

基于物理成因的中长期 水文预报方法与应用研究

刘 勇 王银堂 陈元芳 张续军 胡 健◎著

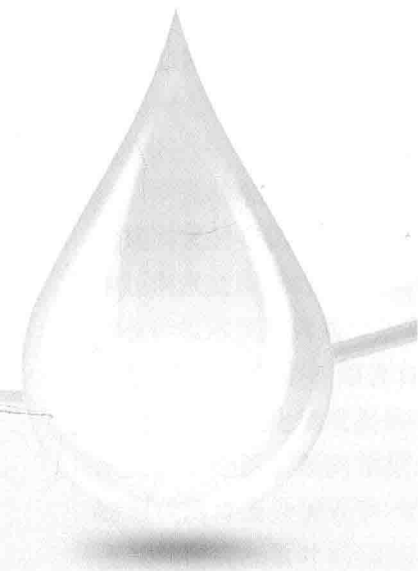


河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

院出版基金资助出版

基于物理成因的中长期 水文预报方法与应用研究

刘 勇 王银堂 陈元芳 张续军 胡 健◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书针对目前中长期水文预报中利用“时滞关系”选择预报因子来进行预报的途径缺乏明确的物理解释性的问题。建立了能利用同期预报信息的基于气候数值预测产品的中长期水文预报模型。结合目前国家气候中心的月动力延伸集合预报系统产品,识别了影响预报对象同期的预报因子,利用最优子集回归预报方法建立了预报方程。模型将数值预报和统计方法进行结合,从而既利用了同期的气象要素,又增加月动力延伸预报模式直接输出结果的价值,提高预报的可利用性。实例证明了气候数值预测产品在中长期水文预报中应用的可行性。

图书在版编目(CIP)数据

基于物理成因的中长期水文预报方法与应用研究/刘勇等著.—南京:河海大学出版社,2017.10

ISBN 978-7-5630-4796-3

I. ①基… II. ①刘… III. ①水文预报—中长期预测—研究
IV. ①P338

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 084114 号

书 名 基于物理成因的中长期水文预报方法与应用研究

书 号 ISBN 978-7-5630-4796-3

责任编辑 彭志诚

封面设计 徐娟娟

出版发行 河海大学出版社

地 址 南京市西康路 1 号(邮编:210098)

电 话 (025)83737852(总编室) (025)83722833(营销部)

经 销 江苏省新华发行集团有限公司

排 版 南京布克文化发展有限公司

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 787 毫米×960 毫米 1/16

印 张 12.25

字 数 207 千字

版 次 2017 年 10 月第 1 版

印 次 2017 年 10 月第 1 次印刷

定 价 50.00 元

我国是一个水资源短缺而又洪涝灾害频发的国家,社会经济飞速发展带来的水污染问题也日趋严重,使得本就有限的水资源可利用量大为降低,加剧了水资源的危机。受季风气候影响,加之特殊的地理位置,我国的水资源开发利用多依赖于水利工程,因此,水利工程的科学合理调度在一定程度上决定了水资源的利用程度和利用效率,也同样决定了水资源综合利用效益的发挥。科学合理的水利工程调度是建立在掌握流域客观水文规律、精确预报未来水文形势的基础之上的。高精度的水文预报信息可为人们在协调防洪与兴利矛盾时,能够尽早采取措施,统筹安排,以获得最佳效益。随着社会经济的高速发展,人们对水文预报提出的要求越来越高,不仅要求有准确的短期预报,以防御突发的暴雨洪水事件,同时还要求有更长预见期的中长期水文预报,以满足人们社会经济生产安排的需求。因此,建立适宜的、具有较高精度的中长期水文预报技术,并在此基础上建立水利工程的优化调度方案,一直以来都是人们研究的焦点问题之一。

