

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

陈绳甲 李纪生

华中理工大学出版社



现代

水文预报

DAI

SHUI

WEN

YU

BAO

现代水文预报

陈绳甲 李纪生

华中理工大学出版社

现代水文预报
陈绳甲 李纪生
责任编辑 李德

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：8.876 字数：148 000

1991年8月第1版 1991年6月第1次印刷

印数：1—1 000

ISBN 7-5609-0548-X/TV·2

定价：1.80元

内 容 提 要

现代水文预报是最近20~30年发展起来的新学科，它是现代水文学的重要组成部分，包括洪水预报、地下水监测、降雨径流描述、海岸风暴潮和冰情预报等。本书收集了该学科的最新科研成果，反映了该学科的国际最新水平。

本书的读者对象为水文、水资源专业的学生、教师及工程技术人员。

代 序

《现代水文预报》行将问世，这是一部供从事水文预报和水文分析计算的水文工作者学习参考的专著。

我国的防洪实践证明，工程措施与非工程措施的结合应用是建立和完善江河防洪系统的有效措施。非工程措施通常包括：加强防洪设施管理，保持和保证防洪设施的能力；在工程设施中充分考虑适应洪水短暂淹没的措施尽可能减少洪灾损失；健全通讯系统和预警系统；改进和发展洪水预报技术，提高防洪调度水平等。其中，改进洪水预报方法、提高预报精度、增长预报预见期是非工程措施中最行之有效、最节省的办法。

如同其他现代科学技术一样，水文预报技术的现代进展紧密伴随着新技术，如核技术、微电子技术、空间科学技术等，伴随着新理论，如信息论、系统论、控制论等的应用。因此，现代水文预报涉及到信息收集和传输系统、水文预报模型、模型参数率定、模型检验、实时预报和校正技术等，内容十分丰富。

陈绳甲和李纪生同志从事水文预报和水文教学科研工作几十年，他们在信息采集系统和分析技术，非线性汇流计算模型，实时洪水预报，地貌气候单位线，卡尔曼滤波器的应用，非线性水文系统的分析预报，水文系统的模糊数学预报，风暴潮预报，冰情预报等方面有系统完整的研究。《现代水文预报》一书是把他们历年的研究汇集而成的。我相信这本书的出版定会对我国水文预报技术的发展有莫大的助力。

我浏览全书并代作序言。可惜陈绳甲同志不幸罹疾早逝，

我对此表示深深的悼念。

河海大学校长、教授

梁 瑞 驹

一九九〇年八月于南京

目 录

第一章 洪水预报警报系统	(1)
§ 1-1 概述	(1)
§ 1-2 洪水预报与防洪警报的分类与标准	(2)
§ 1-3 洪水预报警报信息传递系统的布局	(3)
§ 1-4 洪水预报警报系统的作业	(4)
§ 1-5 地下水警报网系统的建立	(6)
第二章 现代采集水文信息监测系统与分析技术	(8)
§ 2-1 监测系统的组成与工作原理	(8)
§ 2-2 监测系统对信息传递与环境状况的要求	(11)
§ 2-3 监测系统对可靠性的估计与标准以及提 高洪水预报能力的措施	(14)
§ 2-4 雷达监测与卫星遥测估算降水技术	(18)
§ 2-5 电磁法测流与核测流技术	(27)
第三章 洪水演进预报模型	(31)
§ 3-1 演进模型简述	(31)
§ 3-2 演算法经验性模型	(32)
§ 3-3 演算法理论模型	(35)
第四章 不稳定流理论在预报中应用及溃坝预测	(40)
§ 4-1 不稳定流理论基础——圣维南方程组的 推导	(41)
§ 4-2 圣维南方程组的数学与物理意义	(43)
§ 4-3 圣维南方程组的目前解法	(44)

