

摘 要

1995年7月下旬,辽宁省普降暴雨和特大暴雨,清河流域中、上游发生了100年一遇大洪水。暴雨范围之广、强度之大是历史上罕见的。清河水库溢洪道实现了建库35年以来的第一次泄洪。洪水过后,工程技术人员以本次洪水为典型进行了频率放大计算,并依现行泄流方式进行了调洪计算,结果校核洪水位平坝顶高程。这说明“95·7”洪水较之1953年原设计典型洪水更加恶劣,严重威胁水利枢纽工程的安全。解决这一问题只有两种途径:一是降低主汛期限制水位至128.00m;二是保持汛限水位不变,结合漫顶风险分析的可靠度分析成果,通过预报调度方式的研究,寻求一组新的可操作调度方式。通过可行性分析比较,选择了后者。

为了保持主汛期限制水位129.00m不变,充分利用洪水资源,提高水库防洪兴利效益,关键是需要考虑实际防洪调度的复杂情况,如面临时刻上下游的水情、雨情、工情,防洪目标的侧重点等,选择一个满意的预报调度方式。

本文拟选的预报调度方式主要信息是洪水预报,所以本文首先分析了清河水库原设计防洪特征值及产汇流方式,采用蓄满产流模型和“DHF”产流模型对水库及区间各种频率设计洪水进行放大计算。然后,在洪水预报方案精度分析及预报净雨信息放大的设计洪水过程基础上,选用洪水预报的净雨、实际库水位、入库流量作为水库防洪预报调度方式的判别指标,拟定四种可行的洪水预报调度规划方式,以1995年典型放大的设计洪水进行校核,采用龙格库塔法调洪计算,推求8个防洪特征值作为评价与优选指标。

预报调度方式的优选是一个协调各防洪调度目标的过程,需要确定不同评价指标的权重关系。为此本文采用熵权法确定各目标的数学权重,将其与主观权重线性组合,基于模糊优选模型对清河水库洪水预报调度方式进行方案优选,最终选择第二个方式为满意方式。

关键词: 清河水库; 预报调度方式; 熵权; 模糊优选

Abstract

In 1995, Liaoning Province met the especially big rainstorm and the Qinghe reservoir, met the biggest flood until 1895. The rainstorm is infrequent in scope and intensity. The Qinghe reservoir spillway has realized the first flood discharge in 35 years.

In order to keep the limit water level at 129.00m invariable in flood season, using the flood resources fully and enhancing the reservoir flood prevention to be popular the favorable benefit. Considering the complex situation, it needs to choose a satisfaction plan.

This article plans the forecast dispatch way main information which elects is the flood forecasting, therefore. this article analyzes original design flood prevention characteristic value and produces the afflux way, it uses the saturation excess runoff model and DHF model to compute each kind of frequency design flood. In the flood forecasting plan precision analysis and the forecast net rainfall information enlarges in the design flood process foundation, it takes pure rain, water level and the runoff as the distinguish indexes, draws up four flood forecasting dispatch plan ways, the model enlarged the design flood by 1995 to carry on the examination, uses 8 targets to take the evaluating indicator.

Forecast dispatch way is a coordinated each flood prevention dispatch goal the process, it needs to determine the different evaluating indicator the weight relations. Therefore, this article uses the entropy power law to determine the various goals mathematics weight. Carrying on based on the fuzzy optimal model to the Qinghe reservoir flood forecasting dispatch way the plan optimal. Finally, the article obtains the second plan to be satisfied.

Key words: Qinghe reservoir; Forecast dispatching mode; Entropy eight; Fuzzy optimal decision

大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目：基于熵权的多目标决策防洪预报调度方式优选

作者签名：张清斌 日期：2009年06月28日

大连理工大学学位论文授权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于大连理工大学，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印、或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文题目：基于熵权的多目标决策防洪预报调度方式优选

作者签名：张清斌 日期：2009年06月28日

导师签名：王树强 日期：2009年06月28日

1 绪论

1.1 本文选题背景

1995年7月下旬,辽宁省普降暴雨和特大暴雨,清河流域中、上游发生了100年一遇大洪水。暴雨范围之广、强度之大是历史上罕见的。清河水库溢洪道实现了建库35年以来的第一次泄洪。洪水过后,以本次洪水为典型进行频率分析,若依现行泄流方式及汛限水位进行调洪计算,结果是校核洪水位平坝顶高程。这说明如“95.7”典型的校核洪水发生将严重威胁水利枢纽工程的安全。解决这一问题将有两种途径:一是降低主汛期限制水位至128.00m;二是保持主汛期限制水位129.00m不变,需要改变调度方式,并优选一个满意预报调度方式。前者汛末蓄水将减少,降低兴利效益。后者却是本文研究的目的,即结合漫顶风险分析的可靠度分析成果,通过可行性分析比较,可在不增建水工建筑的前提下,采用最优的调度方式对清河水库进行防洪调度,实现既安全又可增加水库的蓄水量目标,它的研究对提高水库防洪、兴利效益具有重大意义。

在实施预报调度方式的防洪实时预报调度中,由于面临时刻上下游的水情、雨情、工情等状况变化,所以防洪目标之间及其与兴利目标之间的侧重点是不同的,在防洪实施阶段,优选预报调度方式时各目标侧重点也是不同的。为了协调各目标,需确定不同评价目标或称指标的权重关系。目前,按赋值形式不同可将权重分为经验权重和数学权重。对于多目标决策而言,经验权重体现了决策者的偏好,而数学权重通过某种数学计算方法去反映目标对决策的贡献度。本文引入熵权法确定各目标的数学权重,将其与经验权重线性组合,基于模糊优选模型进行多方案优选。

1.2 水库防洪预报调度方式研究现状

1.2.1 水库洪水预报研究现状

洪水预报技术自上世纪30年代霍尔顿下渗理论的提出而发展起来,至60年代主要集中于对经验方法的研究。60年代以来,随着计算机技术的发展,流域水文模型和水情自动测报系统的建立,水文预报逐步实现了联机作业预报。80年代开始,随着系统控制论、模糊数学、灰色系统理论等新方法的引入,水文预报技术在理论与实践方面都得到了突飞猛进的发展,模型预报精度和校正功能有了不同程度的提高。

从1933年,霍尔顿(R. E. Horton)首次提出著名的下渗理论,到1978年英国学者柯克比(M. J. Kirkby)等人提出的山坡水文学,该阶段对产流预报主要致力于物理形成机制的研究。从二十世纪50年代开始,水文学家试图通过简单的数学关系概括复杂的水文现象,引入系统模拟的概念和方法研究水文预报模型。水文模型由于结构简单,适用性强,容

易采用计算机模拟, 一经提出便得到了迅速发展, 70年代到80年代, 国内外水文专家针对不同流域的特点研制了一些著名的水文预报模型, 如美国的斯坦福(STANFORD)模型和萨克拉门托(SACRAMENTO)模型、日本的水箱(TANK)模型以及中国的新安江模型和大伙房模型, 大部分模型迄今仍在许多流域应用。80年代后期, 全世界范围内流域水文模型的发展处于缓慢阶段, 许多研究只是在原有模型的基础上做适当改进。90年代, 随着3S技术的出现, 流域水文模型已从集总式扩展到分布式。基于GIS和DEM对流域下垫面状况的描述, 分布式流域水文物理模型得到了熵与模糊集理论在洪水预报及水库调度中的应用研究广泛关注。

1.2.2 洪水实时预报调度及预报调度方式研究现状

气象水文预报理论及技术的发展, 使洪水预报预见期及预报精度都有了一定的提高, 为依据洪水预报信息的水库实时预报优化调度发展和水库防洪预报调度方式设计提供了前提。

1972年Janison和Wickson以预报洪水作为输入, 以发电量最大为目标, 用动态规划原理选择一次洪水调度最优方案。1983年S. A. Wasimi研究了“水库群实时预报调度”方法, 应用离散线性二次最优控制方法寻求水库系统的运行策略。同年YazigiIH等应用线性规划, 建立了一个水电系统汛期实时调度模型, 根据不断更新的洪水预报信息进行决策^[1]。2001年Faber等^[2]在获得稳定的径流预报基础上应用随机动态规划法求解水库优化调度决策。2002年Tilmant等^[3], 应用模糊集理论与随机动态规划法, 研究了多目标水库优化调度方案。2007年Hsu等^[4]研究了针对水库台风型洪水的实时优化调度模型, 该模型包括产流预报、汇流预报及最优规则制定三部分, 取得了满意的效果。