中长期水文预报受气象等多种大尺度物理因素变化的影响很大,因此,注重物理因素的变化规律,探寻其对长期水文过程的控制机制,能够很大程度上提高中长期水文预报的准确性,增强其在水利工程运行中的应用价值。计算智能作为智能技术发展的高级阶段,是解决复杂问题的有效手段,已在复杂系统描述、控制、优化和管理等综合自动化方面展示了魅力,同样能够为中长期水文预报和水利工程优化调度提供有力支撑。气象上数值预报模式的发展也为中长期水文预报提供了新的预报信息来源。基于此,本书从影响中长期水文要素的物理成因背景分析入手,结合粗糙集理论、相关向量机等智能学习技术以及数值气候模式和贝叶斯理论等方法探讨了基于物理成因的中长期水文预报途径,并将预报成果应用于水库群中长期发电优化调度中。书中取得的主要创新有:



(1) 提出了基于粗糙集—相关向量机的中长期水文预报模型。在影响预报对象物理成因分析的基础上,利用粗糙集理论对关键的预报信息进行了有效挖掘,遴选的因子既充分吸收了全部的预报信息,又消除了预报因子间的信息冗余,同时利用相关向量机方法对预报因子与预报对象之间的关系进行了模拟,并对未来预报对象的变化进行了预报。实例证明了提出的模型具有较高的预报精度。

(2) 建立了基于气候数值预测产品的中长期水文预报模型。从寻求影响预报对象同期的气象环流要素出发,结合月动力延伸集合预报系统(DERF)的预报产品,识别了影响预报对象同期的预报因子,利用最优子集回归预报方法建立了预报方程。该模型利用了预报对象同期的预报信息,具有更加明确的物理解释性,同时该模型也为气候数值预测与水文预报的集成提供了新的思路和方法。

(3) 提出了基于改进贝叶斯判别的中长期水文概率预报模型。利用核密度估计理论,对传统贝叶斯判别分析方法中的分布密度函数估计进行了改进,在此基础上,提出了基于改进贝叶斯判别的中长期水文分类概率预报和连续概率预报模型。该模型充分利用预报过程中的各种信息,以超过概率分布形式描述水文预报的不确定性,给出水文预报变量的中值和指定概率的区间预报值,可以衡量水文变量发生的不确定性程度。

(4) 建立了基于物理成因的水库中长期径流预报系统平台。采用人工干预和系统优选相结合的方式优选预报模型,并能在该平台下对预报方法、预报结果进行灵活选择、对比分析、精度评定以及结果修正;同时,系统数据在线传输、实时管理、资料检索以及预报成果的图、表显示和打印功能,可为水库防汛抗旱、水资源调度和雨洪资源利用提供依据和支撑。

本书主要由刘勇撰写和统稿,各章主要执笔人或参与人如下:第1章:刘勇;第2章:刘勇,王银堂,胡庆芳;第3章:刘勇,陈元芳,崔婷婷;第4章:张续军,胡健,邱颖;第5章:刘勇,张续军,胡健;第6章:刘勇,胡庆芳,崔婷婷;第7章:刘勇,邱颖,薛建军;第8章:刘勇,王银堂。另外,本书的编写得到了广大水利同行的帮助与支持,南科院水文所刘九夫所长、吴永祥副所长、陆善萍副所长,以及河海大学黄振平教授、梁忠民教授、谢悦波教授、毛昭雄教授,南京大学吴吉春教授、许有鹏教授、王栋教授,水利部齐兵强处长、刘国军主任等,都对该书的完成给予了指导和帮助,在此表示诚挚的感谢!本书的撰写参考和引用了国内外许多学者的论文和论著,谨向这些学者表示衷心的感谢。



本书得到了(1)国家重点研发计划课题:2016YFC0400910(课题名称:流域雨洪利用技术体系与智能管理平台),2016YFC0401502(课题名称:长三角地区城镇化对水文过程与水安全影响研究);(2)国家自然科学基金项目:51609140(项目名称:基于动力-统计信息挖掘的中长期水文集合预测方法研究);(3)南京水利科学研究院出版基金的大力支持和资助。