§ 4-4	圣维南方程组在水文预报中的应用·····	(46)
§ 4-5	溃坝特征与溃坝预测模型·····	(50)
第五章	平稳时间序列预报 ·····	(60)
§ 5-1	平稳时间序列·····	(60)
§ 5-2	各阶自相关系数·····	(61)
§ 5-3	建立预报方程·····	(63)
§ 5-4	预报应用算例与讨论·····	(65)
第六章	实时供水预报 ·····	(68)
§ 6-1	预报方程的研制·····	(68)
§ 6-2	预报方程的标准差·····	(69)
§ 6-3	线性内插方程·····	(71)
§ 6-4	实时供水预报值的信度区间·····	(72)
§ 6-5	实时供水预报计算实例·····	(73)
第七章	随机地貌气候单位线预报模型 ·····	(76)
§ 7-1	随机地貌气候单位线模型的理论基础·····	(79)
§ 7-2	随机地貌气候单位线模型中应用的地貌律·····	(83)
§ 7-3	随机地貌气候单位线理论模型·····	(89)
§ 7-4	随机地貌气候单位线实用模型·····	(91)
§ 7-5	随机地貌气候单位线模型计算与流域出流洪水预报实例·····	(99)
§ 7-6	天然流域区间地貌单位线洪水预报模型·····	(103)
§ 7-7	概念性变动蓄水的地貌单位线预报模型·····	(116)
第八章	卡尔曼滤波在水文预报中应用 ·····	(128)
§ 8-1	线性系统卡尔曼预报滤波器的分析·····	(128)

§ 8-2	非线性系统的卡尔曼预报滤波器.....	(132)
§ 8-3	非线性系统流域出流洪水模型的滤波预 报.....	(133)
§ 8-4	非线性系统滤波预报实例.....	(137)
第九章	降雨径流过程中非线性水文系统的分析预报	(143)
§ 9-1	预报模型中输入与输出的内在联系及非 线性系统的特性.....	(143)
§ 9-2	非线性水文系统预报模型中的假定与 Meixner多项式及其性质.....	(147)
§ 9-3	降雨径流过程非线性水文系统预报模型 用于流域输入输出的反应.....	(149)
§ 9-4	降雨径流过程中非线性水文系统新的瞬 时变动单位线预报模型.....	(151)
§ 9-5	自回归过滤分割法的非线性洪水预报.....	(157)
第十章	水文系统模糊数学预报	(164)
§ 10-1	概述.....	(164)
§ 10-2	模糊关系与模糊运算.....	(164)
§ 10-3	洪水预报模糊数学模型.....	(166)
§ 10-4	洪水预报模糊数学模型的应用实例.....	(172)
第十一章	水箱模型在水文预报中的应用	(179)
§ 11-1	模型的概念.....	(179)
§ 11-2	模型的径流量、下渗量的计算.....	(180)
§ 11-3	模型的出流机制.....	(181)
§ 11-4	模型参数的确定.....	(183)
§ 11-5	具有土壤水分结构的水箱模型.....	(188)
第十二章	近岸风暴潮数值预报	(193)

§ 12-1	风暴潮的概念·····	(193)
§ 12-2	风暴潮数值预报模型·····	(194)
第十三章	冰情预报 ·····	(201)
§ 13-1	结冰开始时刻的预报模型·····	(201)
§ 13-2	水内冰预报·····	(203)
§ 13-3	产冰量的估算·····	(204)
§ 13-4	冰盖厚度的预报模型·····	(205)

第一章 洪水预报警报系统

§ 1-1 概述

现代洪水预报警报系统是一整套自动化系统。该系统用以保证人民生命财产安全和满足国民经济各部门现代化建设的需要。目前世界上科学技术发达的国家，均在全国主要河流上建立了一整套高度自动化的预报警报系统。这些主要河流指定测站准确及时地发布水位和流量预报，以满足灌溉、发电、防洪、航运、交通运输、给排水以及卫生等需要，其中对于防洪调度方面尤为重要。