我国最早的应用是1983年虞锦江教授等提出的“水电站水库洪水优化控制模型”, 以预报洪水过程和概率可能洪水两部分为输入, 应用动态规划原理(DP), 以一次洪水发电量最大为目标选择最优调度方案。1985年王厥谋教授提出“丹江口水库防洪优化调度模型”, 采用线性规划(LP)法进行模拟调度和进行预报洪水实时调度, 最优控制汉江中、下游洪水。1990年王本德教授等^[5]提出一个多目标洪水模糊优选调度模型, 以面临时刻以前实测降雨预报的洪水过程和气象系统发布的未来24h短期分级模糊降雨预报形成的洪水过程为输入, 综合考虑发电量、弃水量、调洪最高水位、调洪末水位、下游组合流量、水库防洪分类预报调度方式研究及风险分析量等目标, 应用多目标模糊优选原理选择满意决策。2003年王兴菊等^[6]采用马尔可链弹性相关理论处理径流, 在满足用水保证率条件下以供水量最大为目标函数, 提综合利用水库多目标优化调度理论。2006年李玮等考虑短时气象降雨和洪水实时预息, 按预报信息种类和精度分阶段、分层次地判断洪水量级并作出合理调度决策, 2007年运用大系统分解协调理论及贝尔曼的逐步逼近思想, 提出了基于预报及库容补偿库群防洪补偿联合调度逐次渐进协调模型, 推求水库汛

期防洪库容动态控制方案^{[7][8]}。实践证明,利用实时洪水预报信息的优化调度方法有效增加了洪水资源的利用发挥了水库防洪兴利的综合效益。

依据降雨、洪水等预报信息制定水库防洪预报调度方式及其规则指导水库实时调度的研究始于20世纪80年代末至90年代初。1988年大伙房水库与大连理工大学联合研究用降雨二级分辨预报、洪水总量预报信息的预报调度方式”为运行多年、需要进行设计的水库做了新的尝试^[9]。在水库防洪预报调度方式研究基础上,2003年曹永强^[10]采用逐级调节滞后泄流定预报调度规则,提出了考虑“年内洪水统计特性时序变化规律”的汛限水位动态控制范围确定方法,并给出考虑径流预报误差的超过约束域值的风险率计算方法。2005年董四辉^[11]研究了一种根据地区洪水组成的防洪预报调度规则,以累积净雨为主要判别指标,根据累积净雨量判别洪水组成,针对不同洪水组成采用不同的级别泄量,充分保障上下游防洪安全的前提下,合理地抬高水库汛限水位。2006年周惠成等^[12]研究以累积净雨为判别洪水指标的预报调度方式及规则,采用防洪风险和蓄水效益综合评价体系,确定出相对合理的汛限水位控制值。同年出版的《水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用》^[9]第一次较系统的论述了水库汛限水位动态控制的理论与方法,对实施水库汛限水位动态控制的基本条件、应用防洪预报调度方式确定汛限水位动态控制上限值、实施水库防洪预报调度方式的风险计算等问题进行了详细的阐述。2008年王本德等^[13]在以往防洪分类调度方式研究的基础上,系统的论述了分类调度方式设计的必要性和可行性,基本理念、假定,并提出水库防洪分类调度方式设计可以实时调度提供多套调度规则,以应对不同类型天气系统的暴雨洪水,达到提高防洪能力和充分利用洪水资源的双重目的。

水库防洪预报调度方式已成为指导各大水库尤其是北方大型水库增加洪水资源利用率,发挥水库防洪兴利综合效益的重要依据,实践证明它比常规调度方式设计有较大改进。

1.3 本文选用确定数学权重方法

“熵”(entropy)一词源出自希腊语,表示变化的容量,在1856年由德国物理学家克劳修斯(K. Clausius)为了将热力学第二定律格式化而创立^[14]。这一举措为之后熵理论的蓬勃发展奠定了基础。热力学用熵表示一个物质系统中能量衰竭程度的量度。在系统处于某一状态时,熵具有确定值。当系统与外界无热量交换,即处于孤立状态时,任何变化不可能导致熵的总值减少,这就是热力学第二定律一著名的熵定理——熵增原理。它揭示了系统内部一切自发发生过程的方向是熵增加的方向。热力学熵的研究不仅推进了热机效率的研究,而且经过亥姆霍兹(H.Helmholtz)、麦克斯韦(J.C.Maxwell)、爱因斯坦(A.Einstein)和薛定谔(E.schroedinger)等科学家的努力,熵开始跨出热力学领域而进入理论化学、物理、生物学等研究领域^[15-18]。

20世纪30年代,熵理论冲破了平衡态的局限,推进到了非平衡态,此时系统熵的变化可分成两个部分:一部分是由体系和外界环境间的相互作用引起的;另一部分是由体系内部的不可逆过程产生的。这是熵理论发展史上的第二个阶段。

在熵概念引入近百年之后,1948年,信息论的创始人申农(C.E.Shannon)把通讯过程中信号源的信号不确定性称为信息熵,并给出了信息熵的计算公式^[19]。信息熵是物理学熵概念的泛化,它的引入不仅解决了信息的定量描述难题,而且为熵概念的进一步泛化奠定了基础。在信息论的带动下,熵概念又进入了概率论、通信和计算机领域。

20世纪后半叶,以电子计算机为代表的信息革命,推进了与信息密切相关的熵概念史无前例的大扩展。熵定律被伟大科学家爱因斯坦称为“整个科学的首要法则”。这一著名预言,现已逐在自然科学、社会科学及人体学等各领域里得到证实。人们称熵为新的世界观、真理,是现代文明观的科学基础。熵是一个既古老又年轻的概念,纵观熵的140年历史,熵与模糊集理论在洪水预报及水库调度中的应用研究从最初的热力学熵到现在的信息熵,迄今人们对它的不断探索证明了熵概念是一个非常复杂、含义丰富的综合体,尽管现在人们对熵概念较其产生时已经有了很通俗的了解,但其神秘色彩似乎并不比已认识的内容少。熵理论具有很大的发展前途,它在过去给人类带来了巨大的进步,同样也必将在未来给人类带来更大的利益,21世纪将是熵理论发展的又一座里程碑。

熵权法的基本思想是认为指标的差异程度越大越重要,则权重相应也越大。计算时如何实现各指标间熵值与熵权的转换是关键环节,其直接影响着各指标数学权重的正确性,进而关系着方案评价的合理性、防洪的安全性。已有的由熵值计算熵权的计算式^{[20][21]},当熵值处于一定区间时,其相互间的微小差别可能引起熵权成倍数变化,本文将通过引入熵权法确定各目标的数学权重,将其与经验权重线性组合,基于模糊优选模型进行多方案优选。

1.4 所选研究流域的现状

1.4.1 辽干流域概况

辽河发源于河北省七老图山脉的光头山,流经河北、内蒙古、吉林、辽宁四省区。在我省盘山县境内注入渤海,全长1390km,流域面积22.9万km²,辽河上游分东、西辽河,东辽河在吉林省境内已建有二龙山水库,控制了东辽河洪水。西辽河在内蒙古境内建成红山水库等多座水库,基本上控制了西辽河洪水。东、西辽河于我省福德店汇流后始称辽河,辽河自北向南,流经铁岭、沈阳、鞍山、盘锦等四个市的十一个县区,河道长497km,流域面积3.34万km²。有支流21条及较大排干2条。东侧较大的支流清河、柴河、凡河大部分在山区,河道坡度陡,多发暴雨,是辽河干流洪水的主要产区。目前在东侧这三条支流上,已相继修建有清河、柴河、南城子、榛子岭四座大型水库,控制

面积为 4725 km²。在西侧支流柳河上修建有闹德海水库，控制面积为 4051 km²，以上七座水库的总库容为 65.4 亿 m³，对调节辽河干流洪水起到了很大作用，特别是暴雨主要来源的左侧支流上的四大水库对辽河干流的调节作用是巨大的。