鉴于中长期径流预报问题的复杂性,涉及因素众多,同时研究人员水平有限,书中难免有错漏之处,殷切希望同行专家和读者朋友给予指正。

作者

2017年1月

中长期水文预报不仅对防汛抗旱、水库调度等有重要的作用,而且在水资源的管理和高效利用等方面也有非常重要的意义。因此,如何建立适宜的、满足精度要求的中长期水文预报模型,一直以来就是水文工作者研究的重点问题之一。近年来,随着计算机技术的发展和数学方法的不断涌现,中长期水文预报研究得到了较快的发展,但是,由于中长期水文过程的复杂性以及众多不确定因素的制约,总体上还处于探索、发展阶段。当前以降雨或径流系列本身作为信息获取对象的中长期水文预报方法,受物理解释力弱和模型稳健性差的限制,预报精度不高,难以满足生产实际的需要。基于此,本书从中长期水文预报的信息提取、模型建立以及成果应用这三个方面出发,探讨了能有效改进预报精度的中长期水文预报新方法。

如何识别影响水文要素的关键物理因子是建立中长期水文预报模型中首先要解决的问题。书中从水文循环的机理出发,综合分析了影响水文要素的物理成因背景,主要包括大气环流、海洋、陆地、天文地球物理因子以及人类活动等,利用数理统计方法分析物理因子对预报对象的影响程度,甄别影响水文要素变化的预报信息,为研究提供资料准备和理论支撑。

如何在清晰成因背景、初选预报因子的基础上,科学识别关键预报因子,进而研发能充分挖掘数据信息预报技术,是提高预报精度的关键。本书在分析影响流域水文要素变化的物理成因背景、识别具有物理解释性和易量化的初步预报因子的基础上,利用粗糙集理论以及统计学理论中的相关向量机方法,探讨了挖掘关键预报信息的新途径,建立了既能充分吸收多种预报因子信息,又能自适应消除信息冗余的中长期水文预报模型。实例证明了基于粗糙集—相关向量机的中长期水文预报模型具有较高的稳定性和预报精度。

针对目前中长期水文预报中利用“时滞关系”选择预报因子来进行预报的途径缺乏明确的物理解释性的问题,本书建立了能利用同期预报信息的基于气候



数值预测产品的中长期水文预报模型,通过结合目前国家气候中心的月动力延伸集合预报系统产品,识别影响预报对象同期的预报因子,利用最优子集回归预报方法建立了预报方程。模型将数值预报和统计方法进行结合,从而既利用了同期的气象要素信息,又利用了月动力延伸预报模式直接输出结果的价值,提高了预报的可利用性。实例证明了气候数值预测产品在中长期水文预报中应用的可行性。

传统的中长期预报结果一般为确定性预报,其缺点是无法确定预报结果可能的波动范围以及相应的风险大小。由于预报问题的超前性,实现概率性的预报更符合客观需求。针对中长期水文预报实际需求的不断提高以及目前确定性预报的缺陷,书中提出了一种基于贝叶斯判别的中长期水文概率预报模型。在遴选出关键预报因子的基础上,利用改进的贝叶斯判别理论,分别建立了基于改进贝叶斯判别的中长期水文分类概率预报和连续概率预报模型。实例证明了建立的模型不论模拟还是试报精度均令人满意。

结合中长期水文预报成果,建立了基于中长期预报信息的水库群发电优化调度模型,针对常规遗传算法在水库调度应用中存在的不足,提出了改进策略。将该模型应用到乌江流域梯级水电站群的中长期发电优化调度中,结果显示与常规调度方法相比,新模型明显增加了梯级水电站的发电效益,长期水文预报成果的应用又可最大限度地规避调度过程中的风险和损失,实现最大的效益。

第 1 章 绪论	1
1.1 选题背景及研究意义	1
1.2 研究现状及发展趋势	3
1.2.1 中长期水文预报研究现状及趋势	3
1.2.2 水库群优化调度研究现状及趋势	14
1.3 主要研究内容及总体框架	21
1.3.1 主要研究内容	21
1.3.2 研究思路和框架	22
第 2 章 影响水文要素的物理成因背景分析	24
2.1 引言	24
2.2 影响水文要素的物理成因	24
2.2.1 水文循环及其意义	24
2.2.2 大气环流对水文要素的影响	26
2.2.3 海洋对水文要素的影响	29
2.2.4 陆面对水文要素的影响	31
2.2.5 天文、地球物理因子对水文要素的影响	33
2.2.6 人类活动对水文要素的影响	36
2.3 预报因子的选择	38
2.3.1 预报因子量化	39
2.3.2 预报因子挑选方法	43
2.4 丹江口水库入库径流海气背景分析及预报因子识别	46
2.4.1 丹江口水库概况	46