为了在全国范围内或某些重要特区区域内建立洪水预报警报系统，要求在全国各主要河流流域上或特区重点河流流域上，建立起足够数量的雨量和水位遥测站。在遥测站里要求具备有高度自动化的设备，它包括雷达、卫星、火箭、自动化装置的微波系统的卡车、航空机、扫描无线电仪、传真设备、电视等。与此同时，要求对所选择的各主要河流的现有气候、水文、水资源、地质、土壤、森林、植被、湖泊与水库塘堰等详细状况了解清楚，具体方法可通过调查、施测或考查历史文献来获得。譬如，美国对佛罗里达州的河流就了解得一清二楚；日本对其国内共十七条主要河流的特性都了解得清清楚楚。

在具备了以上条件的基础上，便可以着手进行预报警报工作，它可按照各测站的限制水位和警戒水位公开发布洪水预报、警报，展开必要的日常工作。

§ 1-2 洪水预报与防洪警报的分类与标准

洪水预报与警报的分类与标准依据各国的习惯与特点可以采用不同的办法。关于洪水预报的分类,目前国际上一般将其分为三类,即洪水咨询、洪水警报和洪水情报。倘若依照我国以往习惯来划分,则可分为预备警报与订正警报。与分类相对应的标准,国际上目前也分为三级标准。凡是预报测站的水位,根据预报分析的结果,有可能超过预先规定的警戒水位时,要发布洪水咨询。当预报测站实测水位已经达到并超过了规定的警戒水位时,而且依据预报推测还有可能要超过设计高水位时,甚至有可能发生严重的灾害,譬如大坝的溃决,坝顶的崩潰等,这时必须发布洪水警报。如果预报的情势临时有特殊的变化,事先没有预报出来,而根据最后分析,确认有预报订正的必要,也就是说对原来已发布的洪水咨询或洪水警报需要作修正预报时,则应发布洪水情报。

关于防洪警报的问题,服务面更为广泛,影响作用也更为重要。就警报内容来说,可包括洪水警报、暴潮警报、泥石流警报等。就分类而言,目前国际上分为:预备警报;准备警报;动员警报;信号显示;解除警报五类。

关于防洪警报标准,可分为五级。依据气象天气预报警报和河流具体洪水位,以预先规定的洪水位为依据,将再一次发生涨洪时,应发布防洪预备警报。这时防洪管理部门应该做好派遣防洪人员的准备。对洪情进行分析,如果河流未来洪水位有可能超出警戒水位,就应该发布防洪准备警报。这时实际上是通知防洪管理部门应立即派出防洪人员奔向各防洪要害位置,投入防洪战斗。如果实际河流水位已超出了实际警戒水位,依据

洪水警报分析，还有可能出现更恶劣情况，即有可能出现破坏性洪水时，就应发布防洪动员警报。这时防洪管理部门应该向防洪人员发出抗洪动员令。如果河流实际洪水已超过警戒水位，防洪警报已发布了三道，而且洪水可能造成溃坝、漫堤、裂缝、漏水、河岸崩塌等事故时，就应立即发布信号显示。这时防洪管理部门必须再次向防洪人员作进一步抢险的动员令。当河流水位在警戒水位上时，依据预报，洪水将要消退或洪水位已经退到警戒水位以下时，这时就应该发布防洪解除警报。防洪管理部门可以撤下防洪人员，表示这场防洪斗争已宣告结束。

可见，正确制定防洪的类别和标准等级，对执行实际防洪活动具有重要意义。

§ 1-3 洪水预报警报信息传递系统的布局

关于信息传递，国际上常用的布局是以最合理、最迅速、最方便的方式进行传递的。下面拟介绍两种布局的方式。

第一种方式是将流量站、雨量站、天气预告系统以及洪水预报警报的气象雷达、气象卫星等的数据迅速传递到洪水预报警报中心，通过自动收集、制定、并由计算机操作作出预报警报成果，进行自动发布预报警报。发布单位包括国家部门和民用部门，前者包括兵役部、广播系统、政策系统、洪水委员会和其它地方代办；后者包括民用办公室、机场、航道部门、铁道部门、排灌水部门以及水管区地方部门等。

