

程根伟 舒栋材 著

水文预报的理论 与数学模型



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水文预报的理论 与数学模型

程根伟 舒栋材 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

水文预报的理论与数学模型/程根伟, 舒栋材著.
北京: 中国水利水电出版社, 2006
ISBN 7-5084-3829-9

I. 水... II. ①程...②舒... III. ①水文预报—理论②水文预报—数学模型 IV. P338

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 071929 号

书 名	水文预报的理论与数学模型
作 者	程根伟 舒栋材 著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32 开本 8.125 印张 218 千字
版 次	2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

内 容 提 要

水文预报是水文学原理在流域水资源管理方面的应用技术，数学模型是进行水文预报最重要的方法。本书结合西南地区的水文观测试验结果，对不同流域和河道径流预测的关键问题进行了综合的介绍，特别是对森林区流域水文模型、岩溶区水文模型方法、河道洪水演算模型进行了讨论，还阐述了分布式水文数学模型的设计思想与建模技术。运用动态系统理论研究了模型的稳定性条件、参数可识别性等基本问题，分析了决定预报精度的相关因素。本书重点介绍了水文数学模型的实时校正方法，探讨了水文模型智能化的理论与实现途径，提出了一种按照专家知识进行判决仿真的人工智能预报模型。其目的是对我国近期在水文预报理论与技术方面的相关成果进行总结，为有关科技人员和学者提供可以参照使用的分析工具。

本书可以作为工程水文学、流域水文模型与作业预报方面的教材，也可供研究生教学辅助参考。

前 言

水文过程的数学模拟是工程水文学的重要内容，从降水输入到流域出口的径流过程的计算不但是水文预报的中心问题，而且也是水资源估算和利用、设计洪水、环境水质评价、城市水文学、农业水文学、地下水文学等分支学科的核心问题。因此如何逼真地再现流域水文过程就成为整个水文研究的基础环节。

水文现象是地球大气环流活动和流域上复杂的地质、地貌、土壤、植被等因素综合作用的结果，水文学主要研究大气降水到达地面之后发生的物理变化与人工干预对径流的影响。虽然决定水质点在流域场中运动的基本规律与通常的物理和力学定律没有什么不同，但是由于流域面上自然条件复杂多变的特点，使得在统一的自然规律支配下，实际发生的水文规律却由于降水分布、下垫面形态和地质构成差异而迥然不同。由于流域内的许多控制因素和参变量无法直接观测和事先确定，因而很难由已掌握的水文条件唯一地决定未来将出现的水文事件，在水文研究中，必须采用一些适合这种信息不充足情况的独特研究方法。

多因素经验相关、径流成因分析和流域水文数学模型，构成水文预报技术发展中的三个主要阶段，它们是水文预报方法从经验估计达到理论预测的进步，尤其是电子计算机的普及，使得原来只能作定性讨论的径流形成机制深化成为实用的数学模拟模型，在计算精度和时效上都可以满足工程应用上的基本要求，先进的计算机技术和现代水文数学模型的结合是推动水文模拟技术前进的动力。

从水文现象的理论认识和工程应用要求看，现有的水文模拟方法都还有诸多不足之处，水文学还不具备一个完备学科所必须的稳定的理论基础、清晰的研究思想和完备的分析方法，而有些

偏重于水利工程实际所要求的分析结论。然而工程应用方面又对它的计算精度、分析可靠程度存在疑虑。这两个因素导致新的水文概念和模拟方法不断涌现。据 WMO 的研究报告,全世界现有水文模型上百种,对所作的十几种有代表性的模型对比分析,其主要的精度指标和预报能力都相去不远,要进一步提高现有模型的精度面临着若干实质性的困难,因此如何开辟新的途径,使水文分析方法和模拟技术得到进一步的提高,是目前水文界瞩目的课题。

提高模拟水平包含两方面的内容:其一是探索水文现象本身的规律性,研究模拟理论。其二是改善模型结构,提高模型的仿真能力。由于流域是一个分散输入分布参数的系统,现有的集中输入集总参数模型难以完全仿真,因而模拟的误差中相当部分产生于这种不可避免的概化和近似中,因此改进模型结构尚有相当大的潜力。

模拟偏差的另一部分原因是观测的输入和输出不准确造成,即便模型是理想的数学物理体系(完全物理仿真),也不能使计算误差减少到零,因此还必须研究由于资料不可靠引起的误差,并研究克服这类误差的方法,如果忽视这方面的工作,要使整个模型研究达到更高的水平是不可能的。

