



淮河复合河道洪水概率 预报方法与应用

王凯 梁忠民 胡友兵 著

非
外
借



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

淮河复合河道洪水概率 预报方法与应用

王凯 梁忠民 胡友兵 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书根据淮河流域的实际情况,采用理论研究与应用验证相结合的技术路线,在淮河中游复合河道地区开展了确定性洪水预报模型和基于预报误差分析的洪水概率预报方法研究。本书主要内容包括:淮河复合河道洪水概率预报框架、淮河复合河道确定性洪水预报模型、洪水概率预报模型研究、降低洪水预报不确定性方法研究、实时洪水概率预报系统集成研究,并根据这些研究成果和结论,对复合河道洪水概率预报方法进行了展望。

本书介绍的理论方法具有广泛的适用性,可供从事水文水资源、水利工程、农业工程、环境科学及其他相关专业教学、研究和管理工作的读者借鉴和参考。

图书在版编目(CIP)数据

淮河复合河道洪水概率预报方法与应用 / 王凯, 梁忠民, 胡友兵著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017.4
ISBN 978-7-5170-5349-1

I. ①淮… II. ①王… ②梁… ③胡… III. ①淮河—洪水预报—概率预报 IV. ①P338

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第073382号

书 名	淮河复合河道洪水概率预报方法与应用 HUAI HE FUHE HEDAO HONGSHUI GAILÜ YUBAO
作 者	王凯 梁忠民 胡友兵 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京市密东印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.5印张 226千字
版 次	2017年4月第1版 2017年4月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	39.00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

淮河地处我国南北气候过渡带,发源于河南省桐柏山,流经河南、安徽,至江苏扬州的三江营入长江,干流全长约 1000km,总落差 200m,平均比降 0.2‰。其中,从洪河口至洪泽湖出口三河闸为中游地区,该地区属于平原地形,河长 490km,平均比降只有 0.03‰,多个行蓄洪区沿淮河干流上下左右错落分布,多条支流、人工河道从上而下依次修建,形成了河道、滩地、堤防、行蓄洪区紧密交错的复杂地形和淮河中游的复合型河道。因此,该河段的洪水预报是淮河防洪最为重要的参考信息。

通过几十年的探索研究,淮河中游地区已经形成了一套较为成熟的洪水预报技术体系。尽管如此,由于复杂的河系条件、频繁的工程运用调度及高强度的人类活动影响,该地区洪水预报的不确定性问题突出,给实际防汛工作带来挑战。洪水预报作为行蓄洪区等水利工程调度决策的重要依据,开展预报不确定性量化研究,实现洪水概率预报,提供更为丰富的实时洪水预报信息,可以为淮河中游复合河道的防洪调度,特别是行蓄洪区的调度运用决策提供更科学的技术支持,对实现淮河流域洪水风险管理、降低洪水灾害对当地社会经济及生态环境的影响,亦具有重要的实际意义。

为此,在水利部公益性行业科研专项经费项目资助下,在淮河中游河段地区(河段长约 140km,控制面积约 17200km^2)的重点断面(王家坝、润河集、鲁台子)开展了洪水概率预报方法及应用研究。

根据研究区域的实际情况,采用理论研究与应用验证相结合的技术路线,在淮河中游重点断面开展了基于预报误差分析的洪水概率预报方法研究,取得了以下主要研究成果及创新点。

(1) 在淮河中游河段地区的重点断面开展了洪水预报研究,分别采用经验相关模型、新安江模型对 1990—2013 年主要洪水进行了洪水模拟和预报。此外,考虑到淮河中游地区行蓄洪区对河道洪水的影响,结合 MIKE11 模型,对润河集断面开展水文、水力学耦合的洪水模拟和预报,为洪水概率预报方法研究提供数据支持。

(2) 提出了基于预报误差分析的洪水概率预报途径,从确定性预报结果

入手，定量评估预报结果的不确定性，并在此基础上实现洪水概率预报。在淮河中游河段地区的重点断面进行实例应用：以单个确定性预报（传统预报方案或新安江模型）为基础，结合主成分分析技术和水文不确定性处理器，开展洪水概率预报研究。以多个确定性预报（传统预报方案和新安江模型）为条件，采用贝叶斯模型平均算法，综合多模型预报结果，同时开展了洪水概率预报方法研究。