第二种方式是首先通过遥测与传真收集资料。这方面包括：雨量与水位遥测资料；气象卫星与雷达测雨资料；水文观测资料；天气图分析的资料等。其次是人工监测与判别。它包括：计算机运行；选择终端显示；河流情报图象显示；对上面收集

到的卫星、雷达和天气图分析作监视与判别。第三是进行计算机的计算与运算。其中包括降水预报计算，洪水选择，洪水预报与闸坝调度计算。第四是准备执行计划和提出建议报告以及下指令。它包括：准备洪水调度计划和建议报告；情报显示和调度闸坝的指令。第五是发布洪水预报与警报，及时发布到全国各个单位，从而能及时发挥其应有的效益。

关于预报方案计算时间，一般要求绝大多数河流在输入资料时间起至作出洪水预报警报为止，总共约20分钟内完成。预报发布常常采用电话、电报、电传、传真、电视和无线电传递等手段，在最短时间内完成。

§ 1-4 洪水预报警报系统的作业

在进入洪水预警系统作业前，应对各种必需的资料进行处理，其中包括：资料可靠性检查；点面换算，格式变换等。这些资料由收集到传递和预处理等，大约耗时2小时，作业预报与发布预报约耗时1小时。

关于作业预报模型，目前常用的有如下几个模型。首先是降雨径流模型，较为常用的有前期降雨指标模型（又称为API模型）、萨克拉门托模型（又称Sacramento模型）、河川径流模拟和水库调节模型即萨尔模型（又称为SSARR模型）、土壤水计算模型、不列颠道路研究实验模型、水箱模型。就美国13个河流预报中心来看，有6个采用API模型、4个采用萨克拉门托模型、1个采用萨尔模型。其次是河道演进模型，常用的有滞后演算法模型、Muskingum模型、Cunge模型、分层系数法模型Tatum模型和动力波模型等。第三是水库演算模型，目前最新的是美国天气局水研室提出的水库演算综合模型，它可