从制约水文模拟精度的限制性因素分析,作者认为水文研究将可能在三个方面有所发展,第一是继续进行山坡水文学、动力水文学和径流实验研究,将研究成果转化为水文数学模型理论,使系统结构更合理、参数更可靠,这是解决模型仿真性的途径。第二是采用实时估计和预报校正技术,在模拟中吸收实时水文信息,降低过去误差对未来预报结果的影响,减小未知的不确定因素造成的误差。这种方法目的是克服输入信息的不可靠对模拟精度的限制,同时对于模型本身的误差也可补偿。第三是研究水文模型智能化方案和模拟专家系统,将模型计算与专家经验修正结合,利用启发式算法和多因素非定规判决各自的特点,以增强模型的适应能力,提高模型综合处理效能。

上述前两点是最近 30 年来水文模拟技术的延续,其主要代表是流域水文模型(如新安江、萨克、斯坦福模型),河道洪水演进模型(如马斯京根法、特征河长法、动力波法),以及各种实时校正模型(自回归、滑动平均、误差实时校正、卡尔曼滤波)。本文在此之上又提出三峡河道洪水演进模型和新安江岩溶模型,并在参考一校正模型结构中提出一种形状校正—误差自回归结合的方法,希望通过这方面的研究将能对水文模拟技术发展有所帮助。

水文模型智能化和专家咨询系统的研究无论在国内还是国外都是空白。本文在若干方面作了初步探索,包括水文智能系统的组成结构,智能接口的主要功能,解决了自然语言(英文)人机对话困难,研究了模型信息的输入、计算机表达、模糊推理、多因素评判的模糊控制这几个问题,提出了专家知识的量化、表达和存储原理,设计成具有学习记忆、自适应、理解自然语言和能模拟专家预报决策的智能模型。智能系统可综合各种水文信息及专家的经验知识,改善了模拟精度,具有在复杂情况下的适应能力,这方面的研究为确定性水文模拟的发展开辟了新的道路。

本书的研究内容和编写出版工作得到了国家自然科学基金项目(森林水文效应的流域尺度作用及分布式水文模型研究:30271042)和中国长江电力股份公司重大项目(长江上游大型水库群蓄水调度实时监控及决策支持系统:长电调科 2005—04)的资助,并且得到三峡梯调中心袁杰主任、肖舸副主任、王玉华主任工程师等的支持。四川省水文水资源勘测局陈桂蓉高级工程师、博士研究生范继辉、麻泽龙、肖飞鹏等参加了相关的分析工作,特此表示深切感谢。

由于作者研究领域和水平所限,本书的内容没有包括河道水文预报中的许多经验相关方法,例如相应水位法、涨差法等,尽管这些方法是在大江河洪水预报中使用的技术,也没有讨论基于超渗产流的预报技术,而这是干旱区产流的重要方法。本书中的其他缺漏和错误,也希望读者加以指正,以便修订完善。

谨以本书纪念导师赵人俊教授和林三益教授，缅怀他们在水文预报上的杰出贡献和对作者的关心培养。

作者

写于中科院成都山地所

2005 年 10 月

目 录

前言

第一章 流域水文模拟技术进展	1
第一节 水文数学模型历史评述	1
第二节 降雨径流模型	5
第三节 流域及河道汇流模型	13
第四节 集总系统变换方法	26
第五节 水文数学模型的系统理论	33
第六节 水文预报精度的主要限制	40
第七节 确定性水文模拟的发展方向	43
第二章 岩溶流域水文数学模型	48
第一节 岩溶地区水文特点	48
第二节 岩溶水文模拟的基本方法	51
第三节 新安江岩溶水文模型结构	52
第四节 算法结构与参数分析	53
第五节 岩溶水文模型检验	57
第三章 基于分布式结构的降雨径流模型	59
第一节 山地森林区的主要水文过程	59
第二节 分布式水文模型结构	67
第三节 单元水文模型	68
第四节 河网汇流演算模型	83
第五节 模型参数	84
第六节 模型应用实例	85
第四章 数字水系的提取及流域离散化研究	90
第一节 数字高程模型 (DEM)	90
第二节 基于 DEM 的数字水系生成	91