2.4.2	丹江口水库入库径流演变特征分析	48
2.4.3	影响秋汛期丹江口水库入库径流物理背景分析	50
2.5	本章小结	69
第3章	基于粗糙集-相关向量机的中长期水文预报模型研究	71
3.1	引言	71
3.2	粗糙集理论简述	71
3.2.1	粗糙集理论的基本思想	72
3.2.2	粗糙集理论基本概念	72
3.3	统计学习理论与相关向量机	76
3.3.1	统计学习理论	77
3.3.2	相关向量机模型	79
3.4	基于粗糙集-相关向量机的中长期水文预报模型	84
3.5	丹江口水库中长期径流预报	86
3.5.1	预报因子处理	86
3.5.2	基本预报因子集的确定	87
3.5.3	相关向量机建模	88
3.5.4	预报结果分析	89
3.6	本章小结	93
第4章	基于气候数值预测产品的中长期水文预报模型研究	94
4.1	引言	94
4.2	月动力延伸预报应用研究	95
4.2.1	T63L16 中期数值预报模式	95
4.2.2	月动力延伸集合预报系统	99
4.2.3	模拟结果分析	100
4.3	基于气候数值预测产品的中长期水文预报模型	104
4.4	洪家渡水库中长期径流预报	107
4.4.1	洪家渡水库概况	107
4.4.2	预报因子选择	108
4.4.3	建立模型	110



4.4.4	预报结果分析	111
4.5	本章小结	114
第5章	基于改进贝叶斯判别的中长期概率水文预报研究	115
5.1	引言	115
5.2	贝叶斯判别分析理论	116
5.2.1	贝叶斯判别的基本概念	116
5.2.2	正态总体的贝叶斯判别	117
5.3	基于改进贝叶斯判别的中长期水文概率预报研究	118
5.3.1	改进的贝叶斯判别法	118
5.3.2	基于改进贝叶斯判别的中长期水文分类预报	120
5.3.3	基于改进贝叶斯判别的中长期水文概率预报	121
5.4	丹江口与洪家渡水库中长期径流概率预报	123
5.4.1	预报因子确定	123
5.4.2	分类预报模型	124
5.4.3	概率预报模型	130
5.5	本章小结	134
第6章	基于中长期预报信息的水库群发电优化调度研究	136
6.1	引言	136
6.2	水库群中长期发电优化调度研究	137
6.2.1	水库群中长期发电优化调度模型研究	137
6.2.2	基于实数编码加速遗传算法的梯级水库群发电优化调度 研究	139
6.2.3	考虑径流预报的梯级水库群优化运行滚动修正	146
6.3	乌江梯级水库群中长期发电优化调度应用研究	148
6.3.1	梯级水库概况	148
6.3.2	基本资料	148
6.3.3	信息输入	149
6.3.4	结果分析	150
6.4	本章小结	154



第 7 章 水库中长期径流预报系统	156
7.1 引言	156
7.2 丹江口水库中长期水文预报系统	156
7.2.1 系统登录	156
7.2.2 系统主界面	157
7.2.3 资料处理	158
7.2.4 长期径流预报	159
7.2.5 中期降雨预报	160
7.2.6 贝叶斯修正预报	162
7.2.7 帮助系统	163
7.3 本章小结	164
第 8 章 结论及展望	165
8.1 总结	165
8.1.1 主要研究成果和结论	165
8.1.2 主要创新点	167
8.2 展望	167
参考文献	169

1.1 选题背景及研究意义

我国是一个水资源短缺而又旱涝灾害频发的国家,一方面,随着我国现代化建设的不断发展,河道外各类用水急剧增加,水资源供需矛盾日益尖锐,成为制约我国经济社会发展的瓶颈;另一方面,由于气候变化、人类活动等一系列影响,使得我国频频出现几十年甚至上百年一遇的干旱、洪涝、雪灾,以及引起夏季强降水的台风等重大气候灾害,给人民的生产、生活以及经济社会发展带来重大损失。与此同时,社会经济飞速发展带来的水污染问题日趋严重,水生态破坏甚至使水体丧失了使用功能,有限的水资源可利用率降低,加剧了水资源的危机。

