

HONGSHUI ZIYUANHUA
LILUN YU FANGFA YANJIU

洪水资源化 理论与方法研究

董四辉 著



煤炭工业出版社

洪水资源化理论与方法研究

董四辉 著



煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

洪水资源化理论与方法研究 / 董四辉著. -- 北京:
煤炭工业出版社, 2013

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4234 - 9

I. ①洪… II. ①董… III. ①洪水—资源化—研究
IV. ①P331.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 096034 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 960mm¹/₁₆ 印张 8¹/₄
字数 141 千字 印数 1—700
2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷
社内编号 7062 定价 27.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

针对我国水资源不足和洪水资源浪费严重等问题,本书作者依据降雨、洪水预报信息,分9章对水库实施防洪预报调度实现洪水资源化的相关理论和方法进行了研究。第1章为水资源中长期预报模型研究;第2章、第3章为洪水汇流预报模型参数优化研究;第4章为洪水灾情综合评价方法研究;第5章到第9章,以参窝水库为应用对象,根据降雨、洪水预报信息实施防洪预报调度方式研究,包括可行性分析、预报调度方式研究、风险效益计算、风险率随机模拟、实时调度汛限水位优选。

本书可供水资源领域工程技术人员、研究人员和高等院校教师阅读与参考,也可作为水资源专业研究生的教材或教学参考书。

前 言

由于我国地域广阔,降雨时空分布差异较大,使得有些地区洪水灾害频繁、洪灾损失严重,而有些地区却干旱缺水问题突出,为解决这一突出矛盾,我国必须实行防汛抗旱并举的方针。为实现防汛抗旱并举,开发利用洪水资源,减害增利,更好地促进人与自然和谐共存,近年来水利部门和各高校、科研院所开展了一系列洪水资源化课题的探索性研究。洪水资源化就是从我国实际情况出发,按照新时期治水思路 and 理念,全过程、全方位、多角度地转变“入海为安”的思想,统筹防洪减灾和兴利,综合运用系统论、风险管理、信息技术等现代理论、管理方法、科技手段和利用工程措施,实施有效洪水管理,对洪水资源进行合理配置,在保障防洪安全的同时,努力增加水资源的有效供给,维系良好的生态环境。

近年来对洪水资源化开展了多项课题研究:一是充分利用汛期洪水,进行流域水量配置,即通过上游汛期拦蓄洪水,集中向下游干旱地区输水,恢复下游生态系统;二是利用干流汛期洪水,引水到支流,有效保护支流湿地,维系生态环境;三是进行跨流域配置洪水资源,解决区域性缺水问题;四是提高水库调度水平,合理拦蓄洪水,实现丰水枯用;五是对于稀遇洪水,主动、合理运用蓄滞洪区分洪,给洪水出路,达到减轻干流压力,蓄、滞和利用洪水的目的。

其中第四个课题是为解决流域降雨时间分布不均而展开研究的。我国很多地区,一年内的降雨主要集中在汛期,尤其是北方干旱地区,汛期的降雨量占全年降雨量的70%~80%。因此,如果不在汛期抓住时机蓄水,汛末水库很有可能蓄不到兴利蓄水位。我国目前绝大部分已建水库采用的仍是不考虑洪水预报的常规调度方式,汛期需要较大的防洪库

容,由此出现汛限水位过低的同时,整个汛期汛限水位静态控制在一个或几个(汛限水位分期控制)水位上的现象,致使常常出现汛期大量泄洪,汛后无水可蓄的问题。

科学、合理地抬高汛限水位和对汛限水位实施动态控制是提高洪水资源利用率、解决水资源时间分布不均的重要措施之一,它需要理论的创新、技术的支撑和实践的探索。为此,2002年以来国家防汛抗旱总指挥部办公室(国家防办)在全国选择了12座代表性的水库进行了汛限水位设计与运用研究试点,并开展了国内外水库设计洪水理论和防洪调度方法分析评价、设计洪水方法分析研究、水库汛期分期设计洪水研究和水库汛限水位动态控制方法研究等4个专题的研究。