（3）提出了基于要素耦合的洪水概率预报途径，同时考虑方法研究的可行性，选取淮河上游黄泥庄流域作为典型流域，开展洪水过程不确定性归因、要素不确定性量化及耦合方法研究。识别降雨-径流过程中各环节的不确定性要素，分别量化了面雨量计算不确定性和模型参数不确定性，探求了洪水预报不确定性的主要来源。并在此基础上，采用随机抽样方法对两种不确定性进行耦合，最终实现洪水概率预报。

（4）开展了降低洪水预报不确定性方法研究，分别采用模型参数优化、预报误差校正的方式降低预报的不确定性，并结合洪水概率预报，以预报区间的离散度为度量指标，对不确定性的降低程度进行了估计。

（5）开展了实时洪水概率预报系统集成研制。基于荷兰 FEWS 系统，创建了流域级的实时洪水概率预报系统 FEWS-Huaihe。该系统具有集空间数据、历史水文和实时水雨情信息于一体的综合数据库系统，实现了气象数据与水文-水动力学模型、确定性预报与不确定性分析技术的无缝耦合，并提供标准化的洪水概率预报流程和应用范例。

本书研究成果中创建的 FEWS-Huaihe 系统，已投入淮河水利委员会水文局（信息中心）的洪水作业预报业务，在淮河 2014 年中小洪水、2015 年第 1 号洪水（超警戒洪水）的实际防汛工作中发挥了重要作用。相关研究成果已被列入河海大学的研究生教学内容，并取得了很好的示范效果。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 1 月

前言

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 洪水概率预报研究进展	1
1.3 本书主要内容	4
2 淮河复合河道洪水概率预报框架	5
2.1 淮河复合河道概化	5
2.2 洪水概率预报研究思路	6
3 淮河复合河道确定性洪水预报模型	8
3.1 概述	8
3.2 经验相关模型	8
3.3 新安江模型	21
3.4 水力学模型	28
4 洪水概率预报模型研究	40
4.1 概述	40
4.2 基于要素耦合的洪水概率预报	41
4.3 基于预报误差分析的洪水概率预报	60
4.4 概率预报模型对比研究	100
5 降低洪水预报不确定性方法研究	101
5.1 概述	101
5.2 模型参数优化研究	101
5.3 实时校正技术研究	110
5.4 降低不确定性效果分析	115
6 实时洪水概率预报系统集成研究	121
6.1 概述	121
6.2 系统集成总体构架	122
6.3 开放式洪水预报平台 FEWS	124
6.4 淮河洪水概率预报集成平台 FEWS-Huaihe	126
6.5 标准化洪水概率预报流程和应用范例	132

7 结论与展望	140
7.1 主要研究成果与结论	140
7.2 展望	141
参考文献	142

1 绪 论

1.1 研究背景

洪水预报是非工程防洪减灾措施的重要组成部分,也是水文科学研究的热点问题^[1]。洪水预报的理论与方法,经历了由经验模型到具有系统理论概念的“黑箱子”水文模型,再到融合物理概念和经验概化的概念性水文模型,以及具有物理基础的分布式水文模型的发展过程^[2,3]。但一直以来,洪水预报提供的都是一种确定性的定值预报。由于自然水文过程的复杂性和人类认识水平的局限性,实时洪水的预报中不可避免地存在输入、模型结构和模型参数的不确定性。这些不确定性的存在,必将导致洪水预报结果也具有不确定性^[4],但在当前的实际防洪工作中,由于采用的是定值预报结果,因而无法对调度方案及防洪决策的可能风险做出客观评估。

所以,近些年来,实时洪水概率预报的概念得到重视^[5]。通过将确定性水文模型与不确定性统计分析相耦合^[6],获得未来洪水过程的概率分布,实现概率预报。不仅能提供与常规洪水预报方法相类同的定值预报结果(如采用分布的均值、中值、众数或其他分位数),而且可以提供该定值预报发生可能性大小的估计,以此进行防洪调度,可以对决策方案的可靠性及风险大小做出定量评价^[7]。因此,围绕如何认识和描述实时洪水预报过程中的不确定性,建立概率预报模型与方法,提高水文模型的预报能力和丰富预报信息内容,在国际水文科学界已逐渐形成研究热点,成为当前最前沿的科研课题之一^[8-10]。目前,我国不管是研究层面还是应用层面,都还没有形成较成熟的理论与技术方法^[11-14]。

1.2 洪水概率预报研究进展

洪水预报是人类在与洪水灾害长期斗争的客观需求推动下发展起来的。作为防汛减灾的“耳目”和“参谋”,准确及时的洪水预报为防汛决策提供了重要的科学依据,可以获得减免洪水灾害损失的巨大经济和社会效益,日益受到普遍的重视与关注。