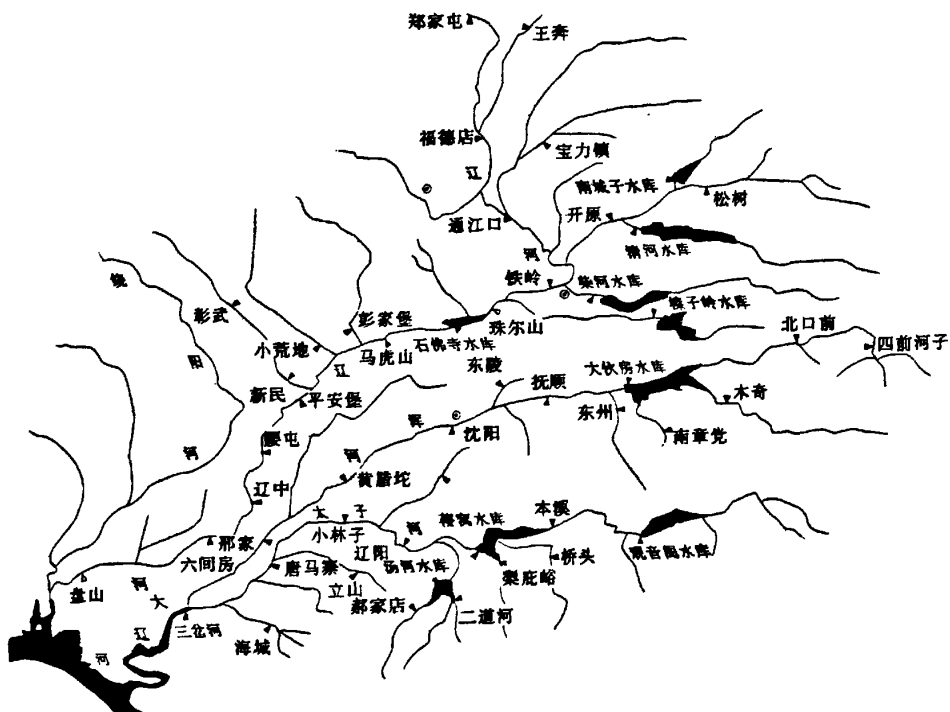


图 1.1 辽河流域图

Fig. 1.1 Drainage areas of Liaohe

1.4.2 清河流域概况

清河流域内早在 50 年代末 60 年代初兴建了清河和南城子两座大型水库，清河水库位于辽河左岸支流清河偏下游处，座落在铁岭市清河区境内，是一座以防洪、灌溉、工业供水为主，兼顾养鱼、旅游等综合利用的大型水库，控制流域面积 2376 km²，坝址距开原市 11km，水库坝址以上的河长 60km 左右。

南城子水库位于开原市威远镇南城子村，建于寇河支流叶赫河上，是一座以防洪为主兼灌溉养鱼等综合利用的大 II 型水库，控制流域面积为 625 km²。

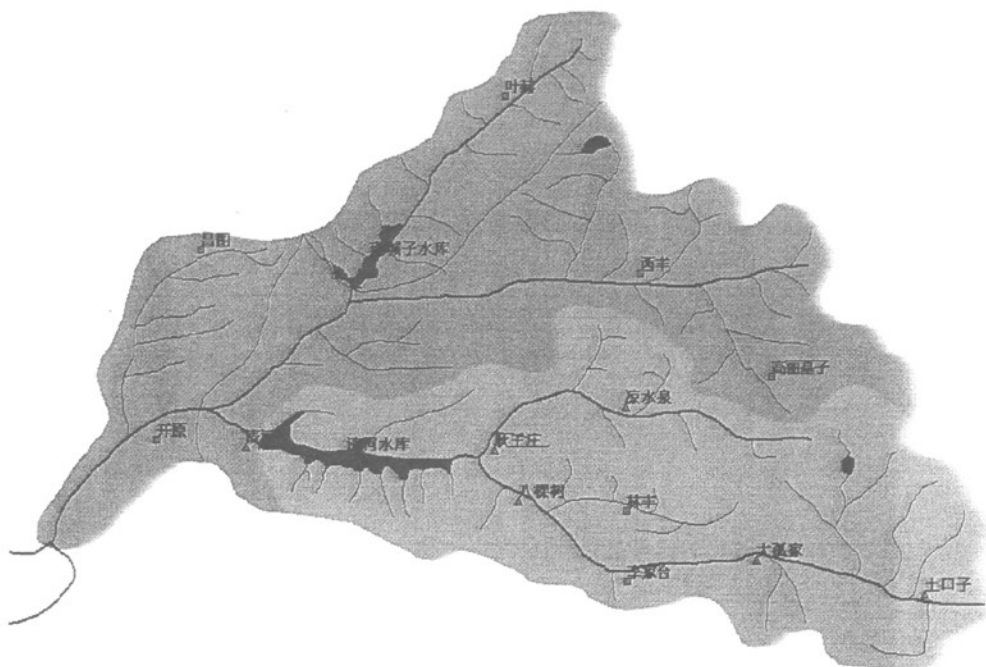


图 1.2 清河水库流域图

Fig. 1.2 Drainage areas of Qinghe Water Reservoir

(1) 自然地理特性

清河发源于辽宁省清源县吉林哈达岭庆岭南山，为辽河干流左侧一较大支流。清河流域位于东经 $120^{\circ} 40' \sim 125^{\circ} 13'$ ，北纬 $42^{\circ} 1' \sim 43^{\circ} 6'$ ，流经清源县、开原县，在开原县清辽村附近汇入辽河干流。在清河下游的开原县老城镇附近有较大支流寇河汇入。清河总长 177.1km，流域面积 5253 km^2 ，该面积系开原县境内的马仲河改道后的面积，原面积为 4846 km^2 。清河流域上游为山岳地带，平均山岭海拔高程在 300~500m，由于滥砍乱伐，原始森林已遭破坏，目前流域内多为人造经济林，森林覆盖率仅有 49.1%，山坡斜地大部分已开为耕地，农作物多为玉米，大小河流两旁以开垦水田居多，水土保持能力较低。虽然近些年随着国家“退耕还林”及一些其它的水土保持措施的实施，水土保持状况已有所好转，但暴雨径流系数仍然较大。清河水库坝址以上流域山地约占 87~90%，坝址以下为开阔的平原区。

(2) 水文气象特征

本地区主要降雨多集中在汛期 6~9 月份，占全年降雨的 73%左右。造成本地区暴雨的天气系统主要是高空槽、低压冷锋、华北气旋和台风或几个天气系统连续出现，以华北气旋影响次数居多。

清河流域多年平均径流量 11.25 亿 m^3 ，坝址以上流域多年平均径流量为 6.74 亿 m^3 ，

年径流系数 0.303, 变差系数为 0.55。

清河流域多年平均降水量为 748.3mm, 坝址以上流域多年平均降水量为 722.4mm, 年最大值 1093.3mm, 年最小值为 503.1mm。大暴雨主要集中在 7、8 月份, 此间降雨约占全年降水量的 47.4%。

1.4.3 柴河、凡河流域概况

柴河是辽河中游左侧一个较大支流, 发源于清原县北乐山岔的天桥岭, 自东向西流, 流经清原、开原两县后于铁岭市龙山乡汇入辽河, 全长为 143km, 集水面积 1501 km²。柴河水库位于柴河下游铁岭县境内, 距铁岭市城东 12km, 始建于 1972 年 10 月, 1980 年竣工, 是一座以防洪、灌溉为主, 结合发电、养鱼等综合性大型水利枢纽工程。多年平均降水量 796mm, 7、8 月份降雨占全年总降水量的 48%, 多年平均径流量是 3.46 亿 m³, 年径流系数 0.321, 变差系数 0.56, 河道比降为 1.5‰。

榛子岭水库位于铁岭县鸡冠山乡榛子岭村, 是辽河主要支流凡河上游的一座大 II 型水库, 水库控制面积 369 km², 占凡河流域面积的 37%, 坝址以上河道长 40.7km, 比降为 5.9‰。多年平均径流量 3.72 亿 m³。

2 清河水库原设计水库防洪调度方式及特征值

2.1 原设计水库防洪调度方式

清河水库主体工程是按千年一遇的洪水设计，万年一遇的洪水校核，设计的洪水水位为 135.30m，校核洪水水位为 137.40m，搬迁标准五十年一遇，搬迁水位 134.80m，淹没标准二十年一遇，淹没水位 134.60m，经水库调洪错峰，可使清河全区五十年一遇洪水、辽干全区二十年一遇洪水基本免灾，并确保长大线清河铁路桥百年洪水正常通车。水库原按照不考虑预报的常规调度方式设计的，以水位或洪峰作为改变泄流的依据。