基于上述研究背景,本书结合试点水库中典型代表水库群项目的参窝水库,重点对上述4个专题中的第四个专题“水库汛限水位动态控制方法研究”展开研究。具体内容包括洪水资源中长期预报研究、洪水汇流预报研究、洪水演进模型参数优化研究、洪水灾情综合评价研究、参窝水库实施防洪预报调度可行性研究、参窝水库防洪预报调度方式研究、参窝水库实施防洪预报调度方式风险效益计算、参窝水库实施防洪预报调度方式风险率随机模拟、参窝水库实时调度汛限水位优选。

本书所述研究成果得到了大连理工大学水利工程学院水资源与防洪研究所全体老师的大力支持,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,在防洪预报调度方面的研究和应用还有待于进一步深入。书中错漏之处,敬请读者批评指正。

董四辉

2013年3月于大连交通大学

目 录

0 绪论	1
0.1 我国面临的水资源问题	1
0.1.1 我国面临的水资源短缺问题	1
0.1.2 我国洪水资源的大量浪费现象	1
0.2 洪水的双重属性及洪水资源的利用	2
0.2.1 洪水的双重属性	2
0.2.2 解决水资源短缺的措施	2
0.2.3 提高洪水资源利用率的手段	2
0.2.4 洪水资源化的风险	3
0.3 防洪及防洪措施概述	4
0.3.1 防洪工程措施	4
0.3.2 防洪非工程措施	4
1 水资源中长期预报模型研究	6
1.1 概述	6
1.2 基于粗集理论的水文中长期预报模型	6
1.2.1 粗集理论介绍	6
1.2.2 预报模型的建立与求解	7
1.3 实例应用	14
1.4 结论	17
2 洪水汇流预报研究	18
2.1 概述	18
2.2 瞬时单位线的参数优化估计	19
2.3 遗传算法求解瞬时单位线参数	20

2.4	实例应用	21
2.5	结论	24
3	洪水演进模型参数优化研究	25
3.1	概述	25
3.2	马斯京根法的基本原理	25
3.3	遗传算法参数优化计算	26
3.4	实例应用	28
3.5	结论	29
4	洪水灾情综合评价研究	30
4.1	概述	30
4.2	基于传统优化方法和常规遗传算法的混合遗传算法	31
4.2.1	传统优化方法	31
4.2.2	常规遗传算法	31
4.2.3	改进的混合遗传算法	32
4.3	基于投影寻踪技术的洪水灾情综合评价	39
4.4	实例分析	40
4.4.1	不考虑决策者偏好的评价结果	42
4.4.2	考虑决策者偏好的评价结果	46
4.5	结论	47
5	参窝水库实施防洪预报调度可行性研究	49
5.1	概述	49
5.2	参窝水库所处流域——太子河流域及流域上分布的各水库概况	50
5.3	太子河流域水雨情自动测报系统建设与运行情况	51
5.4	参窝水库利用洪水预报信息进行防洪预报调度的可行性分析	52
5.4.1	参窝水库调度控制指标的确定	52
5.4.2	观参区间产流预报模型参数优选	52
5.4.3	观参区间产流预报误差频率分布及其对防洪调度的影响	54
5.4.4	汤河水库产流预报模型精度及产流预报误差分布规律	56