1.2.1 洪水预报研究进展

洪水预报理论的核心内容包括产流理论与汇流理论,具有漫长的历史。1871年,在牛顿力学的基础上,提出了圣维南(St. Venin)方程组,为研究河道和坡面洪水运动,以及流域汇流奠定了基础。1921年Ross提出了面积-时间曲线。洪水预报技术从20世纪30年代起发展起来。Horton(1931)发表了论文《在水文循环中下渗的作用》,提出下渗理论(1932);在他的著名论文《地表径流现象》(1935)中提出了均质包气带的产流理



论。在文献《用单位线法由降雨推求径流》中,提出了流域汇流单位线法。Snyder (1938)在文献《综合单位线》中,提出了对短缺资料地区使用综合单位线的预报方法。1932年 Sherman 提出了单位线。1938年麦卡锡 (MaCarthy) 提出了 Muskingum 洪水演算方法,同年,施奈德 (W. M. Snyder) 提出了综合单位线的概念。1935—1938年,McCarthy 总结了以“马斯京根法”著称的洪水演算预报方法。随后克拉克 (C. O. Clark) 于1945年提出了瞬时单位线 (IUH) 的概念,其后纳什 (J. E. Nash)、杜格 (J. C. I. Dooge)、周文德 (T. V. Chow)、加里宁等进一步发展了 IUH。

到了20世纪50年代,高速、大容量计算机的发展和应用,使得人们对水文规律的综合性研究成为可能,发展了一系列的流域水文模型。流域水文模型是指对流域上发生的全水文过程进行模拟计算所建成的数学模型。它将流域总体看成是一个系统,输入为降雨等,输出为出流流量等,流域内的水文过程则是系统的状态。美国的流域水文模型研究起步较早,最早最有名的流域水文模型是斯坦福模型 (SWM)。Crawford 和 Linsley 从1959年开始研发,到1966年完成第Ⅳ号模型^[15]。日本国立防灾中心的菅原正己 (Sugawara) 博士在1961年提出了水箱模型,又称 Tank 模型^[16]。美国国家气象局 (NWS) Burnash 等人于1973年在 SWM 的基础上研制了 Sacramento (SAC) 模型^[17]。1979年 Beven 和 Kirkby 提出的半分布式流域水文模型 TOPMODEL 利用地形指数的空间变化来模拟径流产生的变动产流面积^[18]。而1980年由英国、丹麦和法国水文学家共同研制的 SHE 模型是最具有代表性的分布式流域水文模型^[19,20]。

我国流域水文模型的研制始于20世纪70年代,由河海大学赵人俊教授领导研究完成的新安江模型 (1973) 是最具代表性的水文模型之一^[21]。当前,我国水文作业预报中的主要模型有:新安江模型、双超产流模型、河北雨洪模型、姜湾径流模型、双衰减曲线模型等。

1.2.2 洪水概率预报研究进展

近些年来,洪水预报的不确定性问题得到重视,洪水概率预报方法研究不断发展起来,国内外关于预报不确定性的研究方法包括贝叶斯统计^[22-25]、一阶近似、信息熵、模糊集、灰色系统等,但用于实时洪水概率预报的方法大体上可分为两类:一是不确定性要素的耦合途径;二是总误差分析途径。

不确定性要素的耦合途径实质是分析预报过程中各环节的主要不确定性因子,估计其概率分布,再将这些不确定性耦合到洪水预报模型中,从而实现概率预报。Beven 和 Binley (1992) 通过对“异参同效 (Equifinality)”现象的研究,提出了 GLUE 方法^[26,27],通过采用基于参数空间随机抽样的方法,评价参数的不确定性对预报结果的影响,同时也可以实现概率预报功能。Kuczera 和 Parent (1998) 采用 MCMC 抽样技术从后验分布中抽取参数样本集,并得到模型的“集合”预测,进而通过置信限分析评价模型参数的不确定性对预报结果的影响^[28]。Kavetski 和 Kuczera 等 (2006) 提出了贝叶斯总误差分析方法^[29-31],这里的总误差概念是指来自输入 (降雨、蒸发)、模型 (以模型参数为主) 和流域反应 (流量、水位观测) 这些要素的不确定性,通过 MCMC 抽样技术与预报模型的结合,即可实现洪水的概率预报^[32]。在贝叶斯总误差分析方法的基础上,Ajami 等 (2007) 改用折算系数体现降雨输入的不确定性,并集合贝叶斯模型平均方法