主汛期水库的防洪常规调度方式，是以库水位作为规则指标：

- 1) 水位 127.00m~129.80m，只开输水道放 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ；
- 2) 水位 129.80m~134.50m，全部关闸错峰；
- 3) 水位 134.50m 以上输水道全开，溢洪道先开 2 孔，12 小时后再开 2 孔，再过 12 小时 6 孔全部开启。
- 4) 入库洪峰大于千年洪峰，全开溢洪道和输水道运行。

2.2 漫坝风险分析设计成果

由于清河流域水资源的贫乏和年径流的极其不均性、连续枯水年份频繁发生，水库的供水形势极度紧张，即使采用分期抬高汛限水位的运用方式，水库的蓄满机率也仅有 33%，为解决防洪与兴利、供需之间的矛盾，增加清河水库的兴利蓄水量，缓解辽河流域工农业供水的紧张局面，提高其兴利效益，开展了旨在提高清河水库主汛期防洪限制水位进而提高水库兴利效益的水库漫坝风险分析的研究。

通过对洪水与风浪联合作用下的漫坝风险分析的研究，提出在新的调度方式下，清河水库汛限水位由原设计的 127.00m 抬高到 129.00m，其水库发生漫坝的风险在百万分之一的数量级以上，可靠度达到 99.999% 以上。由于汛限水位的提高，有关的原设计特征也相应发生变化。

修改的主汛期水库防洪常规调度方式，仍以库水位作为规则指标：

- 1) 主汛期汛限水位 129.00m；
- 2) 水位 129.00m~131.60m：当入流小于 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，令出流等于入流；当入流大于等于 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，令出流为 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ；
- 3) 水位 131.60m~133.90m：输水道限泄量 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ，溢洪道开 2 孔；
- 4) 水位 133.90m~134.40m：输水道限泄量 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ，溢洪道开启 4 孔；
- 5) 水位 134.40m 以上：输水道限泄量 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ，溢洪道 6 孔全开；

6) 遇千年洪峰：溢洪道 6 孔全开。

3 水库及区间洪水预报方案

3.1 入库洪水预报方案

3.1.1 清河水库坝址以上流域实用洪水预报方案

清河水库产流预报主要采用两种模型，一是蓄满产流模型，二是由大伙房水库管理局提出的“DHF”产流模型。经过检验两种产流模型的预报精度都在 85%以上，属甲级方案。

(1) 资料情况

降雨和流量资料均采用 1952 年—1995 年系列，建库前的流量资料采用东石人沟水文站资料，建库后，采用水量平衡法反推入库流量。

(2) 流域平均降雨量及径流深计算

流域内设 6 个雨量站，清河站处于流域下游，八棵树、耿王庄处于中下游，凉水泉处于中游，大孤家、土口子站位于上游。当流域降雨比较均匀时，采用算术平均法计算，流域降雨不均匀时，采用加权平均法计算，各雨量站权重见表(3.1)。入库洪水过程割去前期退水过程，以时段流量累积计算径流量，或用求积仪计算，各月蒸发能力 E_m 按表(3.2)取值，无雨日指全天无降雨，全雨日指 8~20 时中有 6 小时降雨，晴雨日为无雨日与全雨日之间。

表 3.1 清河水库流域各雨量站权重表

Tab.3.1 The weight of each rainfall stations at Qinghe reservoir valley

雨量站	清河	八棵树	耿王庄	凉水泉	大孤家	土口子
权重	0.1	0.13	0.12	0.2	0.23	0.22

表 3.2 清河水库流域日蒸发能力 E_m 表

Tab.3.2 Evaporative capacity of E_m at Qinghe reservoir valley

月份	5	6	7	8	9
无雨日	5.0	5.0	4.0	4.0	4.0
晴雨日	4.0	4.0	3.0	3.0	3.0
全雨日	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

(3) 蓄满产流模型预报方案

六十年代初，由华北水利学院水文系应用填洼理论，并分析我国湿润地区的损失特性，说明符合流域蓄水曲线的条件，提出了蓄满产流的计算方法（简称蓄满产流法）及

其区域规律。而后，辽宁省水文总站应用于辽宁东部地区，并采用双层计算流域蓄水量和分层扣损的降雨径流关系图。本流域于 1975 年开始引进该模型，经过多次洪水检验，结果较好。

① 产流预报

流域蓄水量采用双层扣损法计算，从 5 月 1 日起算，

$$W_{0_{上,1}}=0 \quad W_{0_{下,1}}=50\text{mm} \quad W_{m_{上}}=45\text{mm} \quad W_{m_{下}}=85\text{mm}; \quad W_m=W_{m_{上}}+W_{m_{下}}=130\text{mm}$$

流域蓄水量计算公式如下：

当 $P_t + W_{0_{上,t}} \geq E_{m,t}$ 时

$$E_{上,t} = E_{m,t}; \quad W_{0_{上,t+1}} = W_{0_{上,t}} + P_t - E_{上,t} - R_t; \quad W_{0_{下,t+1}} = W_{0_{下,t}} \quad (3.1)$$

当 $W_{0_{上,t+1}} > W_{m_{上}}$ 时

$$W_{0_{下,t+1}} = W_{0_{下,t}} + W_{0_{上,t+1}} - W_{m_{上}} \quad (3.2)$$

当 $P_t + W_{0_{上,t}} < E_{m,t}$ 时

$$E_{上,t} = P_t + W_{0_{上,t}}; \quad E_{下,t} = (E_{m,t} - E_{上,t}) W_{0_{下,t}} / W_{m_{下}}; \quad W_{0_{上,t+1}} = 0;$$

$$W_{0_{下,t+1}} = W_{下,t} - E_{下,t}; \quad W_{0,t+1} = W_{0_{下,t+1}} + W_{0_{上,t+1}} \quad (3.3)$$

式中： P_t —— t 日降雨量；

$W_{0_{上,t}}$ 、 $W_{0_{上,t+1}}$ 、 $W_{0_{下,t}}$ 、 $W_{0_{下,t+1}}$ ——分别为 t 、 $(t+1)$ 日上、下层流域蓄水量；

$W_{0,t+1}$ —— $(t+1)$ 日流域蓄水量；

R_t —— P_t 所产生径流量；

$E_{m,t}$ —— t 日的蒸散发能力；

$E_{上,t}$ 、 $E_{下,t}$ ——分别为 t 日上、下层蒸发量。

② 降雨径流相关图和径流深预报方案的评定

采用 69 场洪水检验方案的预报精度，径流深计算公式：

$$R = P' - (W_{m_{下}} - W_{0_{下}}) (1 - e^{-\alpha P'}) \quad (3.4)$$

其中： $P' = P + W_{0_{上}} - W_{m_{上}} - E$

式中: R ——径流深;

$W_{0上}$ 、 $W_{0下}$ ——分别为降雨起始日上、下层的流域蓄水量;

P ——流域平均降雨量;

E ——雨期蒸发量;

α ——流域参数, $\alpha = 1 / W_{m下} = 0.012$ 。

依以上公式计算绘制 $(P + W_{0上} - E) \sim W_{0下} \sim R$ 相关图, 经过 69 场洪水的检验, 合格 60 场, 不合格 6 场, 合格率 87.0%。

③ 汇流预报

一是根据典型的雨洪资料分析出 6 条经验单位线, 计算时段 3 小时, 并按影响天气、降雨强度、降雨中心位置等因素进行分类, 二是按净雨强度分类的时段单位线法。实践证明, 采用后者方法做汇流预报效果较好。

(4) “DHF” 产流模型预报方案

① 产流预报

“DHF” 产流模型由大伙房水库管理局于 1973 年提出的, 清河东南与浑河流域相邻, 自然地理水文气象特征基本相似。1990 年本流域开始引用该模型, 经过参数优选, 方案检验, 合格率达到 84.1%, 通过 1991、1994、1995 年洪水的实际检验, 结果令人满意。

“DHF” 产流模型是八参数超渗产流模型, 引用双层入渗曲线进行扣损, 并以抛物线描述上层蓄水量和双层下渗率分布状况, 模型的参数多半以物理意义为前提确定的, 只有少数几个参数需要优化技术选定, 如蒸发能力、下渗消退系数、表层蓄水容量分配特性系数、线性分配系数、表层蓄水容量的日增量、下层蓄水容量的日增量。产流模型将下垫面分表层、下层和地下水存蓄三部分。