5.5 参窝水库利用短期降雨预报信息动态控制汛限水位的可行性分析	57
5.5.1 参窝水库以上流域未来 24 h 降雨预报精度分析	57
5.5.2 参窝水库以上流域分级预报降雨量频率分布规律	58
5.5.3 无雨及小雨预报误差对汛限水位动态控制影响分析	59
5.6 结论	60
6 参窝水库防洪预报调度方式研究	62
6.1 概述	62
6.2 观参区间、汤河水库设计洪水净雨过程推求	64
6.2.1 观参区间及汤河水库 1960 年典型洪水净雨过程推求	64
6.2.2 观参区间及汤河水库设计洪水净雨过程推求	66
6.3 参窝水库防洪预报调度规则研究	69
6.3.1 参窝水库防洪预报调度规则指标的选取	70
6.3.2 参窝水库防洪预报调度规则	72
6.3.3 参窝水库防洪预报调度规则设计洪水调节成果	74
6.4 观参两库补偿调度下参窝水库汛限水位研究	77
6.4.1 观参补偿调节的可能性分析	77
6.4.2 观参两库补偿调度研究	77
6.5 结论	79
7 参窝水库实施防洪预报调度方式风险效益计算	81
7.1 概述	81
7.2 防洪预报调度方式风险率的数值计算方法	82
7.2.1 水库汛限水位的风险率定义及计算步骤	82
7.2.2 防洪预报调度方式的大坝安全最大风险率	83
7.2.3 防洪预报调度方式的期望误差风险率	85
7.2.4 防洪预报调度方式对下游的风险率	85
7.2.5 参窝水库防洪预报调度方式风险分析结论	89
7.3 参窝水库实施防洪预报调度方式效益分析	90
7.4 结论	90

8 参窝水库实施防洪预报调度方式风险率随机模拟	92
8.1 概述	92
8.2 辽阳以上流域各水库和区间洪水过程随机模拟	93
8.2.1 辽阳以上流域年最大洪水总量的随机模拟	93
8.2.2 洪水组成的考虑	93
8.2.3 洪水过程的生成	95
8.2.4 观参区间及汤河水库产流预报误差的考虑	96
8.2.5 洪水过程模拟结果的检验	96
8.3 随机模拟算例	98
8.4 随机模拟的结果分析	105
8.5 结论	109
9 参窝水库实时调度汛限水位优选	111
9.1 概述	111
9.2 预蓄预泄法确定汛限水位动态控制域上限	111
9.2.1 预蓄预泄法抬高水库汛限水位的基本思想	111
9.2.2 预蓄预泄法抬高水库汛限水位的步骤	112
9.2.3 参窝水库汛限水位动态控制域上限的确定	112
9.3 参窝水库实时调度汛限水位控制优选模型	113
9.3.1 实时调度汛限水位控制优选模型 ^[23-25]	113
9.3.2 实时调度汛限水位控制优选模型求解	114
9.4 参窝水库实时调度汛限水位控制方案优选	115
9.4.1 考虑未来 24 h 发生 0.01% 小雨预报漏报误差的汛限水位 方案优选	117
9.4.2 考虑未来 12 h 发生 0.1% 小雨预报漏报误差的汛限水位 方案优选	119
9.5 结论	120
参考文献	121

0 绪 论

0.1 我国面临的水资源问题

0.1.1 我国面临的水资源短缺问题

我国是世界上 13 个贫水国之一, 年均降水量 630 mm, 低于全球陆地面积的年均降水量 (800 mm)。我国年均水资源总量为 $2.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 虽居世界第六位, 但按 1998 年 12.48 亿人口计算, 人均水量为 2251 m^3 , 仅为世界人均水平的四分之一, 在联合国可持续发展委员会统计的 149 个国家和地区中, 排第 110 位。按国际上的通行标准, 人均拥有水资源 2000 m^3 为严重缺水边缘, 人均拥有水资源 1000 m^3 为起码的要求线, 到 2030 年, 我国人口将达 16 ~ 17 亿, 以 16.5 亿人口计算, 届时我国人均水量仅为 1700 m^3 。也就是说, 从长期趋势看, 我国总体上属于严重缺水的国家。

目前, 我国干旱缺水的地区涉及 20 多个省市区, 其中 18 个省市区接近或处于严重缺水边缘, 有 10 个省市区在起码的要求线以下, 缺水地区面积约 $5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占我国陆地面积的 52%, 缺水耕地面积占全国总耕地面积的 64%, 缺水地区人口占全国总人口的 45%。在全国 600 多座建制市中, 有近 400 座城市缺水, 其中缺水严重的城市达 130 多个, 全国城市每年缺水 $6.0 \times 10^9 \text{ m}^3$, 日缺水量已超过 $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。缺水给城市工业产值造成的损失在 1200 亿元以上, 且呈增长之势。