(Bayesian Model Average, BMA)^[33,34]考虑模型结构的不确定性,提出贝叶斯综合不确定性估计方法(Integrated Bayesian Uncertainty Estimator, IBUNE)^[35]。

总误差分析途径是从确定性预报结果入手,直接对预报不确定性进行量化分析,推求预报量的分布函数,实现概率预报。其中,Krzysztofowicz (1999)^[36]提出的贝叶斯预报系统(BFS)^[37,38]最具代表性。该系统基于 Bayes 理论框架^[39],将总不确定性分为两大部分,即预见期内流域平均降雨定量预报的不确定性,以及除此以外的所有水文不确定性。BFS 在算法上包含三个组成部分,分别处理降雨预报的不确定性(PUP)^[40]、水文的不确定性(HUP)^[41-43]以及将所有不确定性进行集成的处理器(INT)^[44],最终通过后验密度函数提供洪水概率预报。近年来,很多研究表明,不同流量量级的预报不确定性存在差异,Todini 等(2008)^[45]通过点绘流量预报值与实测值的分位数关系图,发现高流量的线性关系较低流量更显著,点据更集中,为此采用截尾正态联合分布(Truncated Normal Joint Distributions, TNDs)表征不同流量量级时预报值与实测值的关系,并提出了模型条件处理器(Model Conditional Processor, MCP)^[46,47]。Montanari 等(2008)建立了误差分位数与解释变量间的函数关系,进而估计预报的不确定性^[48]。Van Steenbergen 等(2012)针对不同预见期、不同流量量级预报误差统计规律的差异,采用频率学方法,构建了三维误差矩阵(Three-dimensional Error Matrix)^[49],量化预报不确定性。

上述两类方法都是通过定量描述预报过程中的不确定性因素,从而实现洪水的概率预报。其中,第一类方法中的代表性方法如 GLUE 和 BATEA 方法,在算法上是直接显示考虑各种不确定性,即将各种不确定因素作为随机变量,构成系统参数集,通过抽样技术获得“集合”预报集。对“集合”预报集进行统计分析(如均值、方差、置信限等),就可以实现概率预报;这类方法是面向具体预报模型的,不同模型的结构不同、参数也不同,其概率描述也就不同。第二类方法是一种“model-free”的方法,即它不直接处理模型结构和参数的不确定性,代之以处理其综合误差(即输出误差),算法上它不依赖于具体的水文预报模型,可以与任何模型相耦合,最终是以后验分布的形式直接提供模型输出变量的概率预报及其评估。

在我国,对水文预报不确定性及概率预报的研究也逐渐得到重视,形成了一些有价值的成果。熊立华和郭生练(2004)采用 GLUE 方法,讨论了新安江模型参数的“异参同效”性和对模型预报不确定性的影响。梁忠民等(2009)采用 MCMC 研究了 TOPMODEL 模型敏感参数不确定性对预报结果的影响,得到预报值的抽样分布,提供预报值的置信区间估计^[50]。刘艳丽、梁国华和周惠成^[51]针对传统 GLUE 方法只以 N-S 系数为似然判据的局限性,提出了多准则似然判据的 GLUE 方法,在 N-S 系数的基础上,又引入了洪峰及其出现时间误差、洪水总量误差共同组成多准则判据;结果表明,多准则似然判据能更全面地体现模型的不确定性。王善序(2001)系统地介绍并评述了 BFS 方法体系^[52],认为可以有效地用于洪水的概率预报;张洪刚和郭生练(2004)将 BFS 中的水文不确定性处理器(HUP)与新安江模型结合,并将其应用于江西白云山水库的实时洪水预报研究,获得了有价值的结论^[53];钱名开和徐时进等(2004)将 HUP 应用于淮河息县站的短期洪水预报,结果表明,采用流量预报后验分布的均值作为预报结果,其精度总体上高于现行预报方法结果^[54];张宇和梁忠民(2009)也应用 HUP 处理新安江模型的