产流计算公式如下:

$$P_E = P - E_D; E_D = K_C \times E_R / C; P_C = P_E - Y_0; Y_0 = g \times P_E \quad (3.5)$$

$$R = P_C - (S_0 - S_a); S_{a(t+1)} = S_0 \times [1 - (1 - S_m + P_C) / (a + S_0)^a] \quad (3.6)$$

$$S_m = a \times S_0 \times [1 - (1 - S_a / S_0)^{1/a}]; \quad (3.7)$$

$$R_C = R - Y_u \quad (3.8)$$

$$Y_u = R - Z_1 \times D_0 \times (1 - U_a / U_0)^{(U_0 / D_0)} + Z_1 \times D_0 \times (1 - (Z_1 \times D_n + R) / (Z_1 \times B \times D_0))^B \quad (3.9)$$

$$U_{a(t+1)} = U_a + Z_2 + (U_0 - U_a) - Z_2 \times D_0 \times (1 - (Z_2 \times U_m + R_t) / (Z_2 \times B \times U_0))^B \quad (3.10)$$

$$D_n = B \times U_0 \times \left(1 - (1 - U_a / U_0)^{(U_0 / B \times D_0)}\right) \quad (3.10)$$

$$U_n = B \times U_0 \times \left(1 - (1 - U_a / U_0)^{(1/B)}\right) \quad (3.11)$$

$$Z_1 = 1 - e^{-(K_2 \times U_0 / D_0) \times \Delta t} \quad (3.12)$$

$$Z_2 = 1 - e^{-(K_2 \times \Delta t)} \quad (3.13)$$

$$D_0 = U_0 + U_n \quad (3.14)$$

$$R_L = R_C - (U - U_a) \quad (3.15)$$

$$Y_L = K_p \times R_L \quad (3.16)$$

- 式中： P——流域平均时段 (Δt) 降雨量；
 K_c ——流域蒸散发能力与大水体蒸发量 (E_b) 之比；
 C——日降雨观测的时段数；
 P_E ——净雨强；
 P_C ——净渗雨强；
 g——不透水面积与全流域面积之比值；
 k——下渗强度；
 f——流域平均总下渗率；
 a——表层蓄水容量分配曲线线性指数；
 B——时段平均下渗率流域分配曲线形状系数；
 K_2 ——下层下渗曲线曲率系数；
 S_a 、 S_0 ——表层存储及蓄水容量；
 U_a 、 U_0 ——下层存储及蓄水容量；
 Y_0 ——直接径流；
 Y_v ——地面壤中流；
 Y_L ——地下径流。

② “DHF” 产流模型参数优选

本次需要优选的参数有 9 个，各月蒸发能力 E_6 、 E_7 、 E_8 、 E_9 ，下渗消退系数 K_1 ，表层蓄水容量分配特性系数 A，线性分配系数 B，表层蓄水容量的日增量 D_{00} ，下层蓄水容量的日增量 D_{000} 。优选后的产流模型参数列于表 (3.3)。

表 3.3 清河水库“DHF”产流模型参数优选结果

Tab.3.3 Qinghe reservoir “DHF” model parameter optimal result					
E_6	E_7	E_8	E_9	K_1	A
2.1	2.9	4.2	4.1	0.34	3.76
S_0	D_{90}	S_{max}	U_{90}	D_{90}	B
30	0.23978	45	70	0.21068	1.81

优选后的参数对历史 44 次降雨产流的模拟结果:

- 1) 合格次数为 37 次;
- 2) 按次评定的预报合格率为 37/44=84.1%;
- 3) 按总量评定的预报精度 91.4%;
- 4) 预报的平均绝对误差为 4mm;
- 5) 评定要素有效性的确定系数为 98.5%;

③ 汇流预报

本次共模拟历史上 19 场洪水, 大于 500 m³/s 的洪水洪峰合格率为 78% (7/9)。全部洪水洪峰合格率为 78.5% (15/19)。

3.1.2 南城子、柴河水库入库洪水预报方案

(一)、南城子水库洪水预报方案

(1) 降雨量、入库流量均采用 1964~1990 年系列, 降雨资料摘自水文年鉴, 入库流量用水量平衡法计算。

(2) 流域平均降雨量采用南城子、东屯、叶赫三站加权平均法计算, 其权重分别为 0.22、0.38、0.40。

(3) 径流深计算采用次洪割去基流和前期退水过程用流量累积计算法计算。

(4) 流域蓄水量计算采用单层蒸发模型计算, 公式如下:

$$W_{0,t+1} = W_{0,t} + P_t - R_t - E_t \quad (3.17)$$

$$E_t = (W_{0,t} / W_m) E_{m,t} \quad (3.18)$$

式中: $W_{0,t+1}$ ——t+1 日流域蓄水量;

$W_{0,t}$ ——t 日流域蓄水量;

P_t ——t 日流域平均降雨量;

R_t —— P_t 所产生的径流量;

E_t ——t 日蒸发量;

W_m ——流域蓄水容量, 取 145mm;

流域蓄水量从 5 月 1 日起算, $W_{05.1}=0$

(6) 降雨径流相关图和径流深方案的评定

根据 1964~1990 年 28 次具有代表性的降雨洪水资料绘制 (P-E)~W~R 相关图。根据公式对历史 28 次降雨产流进行模拟计算, 26 次合格, 仅有两次不合格。方案合格率为 92.9%。

(7) 汇流计算采用经验单位线法, 分析 3 场典型洪水过程的单位线, 供以后作业预报时选用。

(二)、柴河水库洪水预报方案

(1) 降雨、流量资料均采用 1953~1987 年系列。其中 1981 年以后入库流量资料采用水量平衡法反推求得。

(2) 流域平均降雨量采用柴河堡、下肥地、黄旗寨、小孤家子、猴石五站的算术平均值。

(3) 径流深计算为入库洪水过程割去基流和前期退水过程, 用累积法计算。

(4) 流域蓄水量计算采用蓄满产流模型, 流域蓄水量用双层扣损法计算, 从 5 月 1 日起算,

$$W_{0上.1}=0, W_{0下.1}=60\text{mm}, W_{m上}=40\text{mm}, W_{m下}=110\text{mm}, \\ W_m = W_{m上} + W_{m下} = 150\text{mm}。$$

流域蓄水量计算公式如下:

① 当 $P_t + W_{0上.t} \geq E_{m.t}$ 时

$$E_{上.t} = E_{m.t}; W_{0上,t+1} = W_{0上.t} + P_t - E_{上.t} - R_t; W_{0下,t+1} = W_{0下.t} \quad (3.19)$$

当 $W_{0上,t+1} > W_{m上}$ 时

$$W_{0下,t+1} = W_{0下.t} + W_{0上,t+1} - W_{m上} \quad (3.20)$$

$$W_{0上,t+1} = W_{m上} \quad (3.21)$$

② 当 $P_t + W_{0上.t} < E_{m.t}$ 时

$$E_{上.t} = P_t + W_{0上.t}; E_{下.t} = (E_{m.t} - E_{上.t})W_{0下.t}/W_{m下}; W_{0上,t+1} = 0; \quad (3.22)$$

$$W_{0下,t+1} = W_{0下.t} - E_{下.t}; W_{0,t+1} = W_{0下,t+1} + W_{0上,t+1} \quad (3.23)$$

式中： P_t —— t 日降雨量；

$W_{0,t}, W_{0,t+1}, W_{0,t}, W_{0,t+1}$ ——分别为 t 、 $(t+1)$ 日上、下层流域蓄水量；

$W_{0,t+1}$ —— $(t+1)$ 日流域蓄水量；

R_t —— P_t 所产生径流量；

$E_{m,t}$ —— t 日的蒸散发能力；

$E_{t,t}, E_{t,t}$ ——分别为 t 日上、下层蒸发量。

(5) 降雨径流相关图及方案评定

根据 1953 年~1987 年 67 次具有代表性的各种洪水资料点绘制 (P-E)~ W_0 ~R 相关图。经过 67 次降雨过程的检验，合格 60 次，则径流深方案合格率为 89.6%。

(6) 汇流计算

汇流采用经验单位线法计算，由历史上代表性较好的 6 次雨洪资料，分析出 6 条单位线，同时附上形成洪水的降雨特征及土壤含水量情况，供作业预报时参考选用。

3.2 区间洪水预报方案

本系统有两个子系统组成，第一子系统区间称清·南~开区间，第二子系统区间称福~铁区间。开原防护点组成流量由清·南~开区间洪水，清、南水库放水流量形成；铁岭防护点的组成流量由福~铁区间洪水，清、南、柴水库泄量形成。