缺水已成为制约我国社会经济进一步发展和人民生活不断改善的重要因素。

0.1.2 我国洪水资源的大量浪费现象

我国大陆各河流每年流入太平洋水系的总径流量约 $2.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中汛期洪水总量占河流总径流量的 60% 以上, 7 日洪量在长江的主要支流可达年总径流量的 10% ~ 20%, 在北方地区的河流有的甚至高达 30% ~ 60%。全国已建水库总库容为 $0.52 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 只能控制年总径流量的 26%, 特别是我国北方地区, 洪水控制能力更弱, 同时又是我国旱灾高发地区, 人均占有水资源量约为全国平均水平的 1/6。北方地区年降雨量的 70% 左右集中在汛期的两三个月内, 汛期洪水峰高量大, 大量洪水被迫排泄入海, 洪水过后, 随之而来的是干旱。

一方面,我国水资源严重匮乏且日趋紧张,另一方面,在来洪水时,为确保河流和大坝安全,不得不全力以赴地将洪水下泄入海,导致大量没有得到充分利用的宝贵水资源白白流失。如果能将我国大陆各河流每年流入太平洋水系的总径流量的0.3%的洪水加以利用,那么每年就能增加 $6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的水资源,从而可以解决我国城市缺水问题,如果能利用1%,就能每年增加 $2 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的水资源,从而能基本缓解我国的用水紧张状况(我国2000年缺水量为 $1.8 \times 10^{10} \text{ m}^3$)。因此,充分利用洪水资源将是解决我国缺水现状的重要途径。如何在保障防洪安全的同时,提高洪水资源的利用率是我国水利科技工作者的一项重大研究课题。

0.2 洪水的双重属性及洪水资源的利用

0.2.1 洪水的双重属性

洪水是自然界的一种异常现象,其成因主要是暴雨或急剧融冰融雪,其表现特征为河流水位明显上升、流量明显增大、水体总量明显增多。因此,洪水资源不具有长期可利用的特性,供水保证率低,开发利用洪水资源的难度、风险比常规水资源要大,甚至会造成灾害,具有水利和水害双重属性。洪水的水利属性,使得洪水资源具有很大的利用潜力;洪水的水害属性,使得目前洪水资源利用率较低。在水资源日趋匮乏的今天,研究在保障防洪安全的前提下,利用现代先进的科学理论和技术手段,提高洪水资源利用率具有重大理论意义和经济价值。

0.2.2 解决水资源短缺的措施

利用洪水资源的措施包括工程措施和非工程措施两种。众所周知,工程措施需要巨大的资金和人力投入,在我国目前的经济水平条件下,完全靠工程措施解决水资源短缺问题是不现实的,而人们在抗洪斗争的实践中也意识到非工程措施具有投资少、见效快的特点。因此,我们今后的防洪调度重点是在充分利用现有的工程措施条件的基础上,综合运用目前的先进设备、科技手段和管理方法,提高调度水平,在保证防洪安全的条件下,努力提高洪水资源利用率,增加水资源有效供给。水库作为重要防洪工程措施的同时,还主要承担着供水和灌溉等兴利任务,因此,提高洪水资源利用率对水库调度水平提出了更高的要求。

0.2.3 提高洪水资源利用率的手段

对于有防洪和兴利库容的水库,汛限水位是防洪和兴利的结合点。水库汛限水位是为预防可能出现的洪水,确保大坝及下游安全,在防汛期间水库允许兴利蓄水的上限水位。我国初期的水库调度基本全部采用固定汛限水位法,整个汛期内都不允许超汛限水位进行蓄水,时刻预防超标准洪水。固定汛限水位法在实际运行中很

快暴露出了弊端,由于忽略了汛期洪水时程的分布规律,使得多数水库,特别是北方水库汛末水位不能及时抬高拦蓄洪水,造成水资源的浪费。随着水资源供需矛盾的日益紧张以及科学技术的发展,该方法逐渐被分期汛限水位法取代。分期汛限水位法考虑了汛期水文特性的规律,逐渐展现出其思想的先进性,陆续运用到实践中。