预报结果,实现洪水概率预报,结果表明,不同量级的洪水其概率预报的偏差系数并不一致^[55]。

综上所述,随着人们对水文预报中不确定性认识的逐渐完善,在实际防洪调度决策工作中,不仅希望及时得到未来洪水的预报值,也希望对该预报值的不确定性大小有个客观的认识,进而对防洪方案的可能风险有所了解,所以考虑不确定性的实时洪水概率预报问题得到重视,在国外已发展了一些有效的方法,国内的研究尚处于起步阶段。目前,采用的一些主要方法,其不足是需要采用抽样技术求解以复杂积分形式表达的概率分布,所以,计算量较大;而且主要因子概率分布的确定,经验性较强,这些都限制了在实际中的应用。因此,进一步研究适用于实时洪水的概率预报方法,是具有理论意义及实用价值的。

1.3 本书主要内容

本书针对淮河中游地区河道形态复杂多样,洪涝灾害频繁的现状,设计开展了淮河中游复合河道地区洪水概率预报框架体系,构建了集确定性洪水预报、洪水概率预报和预报不确定性降低技术于一体的淮河中游复合河道洪水概率预报体系。其中:第2章详细介绍了淮河复合河道洪水概率预报的框架和研究思路;第3~第5章先后介绍了淮河复合河道确定性洪水预报模型、洪水概率预报模型研究、降低洪水预报不确定性方法研究,构成本书的主体研究内容;第6章基于FEWS系统,对淮河中游洪水概率预报体系集成进行了介绍;第7章对全书进行总结,并对研究内容进行展望。

2 淮河复合河道洪水概率预报框架

2.1 淮河复合河道概化

淮河地处我国气候南北过渡带，水文气象条件复杂、洪涝灾害频繁。经过 60 年的治理，流域已基本形成了由水库、闸坝、堤防、行蓄洪区与湖泊等组成的水资源调控工程体系，在防灾减灾中发挥了巨大的作用。由于人类活动影响加剧，使流域下垫面及水文特性发生了很大变化^[56]。特别是中游流域（图 2.1-1），集山区、丘陵、平原于一体，地势南高北低，降水年内分配严重不均，其南部支流主要流经山区，汇流时间短，洪水陡涨陡落，北部支流主要为平原性河道，洪水汇流时间长，洪水过程持续时间长。

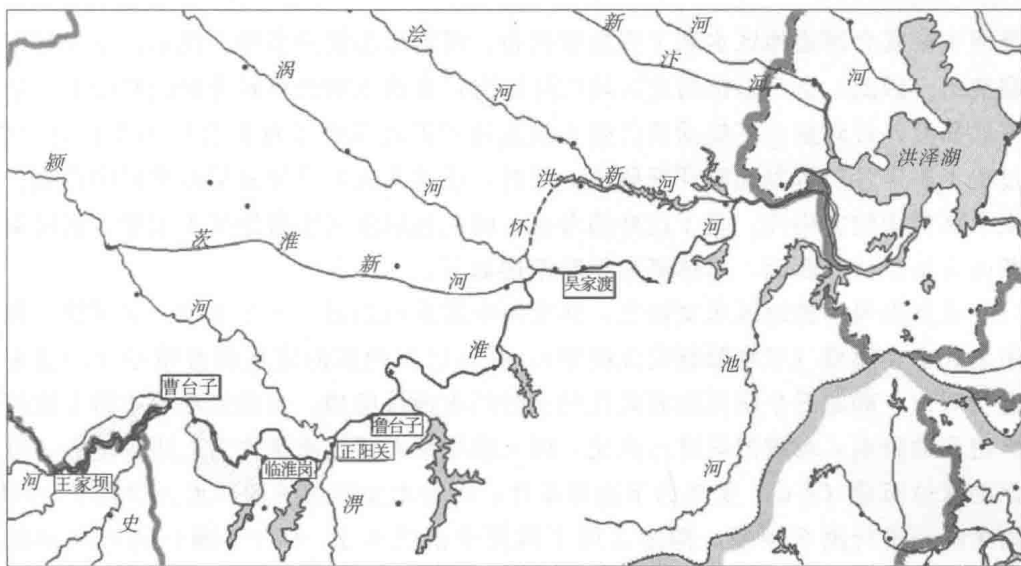


图 2.1-1 淮河中游水系及主要控制断面

淮河中游的王家坝至正阳关河段，是淮河防洪的焦点地区，也是典型的复合河道河段。仅仅 140km 的河段上，北岸地区紧密分布了濠洼蓄洪区，南润段、邱家湖、姜唐湖三处行洪区，以及八里湖洼地，南岸分布了城西湖、城东湖两处大型蓄洪区。其中淮河最大的洪水控制工程临淮岗枢纽也位于该河段上。因此，该河段的洪水预报成果是淮河防洪最为重要的参考信息^[57]。研究区域中王家坝至正阳关河段典型复合河道形态见图 2.1-2。