第三节	基于水文响应单元 (HRU) 的数字流域 离散化研究	104
第四节	流域拓扑关系算法研究	111
第五节	基于流域拓扑关系的河道汇流模型	119
第五章	流域气象要素的空间插值	123
第一节	降雨资料的插值处理	124
第二节	气温资料的插值处理	131
第三节	蒸发能力的空间变化	133
第六章	河道洪水演进模型	138
第一节	广义示储流量和水位关系	139
第二节	新 $Q \sim H$ 绳套方程	146
第三节	三峡河道洪水演算模型	148
第四节	河道演算模型的理论分析	151
第五节	参数讨论	156
第六节	SXRFM 的检验	159
第七节	三峡模型的进一步讨论	161
第八节	河流退水预报模型	166
第七章	实时校正水文模型	176
第一节	实时系统建模与模型特性	176
第二节	递推最小二乘法与广义最小二乘法	183
第三节	卡尔曼滤波 (KF)	188
第四节	特殊 KF 算法	191
第五节	KF 在水文预报中的应用	197
第八章	流域水文模型的发展趋势	202
第一节	提高降雨估计的精度与预见期	203
第二节	控制论与水文模型的结合	204
第三节	人工智能和学习模型	206
第九章	智能水文模型与专家系统	219
第一节	水文模型智能化	219
第二节	智能接口与自然语言辨识	221

第三节	模糊推理及模糊控制器	226
第四节	专家知识的量化与识别	231
第五节	参考校正模型与参数估计	232
第六节	一个具有稳健性的水文模拟专家系统	237
参考文献		243

第一章 流域水文模拟技术进展

水文预报的中心任务是及时准确地将流域中发生的水文现象和径流过程确定出来,水文数学模型是实现这一任务的最有力的工具,在水文模拟中所采用的数学方法有多种,其中主要的是确定性模型和随机性模型以及它们的组合形式,并将其扩展到实时校正计算,以考虑模拟中不可避免的不确定性因素。

模型是把流域或河流类比为—个确定性转换系统,遵循水量平衡、时段递推、物理概化和逻辑完整等原则构成一个有机联系的推理计算体系。数学模型的发展历史虽然只有 40 来年,但是其主要理论依据和研究方法却可以追溯到更早的水文学初创时期,下面就这方面的发展进程和主要成就作一个概要的回顾。

第一节 水文数学模型历史评述

模拟模型是代表流域中某一阶段水体运动过程的数学描述关系,它将水文现象中的物理概念和状态方程概化为一个推理计算格式,并且按水文现象的时序关系、空间关联、水力联系建立起有序的逻辑协调的计算程式,其物理基础是产汇流的理论,因此模型的发展就是这些产汇流基本物理概念的认识进程。

水文数学模型的早期形式是由 20 世纪 30 年代的谢尔曼单位线 (K. L. Sherman, 1932) 和霍顿下渗曲线 (Horton, 1933) 开始的,下渗曲线对产流的物理过程作出一种概念性假设,即用土壤表面入渗能力和变化反映土壤吸水规律,用雨强 i_t 与下渗能力 f_t 的关系代表产流的控制条件。

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (1-1)$$

$$r_t = [i_t - f_t]^+ \quad (1-2)$$

其中 r_t 是净雨强度, $[\cdot]^+$ 是取正算子, 即

$$[a]^+ = \begin{cases} a & a \geq 0 \\ 0 & a < 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

在汇流中, 谢尔曼单位线是以流域典型的输出过程 (单位过程线 u_t) 作为模板, 对输入 R_t 进行缩放和叠加产生输出:

$$Q_t = \sum_{\tau=1}^m R_{t-\tau} U_{\tau} \quad (1-4)$$

谢尔曼经验单位线后来演化为系统分析中的响应函数和纳西瞬时单位线, 下渗曲线也得到分析证明。

20 世纪 40 年代美国麦卡锡 (G. T. McCarthy) 在 Muskingum 河流预报中采用对入流出流加权的蓄泄关系模拟河道洪水演进取得很大成功, 后来的研究找到了马斯京根方法 (M 法) 与扩散波的联系, 建立了 M 法参数与河段水力学条件的转换关系, M 法实际上是建立了河道水力学方法与水文学方法之间的桥梁。

我国早期普遍应用的降雨径流 (P—Pa—R) 相关图从另一方面反映了产流现象的基本规律, 它首先是从经验的水文分析中找到一个长时期的流域降水总量与总径流量之间的关系, 然后将其用在次洪计算中, 虽然根据不足, 但确实能在许多地区适用, 这一方法以后在蓄满产流模型中得到解释和改进。