分期汛限水位法仍然属于静态控制法,因为没有考虑洪水和降雨预报信息,也没有充分挖掘水库兴利潜力。对于北方水库,主要来水集中在主汛期,汛限水位分期控制仍不能充分利用共用库容提高洪水资源利用率。随着科技的发展、水库流域水雨情自动测报系统和预报调度系统精度的提高,许多水库流域的洪水预报信息和降雨预报信息已达到可利用的程度,相当部分水库具备了修改原调度方式,实施防洪预报调度方式的条件。常规调度方式通常以库水位作为判别洪水级别和改变水库泄量的依据,而相对于常规调度方式,防洪预报调度方式可以以降雨预报的降雨信息和洪水预报的累积净雨量、洪峰信息作为判别洪水级别和改变水库泄量的依据,因而较常规调度方式提前判别洪水级别、改变水库泄量,达到需要较小防洪库容的目的,也因此可以抬高水库的汛限水位。

同时,在一场洪水之后,水库水位从调洪最高水位开始下降时,常规调度方式是将库水位迅速降到汛限水位,以预防设计、校核洪水,完全不考虑气象部门预报的未来几天的降雨情况。若未来几天一直没有大的降雨发生,水库将蓄不到兴利蓄水位,因而将会面临供水、灌溉等兴利用水紧张的状况。如果在水库水位从调洪最高水位下降时,能够利用洪水预报与降雨预报信息,控制水位缓慢下降,则可以达到提高洪水资源利用率的目的。

从以上分析可知,研究利用洪水预报和降雨预报信息,抬高水库汛限水位和对汛限水位实施动态控制,是目前利用防洪非工程措施提高洪水资源利用率的一个重要研究方向。

0.2.4 洪水资源化的风险

通过几千年的防洪减灾实践,特别是对1998年大洪水灾害的反思,人们更清楚地认识到,人类无法从根本上控制洪水,只能从控制洪水向洪水管理的观念上转变,理性协调人与洪水的关系,承担适度风险,利用工程和非工程措施,合理开发利用洪水资源。利用洪水预报和降雨预报信息进行水库调度属于非工程措施,是一种风险调度,在实现洪水资源化的同时,使水库防洪调度承受一定的风险。如何在获得洪水资源化效益的同时,将其风险降到最低程度,并处在可接受的风险范围之内,这是洪水资源化必须解决的重要课题之一,也是本书的研究内容之一。

0.3 防洪及防洪措施概述

防洪是人类与洪水灾害作斗争的控制手段，其目的在于设法防治、减小洪灾损失，保护人民生命财产，促进工农业生产发展，取得生态环境和社会经济的良性循环。防洪措施分为两大类：防洪工程措施和防洪非工程措施。大量防洪减灾实践证明，只有将这两类措施合理配置、相互协调，组成完整的防洪系统，才能充分发挥其作用。

0.3.1 防洪工程措施

防洪工程措施是指为控制或抗御洪水以减小洪水灾害损失而修建的各类工程措施，主要包括水库、堤防、防洪墙、水闸、河道整治工程等。工程措施是一种直接作用于洪水的防洪手段，可以说是硬措施。防洪工程措施依据其措施的本质可以划分为拦、蓄、泄、分、滞五类。

各类工程措施在人类抵御洪水的斗争中发挥了巨大作用。但是，任何防洪工程措施的防洪能力总是有限的。因为在一定的技术经济条件下，工程设施只能防御一定标准的洪水，不可能抵御超标准的稀遇洪水。此外，防洪工程设施的建设对生态环境会产生一定的负面影响。

采取工程措施防洪，要全面考虑现有条件下的利弊得失，选择一种经济合理、技术可行的防洪标准。但是，由于洪水的随机性，出现超过工程防洪标准的稀遇洪水也是可能的。因此，在实施防洪工程措施的同时，采用各种可能的非工程措施是必不可少的。