为了缓解水资源供需这一矛盾,采取工程措施是一个重要途径。我国从建国以来修建了大量蓄水引水工程,在水资源时间分配方面,利用水库调节天然径流的作用,在汛期拦蓄洪水削减洪峰,在枯水期从水库中放水以满足各部门的用水需求;在水资源空间分布方面,跨流域引水成为主要的解决途径,利用大规模的提引水工程,将水资源从丰沛地区引入短缺地区,大大缓解了水资源短缺地区的供需矛盾。除了上述的工程措施之外,有效利用现代科学技术,挖掘现有工程措施中的潜力,对水库、水资源进行优化调度等工作也是保证各种水利工程能够充分发挥社会效益的非工程措施。在合理的控制运用下,各类水利工程可以发挥较原设计更大的作用,也能更好地解决防洪与兴利、水资源合理调配等问题。

预报和调度是水库优化运行的核心问题。科学合理的水库调度决策是充分发挥水库综合效益的关键。高效的水库调度是建立在科学掌握流域客观水文规律、高精度预报未来水文现象变化的基础之上的。随着社会经济的高速发展,人们对水文预报提出的要求也越来越高,不仅要求有准确的短期预报,以防御突发



的暴雨洪水事件,同时也要求有较长预见期和高精度的中长期水文预报,以满足人们社会经济生产安排的需求。因此,如何建立适宜的、具有较高精度的水库中长期水文预报技术,更好地为水库复杂系统调度服务,一直以来就是人们研究的焦点问题之一。高精度的中长期水文预报对水库的安全防汛、有效抗旱、科学安排水资源的调度计划、提高水力发电的稳定性和高效性等方面具有重要作用,也是水库高效运行管理不可或缺的组成部分。因此,水库中长期水文预报直接影响到水利设施的安全与经济效益,对于合理开发以及优化水资源、更好地推动社会经济的发展具有重要意义。

中长期水文预报是自然与技术科学领域内的一项研究难题,由于其复杂性,目前就国内外研究现状而言,总体上还处于探索发展阶段。预报精度还远远不能满足生产部门的需求,相对于短期预报而言,滞后于生产实际的要求^[1]。在预报理论研究上,目前更多的是注重水文序列相关特性的研究,而对物理成因分析关注的相对较少;在预报方法上,各种方法层出不穷,而对于具体方法的有效性以及适宜性研究还不够;在实际应用中,中长期径流预报目前也主要是对防洪减灾和一些水资源的宏观方面的研究提供参考性作用,其研究意义远远没有得到体现^[2,3]。

水库调度也称水库控制运用,是根据水库承担的水利任务及规定的调度原则,对已建水利水电枢纽合理有效地控制运用,达到除害兴利,综合利用水资源的目的。随着我国经济建设的迅速发展,水电站水库群的数量与规模都出现了快速增长的势头,其规划设计和运行管理问题愈来愈复杂^[4]。水库群优化调度本身是一个复杂的大型、动态、有约束的混合整数非线性规划问题。几十年来随着计算机技术的迅速发展和优化理论的深入研究,水利工作者尝试应用各种优化算法来解决水库群的优化调度问题,从传统的线性规划法、非线性规划法、网络流规划法、最优控制理论和动态规划法等到现代的人工神经网络方法、遗传算法、混沌优化算法、蚁群算法和微粒群算法等,但每种算法都有其不足。因此如何在已有研究成果的基础上继续完善、改进和探索新的求解方法,是水库群优化调度所面临的一个亟待解决的问题。

总之,现有的一些理论方法在解决水库的中长期预报和调度问题方面的适用性和有效性上均有所不足,因此,需要进一步深入研究,从而提高其实际应用的可能性。中长期水文预报受大尺度水文气象要素变化的影响很大,只有注重水文气象要素的变化规律,探寻其对长期水文过程的控制机制,才能从根本上提高中长期水文预报的准确性,增强其在水库运行中的应用价值。计算智能作为