上述几种基本方法是建立在经验分析和试验统计的基础之上, 没有自己的逻辑推理体系, 运用中受主观判定和适用条件影响很大。现代的水文数学模型是在电子计算机出现之后, 计算技术与水文原理结合的产物, 这些新的模型都具有一定的系统状态变量, 按照水量平衡、计算稳定、逻辑严谨和可逐时段递推的几个要求设计, 有代表性的几种模型是:

1966 年美国 Stanford 大学林斯勒 (R. Linsley) 等人推出的斯坦福—IV 模型, 它在产流中应用了下渗能力随空间分布的概念、蒸发能力空间不均概念以及坡面流的运动波方法, 在国外小流域水文模拟中应用较广。

1973 年在美国萨克拉门托河流 (Sacramento) 中应用的萨克模型, 采用土壤蓄水和泄水单元模拟土壤水分转换, 并提出张力水、自由水不同形态的转换概念, 一般模拟效果超过斯坦福模型。

1974 年日本管原正己设计的水箱模型是完全基于蓄泄关系建立的。它是一系列开口水箱的串并联组合, 该模型结构灵活可变, 完全由实际计算效果决定。由于它结构不固定, 可以随需要修改, 因此适应能力很强, 拟合效果较好, 但这种方法没有明确的产汇流概念和参数物理意义。

我国 1975 年由原华东水利学院赵人俊教授研制的新安江水文模型是基于蓄水容量控制的蓄满产流模式。该模型提出了蓄水容量分布曲线概念及一套确定土壤蓄水、蒸散发、产流量计算的完整算法, 在湿润地区应用获得成功, 并统一解释了过去的 $P-R$ 相关计算的水文学根据, 之后又在水源划分、时段转换和空间分解等方面作了改进, 成为国内主要的水文过程模拟工具。

在此之后, 水文模型的发展主要集中在实时校正方面, 如意大利的 CLS 模型应用 Kalman 滤波进行实时改正, Todini 研究了状态与参数交替估计的自适应滤波方法, R. J. Carmeron, 朱华将 M 法演算公式改写为状态方程形式, 可采用滤波算法作河道洪水计算, 葛守西、胡宏达研究了新安江产流模型的滤波算法, 葛洲坝三三〇工程局、南京水文水资源研究所和河海大学分别采用误差自回归对长江、黄河的计算模拟结果进行校正, 可以显著地改善计算精度。

上面是主要几种有影响的模型技术, 一般都可用作模拟校核检验, 但要用在预报中还有一些特殊问题需要解决, 首先是实时信息的传递, 这只有在现代通讯技术下, 应用卫星、微波、光纤通讯才能实现, 大量信息的及时处理使计算机成为必不可少的工具, 在这里快速及时是胜过一切的目标, 因此作为实时预报的模型反而设计得较为简单, 以下是国外几个水文预报系统的主要

结构。

一、英国 Ding 河流预报系统

该系统将全流域划分为子流域和河道，对于子流域，假定一个流域蓄泄函数

$$S = k \lg Q + C \quad (1-5)$$

然后分别按有无降雨采用两种简化模式计算出流

$$\text{无雨期: } Q_{t+1} = Q_t / \left(l + Q_t \frac{l}{k} \right) \quad (1-6)$$

$$\text{有雨期: } Q_{t+1} = Q_t / \left[e^{-P \frac{l}{k}} + (1 - e^{-P \frac{l}{k}}) \frac{Q_t}{P} \right] \quad (1-7)$$

上式 P 是输入毛雨量， l 是预见期， k 是优选参数。

子流域出流分段汇入河槽后，在河道部分采用差分法解如下扩散波方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \bar{c}(Q) \frac{\partial Q}{\partial x} = Q \bar{a}(Q) \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \bar{c}(Q) q \quad (1-8)$$

式中： Q 是出口流量； q 是子块入流； $\bar{c}$ 、 $\bar{a}$ 是与 Q 有关的波速和扩散系数。对于干流下段，则采用线性水库加可变滞时河道调节。

二、英国哈丁顿系统

假设流域的蓄泄关系为

$$S = aQ^{\frac{1}{2}} \quad (1-9)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{2}{a} (P' - Q) Q^{\frac{1}{2}} \quad (1-10)$$