0.3.2 防洪非工程措施

防洪非工程措施主要是通过科技、教育、经济、管理、法律、政策等手段，削弱、消灭和回避灾源，疏导和转移受害体，减轻次生灾害和衍生灾害的危害，最大限度地减轻洪灾损失。与工程措施相比，非工程措施是一种不直接作用于洪水的防洪手段，主要是管理措施，也可以说是软措施。防洪的非工程措施主要包括以下几类：

(1) 蓄滞洪（行洪）区土地的合理利用。根据自然条件和地理特征，对行洪区土地、工农业生产、产业结构、人民生活居住条件进行全面规划，合理布局，不仅可以直接减轻当地的洪灾损失，而且可使行洪通畅，减少下游的洪灾损失。

(2) 建立洪水预报和预警系统。在江河的重要位置及城市设立预报与预警系统是防御洪水和减少洪灾损失的前哨工作。根据预报可在洪水来临前疏散人口和财物，做好抗洪抢险准备，以避免或减少重大的洪灾损失。

(3) 建立洪水调度系统。合理的洪水调度可以使水流在人们的控制之下,实现削减洪峰洪量、保护重点对象、最大限度利用洪水和防洪工程设施等目的。洪水调度是防洪非工程措施的一项重要内容。

(4) 建立洪水保险和防洪基金。这两项措施不能减少洪灾损失,但可将潜在的一次性大洪水损失转化为多次的小损失(平时交纳的保险金或防洪基金),从而缓解因洪灾引起的经济波动和社会不安等现象。

(5) 抗洪抢险。这也是为了减轻洪泛区灾害损失的一种防洪措施,其中包括洪水来临前采取的紧急措施,洪水期的险工抢修和堤防监护,洪水后的清理和救灾等工作。这项措施须与洪水预报、报警和抢险材料的准备工作等联系在一起。

(6) 水土保持。在流域内开展水土保持工作,增加浅层土壤的蓄水能力,可以延缓地面径流,减轻水土流失,削减河道洪峰洪量和含沙量。该措施对减缓中等强度洪水的作用非常显著,对于高强度的暴雨洪水,虽作用减弱,但仍有削峰滞洪作用。

(7) 信息技术的应用。随着信息技术的发展,信息技术在防洪中的应用日益广泛和深入。主要包括 GIS、RS、GPS 以及数字城市技术(数字流域技术),例如建立基于遥感遥测技术的远程水位、雨量、流量测量系统,该系统可以大大提高数据的实时性和准确性,为防洪调度方案的制定赢得时间;GIS 和 GPS 技术可以在洪灾抢险中发挥重要作用;数字城市技术可将整个城市在洪水前后的各方面信息展现在决策人眼前。充分利用信息技术提高防洪的现代化水平和管理水平是防洪非工程措施的重要发展方向。

在早期的防洪工作中,人们往往只重视工程措施而忽视非工程措施,即重视防洪工程设施的建设而忽视相应的管理工作,以及相关规则制度和法律法规的建设工作,导致防洪设施的作用没有很好地发挥,防洪的管理决策水平不高。为提高防洪的决策管理水平,各种非工程措施逐步运用于防洪工作中,成为与工程措施并驾齐驱的重要方面。近年来,我国在防洪通信、水雨情测报、洪水预报及调度、防洪抢险、分蓄洪区的利用、社会救助、洪水风险范围的研究,以及防洪法规和河道管理条例的制定等方面都取得了长足的进步,防洪非工程措施在防洪中的重要作用日益凸显。

1 水资源中长期预报模型研究

1.1 概述

水文情势中长期预测,对洪水资源的合理分配与充分利用、制定年度防洪策略,有着非常重要的作用。目前,研究中长期预报的主要方法可分为多因子中长期预报和单要素中长期预报。研究多因子中长期预报的方法较多,如应用灰色理论、神经网络和模糊数学进行中长期预报。受天文、气象、自然地理特征和人类活动等复杂因素的影响,水文要素既表现出确定性规律,又表现出随机性规律,而且影响因子之间又表现出强非线性的关系。由于资料短缺与科技发展水平所限,至今尚未真正掌握上述规律,因而多因子的确定成了该预报方法的瓶颈。单要素中长期预报的思想是: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,但是诸因素的影响却已全面地融汇于要素的时序变化之中,若能找出该要素历史变化规律,便能用它进行预报。