智能技术发展的高级阶段,是解决复杂问题的有效手段,已在复杂系统描述、控制、优化和管理等综合自动化方面展示了魅力,它也同样能够为中长期水文预报和水库群优化调度提供有力支撑。本书在前人研究的基础之上,对中长期水文物理成因分析和计算智能在预报和调度系统中的应用作了进一步的探索和研究,旨在为解决中长期水文预报和库群优化调度问题提供一些新理论和新方法及相应的实证分析。

1.2 研究现状及发展趋势

本书主要对中长期水文预报和水库群优化调度的若干关键技术进行了探讨研究,围绕相应的研究内容,着重对中长期水文预报和水库群优化调度这两个方面的研究现状及发展趋势展开综述。

1.2.1 中长期水文预报研究现状及趋势

水文预报是指根据水文要素或其影响因素的过去或现时状态,对其未来状态做出回答^[5]。水文预报有不同的分类方法,按预见期可分为短期水文预报和中期水文预报,一般以流域汇流时间为界,凡预报的预见期小于或等于流域汇流时间的称为短期预报,否则称为中长期水文预报(Mid-long Term Hydrological Forecasting)。按预报对象与内容的不同,通常把预见期在 3 d 至 15 d 的称为中期预报,15 d 以上 1 年以内的称为长期预报,1 年以上的则称为超长期预报^[1,6]。短期水文预报和中期水文预报不仅是预报的预见期长短不同,而且在预报方法和途径上也有很大的差别,同时也存在着预报精度的差异。一般来说,预见期越长,预报精度越低,预见期越短,预报精度越高。

1.2.1.1 中长期水文预报发展历程

早在我国汉代,就已有水文情势长期变化的记载。《史记·货殖列传》记有“六岁穰,六岁旱,十二岁一大饥”,反映了黄河流域一带旱涝年景交替出现的变化趋势。公元 11 世纪的宋代,《宋史·河渠志》记载了“自立春之后,东风解冻,河边人候水,初至凡一寸,则夏秋当一尺”,说明了当时已经出现了由前期水文情况估计后期水文趋势的中长期水文预报的初始思想。

近代中长期水文预报研究始于 19 世纪末。“世界天气法”首先应用于尼罗河下游的春汛洪水预报,其后又广泛地应用到欧洲与北美一些国家。我国对此的研究最早出现在 20 世纪 30 年代,气象学家涂长望提出从大气环流的整体观



点出发,研究大气活动中心、大气波动以及海洋环流与中国降水和温度变化的关系,并根据前期东亚大气活动中心的特征做了预测后期长江水文状况的研究,开创了我国长期水文气象预报的研究。50年代初,气象学家杨鉴初全面总结应用气象要素历史规律性的五个重要方面,提出了用气象要素的历史演变做长期天气预报的方法,对我国气象台站的长期预报起了推动作用,1958年内蒙自治区水文总站根据该方法做了黄河的长期洪水预报。50年代末期,开始普遍应用环流分型、气象要素等方法研究洪水和年径流的长期预报,长江流域规划办公室根据东亚大气环流的前后期演变规律作了长江的中长期水文预报。60年代以后,由于气象学、海洋学等其他相关学科的发展以及新的探测手段的出现,进一步推动了中长期水文预报的发展。同时概率统计的发展为揭示水文要素演变规律以及及各种影响因素之间的相互关系等方面提供了有力的工具。近十几年,各国专家在努力提高统计预报模式的分辨率和平均预报技巧的同时,已开始注意最大限度地促进气象数值预报产品的总体综合利用。欧洲多国根据欧洲中期气象预报中心(ECMWF)的逐日降水预报结果,共同开发了欧洲洪水预报系统(EFFS)。美国国家气象中心将集合预报的概念和方法引进水文预报领域,提出了水文集合预报^[7](Ensemble streamflow prediction,简称ESP),拓宽了中长期预报的发展思路。尽管中长期水文预报技术已经有了长足的进步,但是随着预见期的增加,受许多影响因素变化的不确定性以及目前科学技术水平的限制,中长期水文预报研究仍处在探索、发展阶段,预报精度还远远不能满足生产部门的要求,相对于短期预报而言,滞后于生产实际的要求。《水文情报预报规范》^[8]指出:“中长期预报方法目前尚不成熟,应积极开展研究,为了适应生产发展的需要,有条件的水情单位,可以发布中长期水情展望,只提供领导掌握参考,不作为采取具体措施的依据,并注意结合实际变化,随时对展望进行补充。”造成这种状况的根本原因是对于中长期水文预报认识不足,重视程度也不够。随着国民经济的快速发展,对自然资源开发与环境保护意识的增强,流域内各部门对防洪和供水预见期的要求越来越高。生产的需求必然会推动科技的发展,所以,中长期水文预报的研究将会愈来愈受到科研人员的重视。