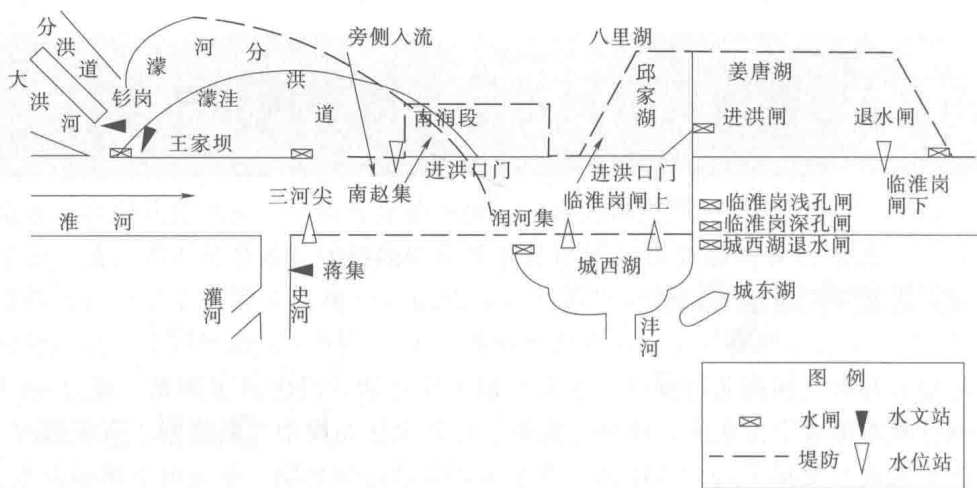


图 2.1-2 研究区域中王家坝至正阳关河段典型复合河道形态

2.2 洪水概率预报研究思路

淮河中游复合河道地区水利工程星罗棋布，河道形态复杂多样，洪水预报成果不确定性问题突出。因此，必须根据研究区域实际情况，在重点断面资料分析的基础上，结合机理和方法研究，针对复杂下垫面条件带来的流域产汇流系统多重耦合作用及其时空效应、洪水过程不确定性归因等问题开展研究。同时，还需要注重研究成果在淮河中游复合河道地区洪水预报中的实用性。基于这样的考虑，研究选取淮河中游地区王家坝、润河集、鲁台子断面为重点研究断面，具体研究思路阐述如下。

(1) 依据淮河中游地区水文特征，在淮河中游重点断面——王家坝、润河集、鲁台子构建集总式水文模型（三水源新安江模型），并与已有的淮河流域预报模型（经验相关模型）进行对比，确定三个研究断面最佳的实时洪水预报模型；考虑到淮河中游干流两岸行蓄洪区密布的特点，对该河段进行概化，以王家坝断面预报流量作为上边界输入，以鲁台子断面的水位流量（ $Z-Q$ ）关系为下边界条件，耦合水文预报模型和水力学模型（MIKE）对润河集断面进行洪水预报，构建适用于淮河中游的水文-水力学耦合的洪水预报模型体系。

(2) 采用两类概率预报途径，对淮河流域开展洪水概率预报模型研究：选取淮河上游黄泥庄流域作为典型流域，采用要素耦合的概率预报途径，分析各不确定性因子对预报结果的敏感度，筛选洪水预报不确定性的主要影响因子并分别量化，进行洪水概率预报；同时，采用误差分析的概率预报途径，在淮河干流主要控制断面王家坝、润河集、鲁台子断面，分别开展基于单个确定性预报、多个确定性预报的洪水概率预报应用研究。通过以上两类途径的研究，最终探求适用于淮河中游地区的概率预报模型，构建淮河复合河道概率预报模型体系。

(3) 开展预报不确定性降低技术研究，分别从模型参数和预报误差入手，开展参数



优化研究。通过参数自动优化算法 SCE-UA 优化模型参数,并进行洪水预报。在此基础上,基于衰减记忆最小二乘算法,对模型计算误差进行校正。将参数优化、误差校正与概率预报模型进行结合,通过预报区间离散度的比较,对降低预报不确定性的方法进行验证。

(4) 将淮河中游王家坝、润河集、鲁台子断面的洪水预报模型与概率预报模型进行耦合,并基于 FEWS 系统集成平台,构建淮河流域中游地区集实时洪水预报、参数优化、误差校正、概率预报于一体的可视化洪水概率预报系统,实现淮河中游复合河道地区实时洪水概率预报,为淮河防洪调度决策提供更丰富的预报信息。