3.2.1 清·南~开区间洪水预报方案

清·南~开区间控制站为开原站，开原站建于 1934 年，控制流域面积 5253 km²，扣除清河水库、南城子水库控制面积，实际控制区间面积 1667 km²。

(1) 清·南~开区间产流预报

清·南~开区间产流预报选用两种模型，一是降雨径流相关模型，二是“DHF”产流模型。

① 降雨径流相关模型

1) 资料情况

雨量、流量资料均采用 1958~1988 年 36 年水文年鉴资料。

2) 降雨径流相关图的编制

区间平均降雨量取高丽墓子、凉水泉子、西丰、松树、南城子、清河和开原 7 站雨量的自述平均法，或用开原、南城子、西丰和高丽墓子 4 站的权重法计算，这 4 站的权

重分别为 0.1、0.28、0.38、0.24。径流深计算，次洪分割采用退水曲线，清河水库和南城子水库的出流过程分别错开一个传播时间后，不考虑洪水波的展开，从开原站次过程中减去，得到区间洪水过程，采用时段流量累积法计算径流深。流域蓄水量采用单层扣损法计算。

当 $W_{0,t} + P_t \geq 130\text{mm}$ 时，

$$W_{0,t+1} = W_{0,t} + P_t - R_t - E_t \quad (3.24)$$

当 $W_{0,t} + P_t < 130\text{mm}$ 时，

$$W_{0,t+1} = K_t (W_{0,t} + P_t - R_t) \quad (3.25)$$

式中： $W_{0,t+1}$ ， $W_{0,t}$ —— $t+1$ 日及 t 日的流域蓄水量；

P_t —— t 日的区间平均降雨量；

R_t —— t 日降雨产生的径流深，5、6 月份不减此值，7~9 月份，当 $R_t \leq 10\text{mm}$ 时，也不减，当 $R_t > 10\text{mm}$ 时才在计算 W_0 时减此值。

K_t ——消退系数，根据当日蒸发能力，用式 $K_t = 1 - E_t / W_0$ 计算。

上述计算数值以流域蓄水容量 $W_s = 150\text{mm}$ 为限值。

E_t —— t 日的蒸发量，按流域蒸发能力取值。

日蒸发量计算，原方案中取西丰、开原两站实测值的平均值，实际应用时，为方便起见，可移用清河水库各月蒸发能力的数值。

$W_{0,t}$ 值从 5 月 1 日起算， $W_{0,5,1} = 0$ 。

绘制 $(P+W_0-E) \sim R$ 降雨径流相关图。

用该模型对历史 86 次降雨进行了模拟预报，合格 74 次，方案合格率 86%。

② “DHF” 产流模型

“DHF” 产流模型用于本流域时进行了部分修改。区间产流参数一共有 10 个，它们是：

K_2 ——霍顿曲线消退系数与时段 Δt 之积；

A ——表层蓄水容量分配曲线指数；

B ——下层蓄水容量分配曲线指数；

S_1 ——6 月份土壤上层蓄水容量；

D_s —— S_1 随月份变化的增量；

U_i ——6月份土壤下层蓄水容量；

D_i —— U_i 随月份变化的增量；

K_i ——不透水面积占全流域面积之比；

K_o ——优选目标合格率权重；

K_y ——优选目标确定性系数的权重；

考虑人类活动对于旱年份的影响较大，为此，我们对于早年的产流计算实行人工修正。

通过对1963~1985年间的40次洪水进行产流拟定合，得到优选产流参数。

优选目标值

$$OP = \text{MAX} (KW \times TB + KY \times YY) = 0.837$$

拟合合格率 $TB = 82.5\%$

确定性系数 $YY = 0.9427$

平均精度 $CR = 87.2\%$ 平均绝对误差 $TX = 4.5\text{mm}$

根据水文情报预报规范SD138-85，方案属乙级方案，可用于作业预报。

(2) 清·南~开区间汇流预报

清·南~开区间汇流计算采用单位线法，辽宁省水文总站铁岭市水文勘测大队分析出了6条单位线，并按形成洪水的降雨特征进行了分类，预报时采用经验法选择单位线。

大连理工大学采用试错法共计分析出11条单位线。这些单位线具有一定的代表性，单位线选用方法有两种，一是人工经验方法选择，二是模糊识别方法选择，对已发生的20次洪水进行预报检验，其中前10次大洪水的合格率为80%，总合格率75%，属乙级方案。

清河、南城子水库的出流过程，分别错后一个时段和二个时段传播时间，不考虑洪水波的展开，做为演算至开原站的洪水过程。将预报的区间洪水过程，清河、南城子站演算至开原的洪水过程以及开原站前次洪水的退水过程，进行迭加，即得到预报的开原站洪水过程。

3.2.2 福~铁区间洪水预报方案

福德店至铁岭站区间河道长143km，区间面积15839 km²，福德店至通江口区间面积5253 km²。通江口至铁岭区间面积8587 km²。福~铁区间已相继建成三座大型水库。四座中型水库和十八座小型水库，总控制流域面积5295 km²，占区间总面积的58%。扣除水库控制面积后，福~铁区间余下面积为8544 km²。

① 福·清·柴·南~铁区间产流预报方案

1) 资料情况

雨量、流量资料均采用1953~1989年37年水文年鉴资料。

2) 福~铁区间产流预报方案

福~铁区间产流预报采用指数型双层产流模型。铁岭站的洪水由三部分组成，一是干流上游福德店来水，二是支流上清河、柴河、南城子水库放流来水，三是福德店及清河、柴河、南城子水库至铁岭区间产流来水。区间平均雨量采用加权平均法计算，流域蓄水量分上、下两层计算，公式如下：

当 $P_t + W_{o_{上,t}} \geq E_{m,t}$ 时，

$$E_{上,t} = E_{m,t}; W_{o_{上,t+1}} = W_{o_{上,t}} + P_t - E_{上,t} - R_t; W_{o_{下,t+1}} = W_{o_{下,t}} \quad (3.26)$$

当 $W_{o_{上,t+1}} > W_{m上}$ 时，

$$W_{o_{下,t+1}} = W_{o_{下,t}} + W_{o_{上,t+1}} - W_{m上}; W_{o_{上,t+1}} = W_{m上} \quad (3.27)$$

当 $P_t + W_{o_{上,t}} < E_{m,t}$ 时，

$$E_{上,t} = P_t + W_{o_{上,t}}; E_{下,t} = (E_{m,t} - E_{上,t}) W_{o_{下,t}} / W_{m下}; \quad (3.28)$$

$$W_{o_{上,t+1}} = 0; W_{o_{下,t+1}} = W_{o_{下,t}} - E_{下,t}; W_{o_{上,t+1}} = W_{o_{上,t+1}} + W_{o_{下,t+1}}$$

式中： P_t ——t 日降雨量；

$W_{o_{上,t}}$ 、 $W_{o_{上,t+1}}$ 、 $W_{o_{下,t}}$ 、 $W_{o_{下,t+1}}$ ——分别为 t、(t+1) 日上、下层流域蓄水量；

$W_{o_{上,t+1}}$ ——(t+1) 日流域蓄水量；

R_t —— P_t 所产生径流量；

$E_{m,t}$ ——t 日的蒸散发能力；

$E_{上,t}$ 、 $E_{下,t}$ ——分别为 t 日上、下层蒸发量；

$W_{m上}$ 、 $W_{m下}$ ——分别上、下层蓄水容量。

流域蓄水量自 5 月 1 日起算，起始值： $W_{o_{上5.1}} = 0$ ， $W_{o_{下5.1}} = 40\text{mm}$ 。

指数型产流模型径流深计算公式如下：

$$R = P' - (W_{m下} - W_{o_{下}}) (1 - e^{-aP'}) \quad (3.29)$$

$$P' = P + W_{o_{上}} - W_{m上} - E$$

式中： R ——径流深；

$W_{m上}$ 、 $W_{m下}$ ——分别为上、下层蓄水容量；

$W_{o_{上}}$ 、 $W_{o_{下}}$ ——分别为降雨起始日上、下层的流域蓄水量；

P ——流域平均降雨量；

E ——雨期蒸发量，按蒸发能力取值；

a ——流域参数， $a = 1 / W_{m下} = 0.087$ 。

经优选确立上层蓄水容量 $W_{m上} = 50\text{mm}$ ，下层蓄水容量 $W_{m下} = 115\text{mm}$ ，流域蓄水容量 $W_m = W_{m上} + W_{m下} = 165\text{mm}$ ，日蒸发能力按表取用，无雨日指全日无雨，全雨日指 8~20 时中有 6 小时降雨，晴雨日介于无雨日与全雨日之间。