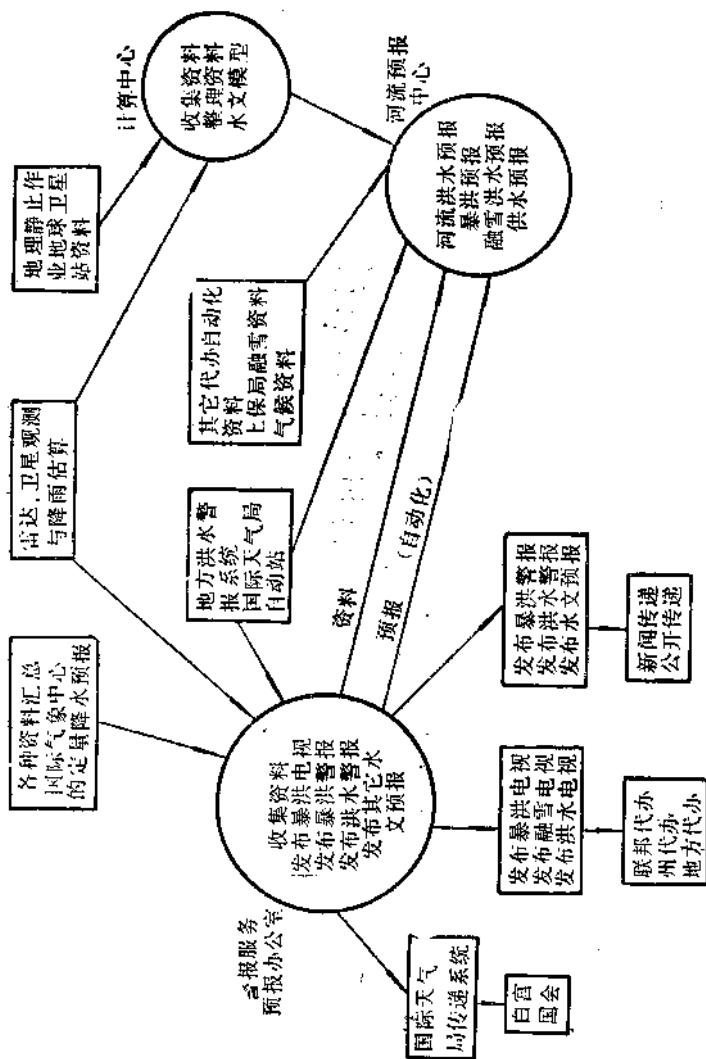


图1-1 预报、警报作业系统示意图

以提供组合出13种不同调度方式的方案，供水库控制与运用。第四是溃坝模型，目前溃坝计算方法很多，并已制成溃坝模型程序包，使用时十分方便。第五是ESP模型，该模型建立在现行水文、水力学概念性模型基础上，制作河川或水库的中期预告。它假定过去已发生的水情对未来可能出现的情势具有代表性，故可用以模拟径流的行迹，即预告最大、最小流量，径流总量和库水位等。ESP预告是一种概率预告，而不是具体的数值。第六是北方融雪模型，该模型属于概念性模型。融雪、积雪的过程均可采用数学公式表示，以雪深换成相应的水当量同气温一并输入，便可预告出融雪径流量。

除建立预告模型外，还发展了各种实时校正方法，即对降雨径流模型成果进行实时校正。目前常采用方法有：卡尔曼滤波器法；实测校正法；误差时间系列分析法；变差实时校正法等。通过实时校正方法可大大提高预告精度。

预警系统作业还包括一套完整的模型率定程序。一般率定方法常采用人工率定与自动优选率定相结合方法。

关于预见期，目前日本常拟定1天以内，美国采用1~7天之内。当拟定预告方案最少限制时间后，需将预报误差予以限制，一般常常限制在10%~20%范围内，视各个国家不同技术水平而异。

关于洪水预报警报的发布作业，可参阅§1-3的内容，这里给出美国最近预报警报作业系统示意图（见图1-1所示）。

§ 1-5 地下水警报网系统的建立

前面各节已描述了地面雨洪警报网的建立问题，由于科学迅速发展，人们又发现了地下巨大水库的威力，它对地面雨洪

存在着不可低估的调蓄作用、补给作用和一定比例的组合作用等。因此，建立地下水警报网系统，是非常必要的。

世界上第一个提出这种想法的是美国，在美国地质局领导下，于1950年就开始在佛罗里达州广泛收集地下水位资料。通过长期摸索和分析地下水动态，终于在1984年建立了该州的地下水警报网系统，共35个警报站，分为重要与次要站。

通过地下水警报网，可以收集地下含水层的各方面信息，如地下水位、地下土壤含水量、地下水量、地下水水质与地下水化学性质等。

在建站时，不是单纯凭经验，而是要采用收集大量地下水资料后，进行大面积的方差分析，它包括进行临时性时间分析和大范围的空间范围分析。将两者分析的成果联合起来，从而确定地下水警报站的选择。

在地下水警报站里，同时要设立地下水位遥测站，地下水水量遥测站，各土壤含水层含水量遥测站等。以便及时收集到地下水动态，及时作出地下水预报警报。与此同时，还要设立地下水水质监测网，在美国已建立了518个地下水水质监测网。它们都能及时地、定点定期地对频率、pH值、总硬度、大肠菌、水温、溶解氧、氯化物等等因素进行监测。做到了定期与不定期监测，就能长期自动监测出水温、pH值、电导率、DO、COD等因素，同时对污染源进行监测。

建立遥测实验室，有一套专门的仪器设备与装置，分别安装在照片室、分析整理室、制图室、计算室、复制室、野外调查队和文件档案室内。具体仪器此处不再一一赘述。