3 淮河复合河道确定性洪水预报模型

3.1 概述

本书以淮河中游王家坝—鲁台子河段为主要研究对象。该河段是典型的复合河道，全长 140km，河段两岸行蓄洪区密布，水利工程众多。因此，本书分别开展了集总式水文模型、河道洪水演算模型的研究工作，形成了王家坝—鲁台子河段集水文模型、水力学模型于一体的自上而下连续运算的确定性预报模型体系^[58,59]，体系框架见图 3.1-1。

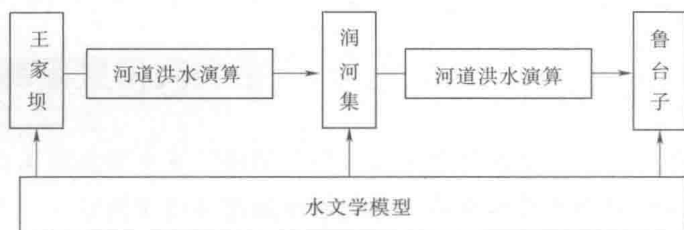


图 3.1-1 淮河复合河道洪水预报模型体系框架图

本书在淮河干流王家坝—润河集河段、润河集—鲁台子河段采用水力学模型 HEC-RAS、SOBEK 和 MIKE 开展河道洪水演算模型研究，以集总式水文模型（经验相关模型和新安江模型）为边界模型。由于水力学模型资料要求较高，研究另外开展了马斯京根法河道洪水演算模型，作为河道洪水演算的备选模型。此外，由于分布式水文模型的资料需求较大，精度要求较高，本书不对其做研究探讨。

3.2 经验相关模型

经验相关模型是根据流域内水文现象的成因与结果，自变量与因变量的实际观测值，采用统计相关方法求得它们之间的定量关系^[60,61]。该方法直观、操作简单，预报精度较高，因此，被广泛应用于各生产部门。由于研究区域不同，经验相关模型的参数也存在较大的差异，本书研究时，选用《淮河流域淮河水系实用水文预报方案》中的经验相关模型，不对模型参数进行重新率定，只对模型精度进行验证^[57]。

3.2.1 王家坝

3.2.1.1 断面简介

王家坝站系淮河上游总控制站，集水面积 30630km²。上游干流河长 360km，河道比降



0.5‰，年平均降水量 800~1200mm，且降水年际变化大，时空分布不均匀。年降水量的 60%集中在 5—8 月，以 6 月、7 月两月暴雨次数较多。产生暴雨的主要天气系统是西南低涡、切变线、低压槽和台风等。淮河干流上游及淮南山区一般是王家坝洪水的主要来源区。

