-3 水文模型按求解方法分类

1.2.1 以过程为基础的分类

一个水文模型包括五个部分：流域几何特性、模型输入、控制方程、初始及边界条件和模型的输出。根据模型的类型，这几个部分可以选择性地结合。根据对水文过程的描述，结合流域的特征，

模型可分为集总式和分布式,确定性、随机与混合模型。

集总式模型可由普通的微分方程表达,但它没有考虑水文过程、输入、边界条件及流域几何特征的空间变化(见表1-1)。对于大多数的集总式模型,水文过程一些可由基于简化的水力学公式的常微分方程描述,另一些过程则由经验的代数公式如 HEC-1、ROB、SSARR 和 TANK 模型等。

表 1-1 集总式和分布式水文模型

输入	系统特征	水文过程	控制方程	输出	模型类型
集总式	集总式	集总式	常微分方程	集总式	集总式
集总式	集总式	分布式	微分方程	分布式	分布式
分布式	分布式	分布式	微分方程	分布式	分布式
分布式	集总式	分布式	微分方程	分布式	分布式

分布式模型,其特征是考虑了过程、输入、边界条件及流域几何特征的空间变异性。实际中,由于实测或者实验资料的缺乏,妨碍了分布式模型的使用。在一些情况下,系统特征是集总的,部分过程是集总的,输入及部分边界条件也是集总的,但一些直接联系到输出的环节是分布的,如降雨—径流过程,该类模型可称为半分布式水文模型。半分布式水文模型是介于集总式模型和分布式模型之间的一种模型。其典型代表是以地形为水文过程空间变异性基础的 TOPMODEL。分布式模型有 SHE、IHM、SWMM 和 NWS-RFS 模型。

根据模型的结构,过程描述的模型同样可分为确定性模型、随机性模型和混合模型。

1.2.2 以时间尺度为基础分类

流域水文模型可以时间尺度为基础分类。根据时间尺度,模型可分为:连续时间或事件模型、日模型、月模型和年模型。分类是基于计算的时间段。如果模型结构需要短时间段,如一个小时

或更短,便可称为短历时模型。当然,时段的选择是基于模型的需要。

1.2.3 基于空间尺度的分类

基于空间尺度可分为:小流域模型、中等流域模型和大流域模型。但对小流域的定义还有些模糊。通常,流域的面积在 100km^2 或更小范围内的称为小流域,在 $100\sim 1\,000\text{km}^2$ 的称为中等流域,大于 $1\,000\text{km}^2$ 的称为大流域。这样的定义有时过于概念性和武断,缺乏物理意义。重要的是概念的一致性和水文过程平衡。流域的产流分两个阶段:坡面漫流及河道汇流。每个阶段有它自己的特点,大流域河网发达,蓄水主要集中在河道,这样的流域对短历时或大强度的降雨不很敏感。相反,小流域主要是坡面漫流,河道调蓄作用小,对大强度、短历时降雨很敏感。

如果认为三种类型的流域在空间上相同,就会有相似的水文特性,那么流域的分类就没有实际意义了。在实际中流域很少是各向同性的,所以土壤和土地使用特性很重要,从这个意义上说没有一个流域是小流域的。

1.2.4 以求解方法为基础的分类

流域水文模型可根据不同的求解方法和技术分为:数值解模型、模拟模型和分析解模型。其中数值解模型又可根据数学求解方法分为:有限差模型、有限元模型、边界元模型、贴边界坐标模型和混合模型。

1.2.5 其他分类

1. 基于土地使用类型的分类

基于土地的使用,流域水文模型可分为:农业地区模型、城市模型、森林及山地模型、沙漠模型、山区模型、沿海模型、沼泽模型与混合模型。很多时候,大流域甚至一些中等流域混合了多种土地使用类型,而这些不同的土地使用情况在水文特性上差别很大。例如对农业地区的研究就有专门的农业水文学,同样,在城市流域就有城市水文学,等等。由于每个流域土壤、地质及植被的不同,

使水文过程产生很大差异,因此不同土地使用情况的流域模型便有了很大区别。

2. 基于模型使用目的分类

流域水文模型基于不同的使用目的可分为:规划模型、管理模型和预报模型。一个完备的流域水文模型可以完成规划、管理水资源等多方面的任务。一方面它为管理决策提供系统的分析;另一方面,它提供可靠的流域预报资料来支撑管理决策。对于规划模型,它对地理及空间的定义不是十分精确,因此使用规划模型的原则是分析河网系统的管理策略。规划和管理模型最大的特点,是能够提供规划者或管理者以改善经济为目的再次审视过去的决策进而做出新的决策。

1.3 尺度及其影响^[32]

在水文模拟中一般有五种尺度:实验室尺度、坡面尺度、集水区尺度、流域尺度和大陆及全球尺度。实验室尺度模型使用的流体动力学方程往往是一维的。坡面尺度模型包含了地表径流和壤中流,有时还包含了土壤孔隙中某个方向上的水流,这时需要二维甚至三维的模型。集水区尺度模型在地表径流模拟中加入了地形,在基流模拟中加入了地质特性,通常把集水区划分为各向同性的一个个小部分。流域尺度模型把调蓄和平移机制应用于流域汇流。大陆及全球尺度模型多关注大气过程及其与陆面过程间的相互关系。

尺度及其影响与流域各向异性有关。在小尺度下各向异性比较小,在大尺度下则较大。显然,在大陆及全球尺度下各向异性最大,在实验室尺度下最小。各向异性由三方面组成:首先,各向异性最主要的来源面是天气、气候、地形、土壤和地质。一个流域响应就是这些因素的组合。其次是不同土壤类型分界、地质上不连续的边界或不同植被的分界。水文因素如降水、植物截流、蒸发、下渗、基流和径流的不同加剧了各向差异性。这些因素还包括一

些物理特性,如树木、地面的山脊、土壤层表面的凸起、土层的几何特征,等等。

水文模型是用参数描述整个流域过程的,而反映流域特征的数据是在一些点收集到的,点的数据很难转化成为面的数据。由此引起的问题是,什么样的尺度最适合于水文模拟,随着空间尺度由小到大,流域的响应会变得越来越不敏感。一方面,如流域具有较大的各向异性,模型的尺度最好要小。模型的空间尺度由引起水文响应变化的流域的物理性的植被和地形特征的变异决定。这样我们就定义一个流域的尺度:一个单元流域或者一个子流域。这个单元流域或者子流域内看作是均匀的。这个尺度不能太小,不然局部的物理特征控制了水文过程;也不能太大,使得忽略了各向异性导致的流域特征的空间变化。最好的流域尺度取决于水文响应过程及可得到的水文数据。

参考文献

- [1] 赵人俊. 流域水文模型——新安江模型与陕北模型. 北京: 水利电力出版社, 1983
- [2] 赵人俊. 水文预报文集. 北京: 水利电力出版社, 1994
- [3] 芮孝芳著. 水文学原理. 北京: 水利水电出版社, 2004
- [4] 芮孝芳, 陈界仁. 河流水文学. 南京: 河海大学出版社, 2003
- [5] 芮孝芳. 水文学研究进展. 南京: 河海大学出版社, 2007
- [6] 刘新仁, 王炳程主译, 赵人俊校. 山坡水文学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989
- [7] M. J. Kirkby. Hillslope Hydrology. Chichester: John Wiley & Sons, 1978
- [8] Vince Collinge, Celia Kirby. Weather Radar and Flood Forecasting. Chichester: A Wiley-Interscience Publication, 1987
- [9] K. Jasper, Gurtz, J. & Lang, H. Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model. J. Hydrol. 2002, 267(1-2)