目前研究单要素中长期预报的方法较少,除了传统的预报方法之外,就只有利用模糊推理模式法^[1]。传统的单要素预报方法基本分为两种:历史演变法和时间序列外推法。前者经验性强,较难掌握或传授,计算机化亦困难;后者,当新的信息需补充时,必须重新分析计算,工作量大。文献[1]提出的单要素预报的模糊推理模式法,能较好地克服上述方法的缺点并保留其优点,但在建立预报模式时确定影响因子数比较困难,需要根据运算结果反复试算,并且工作量大。为尝试解决上述问题,本章提出了基于粗集理论的中长期预报模型。该方法的基本思想为:根据历史资料选取水文气象要素自身前期 m 年的资料作为预报因子(输入),以第 $m+1$ 年的资料作为输出,形成决策表,利用粗集理论,提取内在规则^[2,3]。

1.2 基于粗集理论的水文中长期预报模型

1.2.1 粗集理论介绍

粗集理论是波兰数学家 Z. Pawlak 在 1982 年提出的一种用于分析具有不确定性

数据的数学理论,它以观察和测量所得的数据进行分类的能力为基础,认为知识是基于对对象分类的能力,知识直接与真实或抽象世界有关的不同分类模式联系在一起,这里称之为论域 U (Universe)^[4]。他对知识的简化和知识依赖性的分析仅依靠数据本身而不需要数据集之外的任何先验信息,如统计方法中的先验概率和模糊集中的隶属度,同时它又与这些传统的处理不确定性数据的数学理论有着良好的相容性。

在粗集理论中,常用知识表达系统来描述知识,决策表是一类特殊的知识表达系统,它指满足某些条件时,会出现怎样的决策(行为)结果。

称 $S = (U, A, \{V_a\}, a)$ 为知识表达系统,其中 U 为非空有限集,称为论域; A 为非空有限集,称为属性集合, $A = C \cup D$, 其中 C 为条件属性集, D 为决策属性集; V_a 为属性 $a \in A$ 的值域, $\{V_a\}$ 为属性值的集合; $a: U \rightarrow V_a$ 为一单映射决策函数,使论域 U 中任一元素取属性 a 在 V_a 中的某一唯一值。

设知识表达系统 $S = (U, A, \{V_a\}, a)$, 如果 A 由条件属性集合 C 和结论属性集合 D 组成,且 C, D 满足 $C \cup D = A, C \cap D = \emptyset$, 则称 S 为决策系统。为了表示简单,有时用 $(U, C \cup \{d\})$ 来表示决策系统,即结论属性集合只包含一个元素。对于子集 $X, Y \in U$, 若根据关系 R, X 和 Y 有属性 R 不可分辨时,我们用 $[X]_R$ 来表示,它代表子集 Y 和子集 X 都属于 R 中的一个范畴。

通过对决策表条件属性约简,去除冗余属性,得到最小的条件属性集,从而得到决策规则表,再将每一规则的属性值简化,得到每一决策规则的多种简化,合并重复规则后,得到该决策问题的多种解,按照某些要求对决策问题进行优化求解,得到该决策问题的最小解。

1.2.2 预报模型的建立与求解

下面以大伙房水库年径流量预报为例介绍模型的建立和求解过程,资料取自1935年至1950年的年径流量^[5],见表1-1。

表1-1 大伙房水库1935年至1950年的年径流量

年 份	1935	1936	1937	1938	1939	1940	1941	1942
年径流量/ $\times 10^6 \text{ m}^3$	1530.39	1959.22	1820.14	1878.62	2193.31	1446.13	1693.76	1775.84
年 份	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950
年径流量/ $\times 10^6 \text{ m}^3$	603.04	726.57	7650.6	1263.6	2352.14	832.59	1427.19	1816.7