本书主要针对息县、潢川、班台—王家坝区间（面积为 7110km²）开展研究。王家坝断面控制区域见图 3.2-1，研究区域示意图见图 3.2-2。

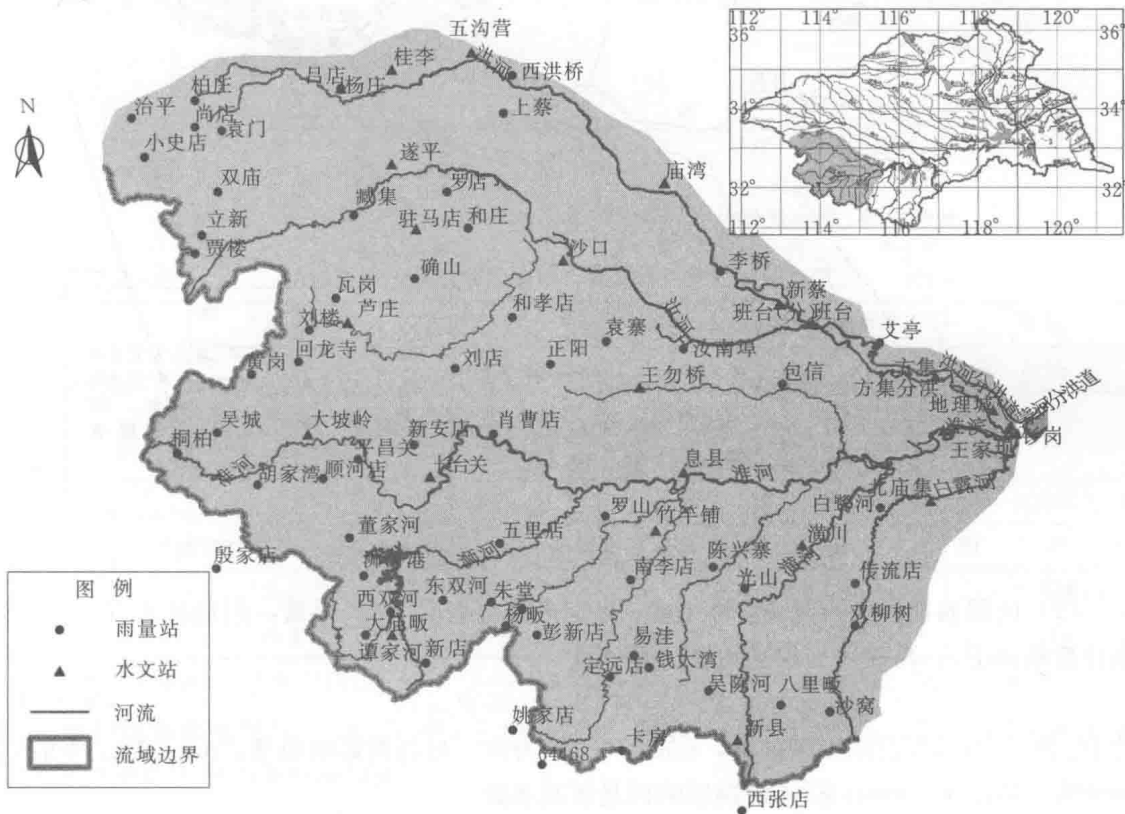


图 3.2-1 王家坝断面控制区域图

3.2.1.2 经验相关模型

王家坝断面的洪水主要由两部分组成，即息县、潢川、班台（息潢班）—王家坝区间洪水和上断面息县、潢川和班台的河道来水，其中，息潢班—王家坝区间产流采用降雨径流相关图法，汇流采用单位线法；息县、潢川和班台洪水河道汇流采用马斯京根法，详情如下（ $\Delta t = 2h$ ）：

（1）区间平均降雨量 P 的计算。采用五岳、王家坝等 15 站雨量的加权平均法计算，各个雨量站权重见表 3.2-1。

表 3.2-1 息潢班—王家坝区间各雨量站面积权重

站名	五岳	南李店	光山	寨河	沙窝
权重	0.06	0.029	0.016	0.06	0.069
站名	双柳树	潢川	息县	包信集	颍子集
权重	0.116	0.088	0.092	0.112	0.102
站名	北庙集	淮滨	班台	正阳	王家坝
权重	0.091	0.07	0.031	0.04	0.024



图 3.2-2 研究区域——淮河王家坝站以上流域图（息潢班—王家坝区间）

(2) 区间前期影响雨量 P_a 的计算。采用流量起涨前 30 天雨量，用迭代式 (3.2-1) 先计算单站 P_a ，再使用加权平均法计算流域 P_a 。

$$P_{a,t} = K(P_{a,t-1} + P_{t-1}) \tag{3.2-1}$$

式中： $P_{a,t}$ 为当日前期影响雨量，mm； $P_{a,t-1}$ 为前一日前期影响雨量，mm； P_{t-1} 为前一日流域平均雨量，mm； K 为前期影响雨量折减系数。

息潢班—王家坝区间流域最大损失量 $I_m = 70\text{mm}$ (P_a 的上限值)，各月 K 值见表 3.2-2。

表 3.2-2 王家坝区间各月 K 值表							
月份	4	5	6	7	8	9	10
K	0.93	0.93	0.85	0.85	0.85	0.93	0.93

(3) 区间径流深 R 计算。径流深 R 采用降雨径流相关图法进行计算，降雨径流相关图见图 3.2-3。

(4) 区间汇流计算。以降雨分布系数为参数，采用不同的单位线进行区间汇流计算。降雨分布系数 α 的计算公式为

$$\alpha = \frac{P_{南}}{P_{北}} = \frac{\sum P_{南i} W_{南i} / \sum W_{南i}}{\sum P_{北i} W_{北i} / \sum W_{北i}} \tag{3.2-2}$$

式中： $P_{北i}$ 、 $P_{南i}$ 为雨量站的点降雨量； $W_{南i}$ 、 $W_{北i}$ 为雨量站的面积权重。具体权重见表 3.2-3。