局部产流时径流深计算方法是：对区间内每一雨量站用不产流判别式 $(P_t + W_{o_{上}} - E) < W_{m上}$ 判别，符合判别式的雨量站所控制的面积都不产流，否则产流。产流区的产流计

算的方法，查 $(P_i + W_{0.上} - E) \sim W_{0.上} \sim R$ 相关图。式中 P_i 为每个雨量站的雨量。

通过对历史 38 次洪水模拟计算，合格 35 次，方案合格率 92.1%。

②福~铁区间汇流预报方案

1) 区间单位线计算公式：

$$U_n = \Delta\tau / K \sum_{r=1}^r e^{-(n-r)\Delta\tau / R \times \omega(\tau)r} \quad (3.30)$$

式中： U_n ——时段单位线纵标的百分数；

$\Delta\tau$ ——时段长(h)；

K ——调蓄因素(h)；

r ——面积分配曲线的块数；

n —— $n=t / \Delta\tau$ 为单位线在时刻 t 的时段数；

$\omega(\tau)r$ ——面积分配曲线的纵坐标 (%)；

r ——当 $n \leq t / \Delta\tau$ 时， $r=n$ ；当 $n > t / \Delta\tau$ 时， $r=r$ 。

2) 全面产流时，区间洪水过程预报步骤

按判别式 $(P_i + W_{0.上} - E) > W_{m.上}$ (产流) 判别流域为全面产流，还是部分产流，计算时段降雨及径流深。根据径流深 R 值与降雨分布情况，从 $R \sim K(h)$ 关系上查得调蓄因素 $K(h)$ 。确定汇流历时 τ 及面积分配曲线的块数 r ，一般当降雨均匀或降雨量主要集中于上游时，汇流历时 $\tau=36(h)$ ， r 取 6；主要降雨集中于寇河以南时，汇流历时 $\tau=24 \sim 30(h)$ ，取 $r=4 \sim 6$ 。根据汇流历时确定 $\Delta\tau$ ， $\Delta\tau$ 可取 6~9(h)。从面积分配曲线表上，查得各段面积分配系数 $\omega(\tau)i$ ，按单位线公式计算各时段单位线纵标 U_n ；单位线纵标乘以各时段径流量（由径流深换算得），按时间迭加，即为预报的区间洪水过程。福~铁区间全面产流情况下共计 7 条单位， $\Delta\tau=6(h)$ 。

3) 局部产流时，区间洪水过程预报步骤

由 $(P_i + W_{0.上} - E) < W_{m.上}$ (不产流)，判别不产流的测站（或地区）；计算产流区的时段降雨量与径流深。根据径流深 R 与降雨分布情况从 $R \sim K(h)$ 图查得调蓄因素值 $K(h)$ ；根据降雨分布情况先确定一个汇流历时 τ 与面积分配曲线块数 r （同全面产流情况），汇流历时 τ 减去不产流历时 $\tau' = (\tau / r) \cdot r$ 即为本次局部产流的汇流历时 τ ，时段长 $\Delta t = \tau / r$ （取整数）；从面积分配曲线上，查得各 $\omega(\tau)i$ 值。不产流的块上面积分配系数 $\omega(\tau)i$ 应等于 0。

4) 福德店站及清河、柴河、南城子水库至铁岭站洪水演算

确定 Δt （本次取 $\Delta t=6h$ ），摘取福德店站、清河水库站、柴河水库站、南城子站的洪水过程。各站至铁岭站的洪水传播时间如下：福德店至铁岭站 $\tau_{\text{全}}=48h$ ，清河水库站至铁岭站 $\tau_{\text{全}}=15h$ ，柴河水库至铁岭站 $\tau_{\text{全}}=3h$ ，南城子水库至铁岭站 $\tau_{\text{全}}=23h$ ，按公式 $n = \tau_{\text{全}} / \Delta t$ 计算各时段数 n ，查汇流曲线表，计算出各站至铁岭站的汇流曲线，按

汇流曲线将各站洪水过程演算至铁岭站。

5) 铁岭站洪水过程预报

将福德店流量过程、各水库出流过程演算到铁岭站，然后与预报的区间洪水过程进行迭加，即得铁岭站的洪水预报过程。

4 可行防洪预报调度方式拟定

4.1 判别指标的选择及可行性分析

辽干防洪调度系统有两个子系统组成，第一子系统为清·南~开区间，第二个子系统为四库~石区间，清、南、柴、榛子岭水库共同承担下游防洪任务。担负辽干主要防洪任务的清河、柴河水库及清·南~开区间的产流预报方案均采用改进的“DHF”模型和指数蓄水容量曲线模型，福~铁区间产流预报采用双层蒸发计算的蓄满产流模型，汇流模型全部采用模式识别经验单位线法，各洪水预报方案达到甲级水平，合格率达到85%以上。

水情预报传递手段有了突飞猛进的发展，清河水库水情自动化预报系统工程于1989年建成并投入运行，改变了以往传统的水文情报测报方式，系统由中心站、中继站、自动遥测站组成，采用简单、可靠、功率小的自报式体制，通信组网选用具有畅通率高、误码率小、抗干扰性能强、静态功率小、易于在山区使用和维护的超短波频段。中心站实时接收、定时打印雨量、水位、流量等水文信息，据此进行短期洪水预报及防洪调度与决策。为提高信息传输质量，数据信号采用频移键控FSK的调制方式，并采用差错控制技术降低系统误码率，经过7个汛期的运行，特别是经历了91、94年暴雨洪水、95年特大暴雨洪水的检验，系统运行稳定、可靠，自动监测预报与人工观测相对误差小于5%，见表(4.1)。

表 4.1 自动测报与人工测报降雨量对照表

Tab.4.1 The comparison of Automatic measuring and reporting in manual measuring of rainfall

洪号	测报方式	测报站						平均值
		清河	八棵树	耿王庄	凉水泉	大孤家	土口子	mm
9171	自动测报	79	76	73	92	123	128	95
	人工测报	77	79	74	94	122	124	95
	差值	2	-3	-1	-2	1	4	0
9481	自动测报	285	193	211	187	103	68	175
	人工测报	299	198	193	204	91	67	175
	差值	-14	-5	18	-17	12	1	0
9482	自动测报	107	129	145	116	137	131	128
	人工测报	114	127	131	119	154	128	129
	差值	-7	2	14	-3	-17	3	-1
9571	自动测报	203	376	362	326	379	360	334
	人工测报	207	407	346	318	362	335	329
	差值	-4	-31	16	8	17	25	5

鉴于系统不但具有精度较高的产、汇流预报方案(即产流预报方案达到规范要求的

甲级水平, 汇流预报方案达到规范要求的甲级—乙级水平), 而且还具有及时准确的实时水文信息来源, 所以, 利用净雨作为第一判别指标实时防洪预报调度是可行的。净雨作判别指标不但可以控制不同雨型变化, 而且能大大增长预见期, 为水库调度决策、抗洪抢险掌握主动权。

水位作为传统的水库控制运用指标, 具有简单、安全、易操作等特点, 同时考虑降雨在时间、空间分布的极不均匀性, 以及系统运用的灵活性、可靠性, 采用水位作为第二判别指标是非常重要的。

清·南~开区间具有较高的洪水预报方案, 也达到规范要求的甲级水平, 而且有足够的预见性, 使水库对清河堤防达到完全错峰的目的。这一指标还可以用松树水文站代替, 清·南~开区间洪水主要来自寇河, 而松树水文站处于寇河中下游, 基本控制了寇河洪水。松树水文站至开原站的洪水传播时间为 4~5 个小时, 为清河堤防错峰赢得了时间, 所以采用松树水文站的实测流量作为错峰的判别指标可以获得同样的错峰效果, 可见, 采用流量作第三判别指标是非常重要的。

综上所述, 采用净雨、水位、流量作为判别指标是可行的, 而且净雨与水位、流量指标有机地结合, 使防洪调度决策系统更加合理科学。

4.2 基本资料的收集、整理和分析

4.2.1 水库特征曲线

清河水库运行 35 年来, 至今没有进行库区淤积量估算及测量工作, 所以库容曲线采用原值。在“95.7”洪水调度过程中, 溢洪道先后开启 2 孔、4 孔泄洪, 共完成实际流量测验 6 次。从检验结果来看, 实测点与水库溢洪道设计泄流曲线配合较好, 说明原设计所确定的流量参数是符合实际的, 不必修正。清河水库水位~库容~面积~泄量关系表见表 4.2。