1.2.1.2 中长期水文预报的途径和方法

中长期水文预报的方法很多,已在水文水资源研究中得到了广泛的应用,对水文水资源科学问题的解决起到了非常重要的作用。但是目前就国内外的研究现状而言,由于其复杂性,中长期水文预报研究仍然处于探索阶段。存在的主要问题是预报精度较低,在实际工作中难于有效地指导生产实践^[9]。从水文现象



形成的物理机制出发,建立完全的物理预报模型是中长期水文预报的理想道路,但是由于长期水文过程影响因素的复杂性,其物理机制远远未被人所认识,对其物理机制还很难做出比较客观的定量描述,因此完全建立在物理成因基础上的预报模型尚需时日。从中长期水文预报的发展历程来看,概率统计方法一直占据着主流位置,而寻找预报对象的有效预报信息源则一直是中长期水文预报的核心问题。从这个角度来看,中长期水文预报的途径主要有两类,一类是通过水文要素本身的演变规律来寻求预报信息,另一类主要是通过影响水文要素变化的物理机制来寻求预报信息。针对这两类途径,各种预报方法层出不穷,下面进行简要叙述。

(1) 通过水文要素本身的演变规律来寻求预报信息

通过水文要素本身的演变规律来寻求预报信息,主要是根据河川径流的变化具有的连续性、周期性、地区性和随机性等特点来开展研究。《宋史·河渠志》中记载的故事就是利用前期的径流过程来预报后期径流的典型例子。任一水文气象要素的长期历史实测值,全面地反映了这一要素的时序变化规律。尽管目前还不能辨认影响要素变化的内因与外因或影响程度,但是诸因素的综合影响却已全面融汇于要素的时序变化之中,若能找出该要素的历史变化规律,便可以用它进行预报^[10]。气象学家杨鉴初 1951 年提出的历史演变法就是通过长期气象要素的历史变化曲线,从中寻找规律来进行长期预报的,内蒙古自治区水文总站根据该方法做了黄河的长期洪水预报,取得了一定效果。应用历史演变法做预报简单易行,但是其缺点是缺乏严格的定量标准并含有一定的主观成分,这就给我们提出了一个问题,能否根据过去的历史资料统计规律对未来的水文要素定量预报,概率统计方法在这方面提供了有效的工具。

水文现象具有明显的周期性特征,根据实测水文时间序列,识别出水文要素的显著周期,假定这些周期在未来一段时间内保持不变,就可以利用周期的外延进行定量预报,该方法的关键是如何找出显著的周期。近年来,提取时间序列周期的统计方法发展迅速,从离散的周期图、方差分析过渡到连续谱分析。李万绪^[11]利用周期图法进行了径流时间序列的分析。范钟秀^[1]利用方差分析周期,然后应用周期叠加对钱塘江流域金华水文站的最高水位进行了预报。汤成友等^[12]利用周期均值叠加法对长江寸滩站的年最高水位、月最高水位进行了预报,预报误差在 15% 以内。左其亭、高峰等^[13]从水文时间序列的趋势和振幅变化对周期分析影响较大的角度出发,对周期均值叠加法进行了改进。李崇浩、纪昌明等^[14]针对方差分析中余波成分被舍弃的缺点,提出了最终余波概念和相应