和降雨径流关系

$$P'_t = CP_t - b \quad (1-11)$$

$$C = \gamma + \delta \ln(Q_0) \quad (1-12)$$

式中： P 是时段毛雨量； P' 是净雨量； C 是径流系数； b 是迟滞时间； a 是演算系数； Q_0 为前期流量。径流系数由前期流量决定，整个公式有三个优选参数 (a , δ , γ)，采用差分法计算。这个系统的优点是起始条件只有一个初始流量 Q_0 ，故便于预报使用。

三、英国贝德福德乌斯系统

这个系统主要是河道洪水计算，采用如下分段连续演算法

$$\begin{aligned}d(RQ)/dt &= I - Q \\ R &= L/(uN) \\ u &= aQ^b\end{aligned}\quad (1-13)$$

式中： L 为河长； N 为河段数； u 是平均流速； a 、 b 是优选参数。这种方法类似于非线性水库调蓄。

四、荷兰莱茵河系统

这个系统完全采用经验的多因素线性回归，降水期间，采用如下方程计算下游水位

$$\begin{aligned}H_t &= a_0 + a_1 H_{t-1} + a_2 H_{t-2} + \cdots + a_s H_{t-s} \\ &\quad + b_1 h_{t-1} + b_2 h_{t-2} + \cdots + b_s h_{t-s} \\ &\quad + c_1 P_{t-1} + c_2 P_{t-2} + \cdots + c_s P_{t-s}\end{aligned}\quad (1-14)$$

式中： H 是出口断面水位； h 是入流站水位； P 是区间降雨； a 、 b 、 c 是参数。在算得水位后，由 $Q-H$ 关系转换为流量。

在退水期用如下退水方程计算

$$Q(t + \Delta t) = Q(t)e^{-\Delta t/T} + \tau + \frac{1}{P}Q_s(t)(1 - e^{-\Delta t/T}) \quad (1-15)$$

式中： P 、 T 是参数， Q_s 是直接径流。

五、美国 Santa Ynez 和苏格兰奥捷系统

这两个系统都采用改进斯坦福模型作子流域过程模拟，用动力波差分法作河道演算，并针对土壤侵蚀问题，另外加上一个产沙模块，在有水库控制的支流，采用固定库容的如下泄水方程模拟

$$q_t = a W^{3/2} \quad (1-16)$$

以上是国外的几个实时预报系统。从而可见这类模拟方法本身很简单，重点在信息传递处理及数据库结构设计方面。

第二节 降雨径流模型

实用的流域水文模型可划分为一定物理成因机制的概念性

(或动力学)模型、没有明确成因概念的输入输出模型以及实时校正模型,其他一些经验相关方法不属于系统模型范畴,不在此讨论。

一、产流模型类型

在概念性模型中,降水转化为径流量(净雨)的环节属于产流计算单元,它是降雨 P_i 达到下垫面后,扣除蒸发 E_i 和土壤吸着水 ΔW 后的剩余部分。但在降雨期间,这个过程主要表现为扣除土壤下渗 F_i 和地面滞蓄水量 S ,后者逐渐转化为蒸发。因而如何确定流域面上的入渗就成为计算上的关键,现有的几种算法都是考虑如何建立土壤蓄水下渗的计算格式。具有代表性的所谓超渗型(陕北模型、斯坦福模型)、蓄满型(新安江模型)、蓄泄型(萨克模型)和 API 型,而后者严格说来只算是有一些物理概念的经验相关方法,如同 $P-P_a-R$ 相关法一样。

产流是发生在土壤上层的物理现象,降水通过土壤吸收和滞蓄,一部分消耗于蒸发,剩余部分成为水平运动水流,支配产流的基本规律是土壤中的水分扩散方程。

$$\frac{\partial \theta}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial X} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial X} \right] - \frac{\partial K}{\partial X} \quad (1-17)$$

和以下供水条件、下边界条件与初始条件

$$\theta(0, t) = \theta_i \quad (1-18)$$

$$\frac{\partial}{\partial X} \theta(L, t) = 0 \quad (1-19)$$

$$\theta(x, 0) = \theta_x \quad (1-20)$$

条件式(1-19)是深 L 处为不透水层,式(1-20)给出初始土壤水分布,这里 K 、 D 是土壤水重力传导系数和扩散系数,它们都是 θ 的函数,因而这是一个非线性水分扩散过程,这也决定了产流具有非线性特点。式(1-17)~式(1-20)在具体的自然和边界条件下,可以得到不同性质的解答。

若影响土层 L 很大,则控制条件式(1-19)不起作用,主要由动力方程式(1-17)决定下渗规律,在充分供水条件下的