表 4.2 清河水库水位、库容、面积、泄量关系表

Tab.4.2 The Qinghe reservoir water level, the storage capacity, the area, release the quantity relations

水位(高程)m	库容(亿 m ³)	面积(km ²)	泄流量(m ³ /s)			
			输水洞	泄洪洞	溢洪道	合计
死水位 109.7	0.56	10.8	118			118
溢洪道堰底 126	4.27	35.9	310			210
汛限水位 127	4.66	37.9	318		98	416
正常水位 131	6.3	46	348		1155	1503
设计洪水位 135.3	8.47	55	380		3130	3510
校核洪水位 137.4	9.71	60.8	389		4210	4599
103	0.08	6	0			
105	0.18	7.2	15			15

续表 4.2

水位(高程)m	库容(亿 m ³)	面积(km ²)	泄流量(m ³ /s)			
			输水洞	泄洪洞	溢洪道	合计
108	0.39	9.5	88			88
110	0.59	11.2	125			125
112	0.84	13.5	158			158
114	1.14	16.3	186			186
116	1.19	19.3	212			212
118	1.9	22.3	236			236
120	2.37	25.5	257			257
122	2.89	28.9	276			276
124	3.53	32.3	294			294
128	5.05	40.8	330		276	606
130	5.84	44	341		811	1152
132	6.76	46.2	355		1540	1895
134	7.77	52.4	369		2415	2784
135	8.31	54.8	375		1905	3280
136	8.87	57.3	382		3430	3812
137	9.47	59.8	387		3980	4367

4.2.2 下游河道各防护点防洪标准、安全泄量

清河水库对下游有三级防洪任务。一级防洪目标为清河堤防。当清河全区发生五十年一遇洪水时，经清河、南城子水库的调洪错峰，开原组合流量不超过 5000m³/s，但目前堤防只能防 10%标准的洪水，仅能通过 1900m³/s。所以，清河水库在确定预报调度方式时应考虑这一现实。

二级防洪目标为清河口以下的辽河干流堤防。当辽干全区发生二十年一遇洪水时，石佛寺组合流量不超过 5500 m³/s。

三级防洪目标为清河上的长大线清河铁路桥。当清河全区发生百年洪水时正常通车，即可以通过 8000 m³/s。经过 1985 年辽河堤防整治大部分堤防达到设计标准。清河水库下游堤防情况见表 4.3，清河水库下游主要桥涵抗洪能力见表 4.4。

表 4.3 清河水库下游提防情况一览表

Tab.4.3 The situation of Qinghe reservoir downstream guards

地段范围	所属市、县、区		控制断面	堤顶高程(m)		堤段长度(km)		允许安全泄量(m ³ /s)	
	左岸	右岸		左岸	右岸	左岸	右岸	左岸	右岸
水库~清河口	开原市清河区	开原市	老城	90.7		4.6	35.4	1800	
清河口~铁岭	开原市铁岭县	铁岭县	双安桥	62.45	山	19.1	13.8	5500	5500
铁岭~石佛寺	铁岭县新城子区	铁岭县法库县	L152	山	47.46	52.2	42.2	5500	5500
石佛寺~马虎山	新城子区新民县	法库县新民县	L145	山	山	11	11.1	5500	5500
马虎山~巨流河	新民县	新民县	L152	山	35.98	28.1	15.2	5500	5500
巨流河~卡力马	新民县辽中县	新民县辽中县	L113	23.17	22.67	68.8	58.8	5250	5250
卡力马~朱家房子	辽中县	辽中县台安县	L94	15.47		23.9	24.8	5000	5000
朱家房子~六间房	辽中县台安县	台安县	L91	14.35	14.35	18.3	17.2	5000	5000
六间房~盘山	盘山县	台安县盘山县	L51	10.68	10.68	41.5	40.8	5000	5000
盘山~河口	盘山县大洼县	盘山县		8.57	7.43	20.4	21.7	3000	3000

表 4.4 清河水库下游主要桥涵抗洪能力表

Tab.4.4 Qinghe reservoir downstream main arch of bridge flood-fighting ability

市县	名称	公路或铁路线	长度(m)	孔径(孔)	梁底高程(m)	安全水位高程(m)	允许泄流量 m ³ /s
开原县	老城公路桥	开原市内	276	16	91.15	89.65	2400
	开丰铁路桥	开丰县	346.03	14	92.58	90	4000
	长大铁路桥	长大县	689.78	20	869	86.4	6545
	马圈子公路桥	开原市内	400.83	12	82.2	80.53	4700
铁岭市	双安公路桥(老)	铁岭县内	492.3	18	62.27	62.11	8200
	双安公路桥(新)	铁岭县内	605.9	20	63.03	61.19	7500
	铁法铁路桥	铁法县	863.3	26	63.74	62.91	9500

续表 4.4

市县	名称	公路或 铁路线	长度 (m)	孔径 (孔)	梁底高程 (m)	安全水位 高程 (m)	允许泄流量 m ³ /s
新民 县	马虎山公路桥	沈彰	700	28	44.56	43.37	11000
	巨流河铁路桥	沈山线	915.75	28	36.32	35.38	10300
	巨流河公路桥	新民县内	913.13	44	35.34-36.07		7900
辽中	腰屯公路桥	辽黑	870.6	39	19.8		6960
台安	红庙子公路桥	沈盘	885	37	18.85	18.9	8960
盘锦	沟海铁路桥	沟海线	310.5	9	8.1	8.14	3000
市	盘营公路桥	盘营	335	11	8.3	6.55	3620

4.2.3 清河水库下游传播规律

本文分析了建库以后 6 次涨、退较明显的径流资料，水库变闸时刻开始至开原站消退时的历时称始退历时。开原站流量开始消退时刻至退水稳定时的历时称退水稳定历时。由统计表 4.5 可知，清河水库至开原站的始退历时为 1.5 小时，退水稳定历时为 3~4 小时。由于铁岭站距清河水库较远，中间受南城子、柴河水库放流及区间径流影响较大，分析困难。本文借用大伙房水库至沈阳站错峰起始提前量分析成果，由于河槽的调蓄作用，河段越长，错峰起始提前的时间便越长，错峰起始提前的时间便越长。清河水库至开原站的河长为 11km，退水稳定历时 3~4 小时，清河水库至铁岭站的河长为 56 公里，退水稳定历时 4~5 小时，大伙房水库至沈阳站的河长为 68km，退水稳定历时 5~6 小时，清河水库至石佛寺河长为 134km，退水稳定历时取 10 小时为宜。清河水库泄流传播时间速度见表 4.6。

表 4.5 水库错峰泄流量洪水波传到防护点开原站的历时计算表

Tab.4.5 The reservoir wrong peak aerial drainage quantity flood wave passes to the protection spot to open the lasted computation chart which the source stands

年份	水库泄量变化			开原站相应流量变化			A	B	合计
	变闸前	变闸后	变量	减前量	减后量	减量			
64.7.8	130	0	130	210	90	120	1.5	3	4.5
75.7.31	233	16.5	217	628	430	198	1.5	4	5.5
75.8.14	199	50.9	148	270	110	160	1.5	3.5	5
85.8.20	322	31.2	291	625	355	270	1.5	4.5	6
94.8.23	273	21.8	251	326	89.1	237	1.5	4	5.5
95.8							1	4	5

注 1) A: 水库错峰减量到防护点开始退水的历时，即始退历时

B: 防护点退水稳定历时

表 4.6 清河水库泄流传播时间、速度计算表

Tab.4.6 Qinghe reservoir aerial drainage propagation time, speed computation

项目	开原	铁岭	巨流河	朱家房子	二道桥子	盘山闸
站点高程 h(m)	84.18	52.78	26.23	7.22		
距水库距离 L(m)	11	56	163	289	337	360
平均坡降(‰)	0.89	0.74	0.42	0.3		
起涨速度 (km/h)	$0.38Q^{0.6}$	$0.22Q^{0.6}$	$0.18Q^{0.6}$	$0.175Q^{0.6}$		
峰现速度 (km/h)	$0.28Q^{0.5}$	$0.20Q^{0.5}$	$0.19Q^{0.5}$	$0.19Q^{0.5}$		
起涨时间 (h)	$28.9Q^{-0.6}$	$255Q^{-0.6}$	$906Q^{-0.6}$	$1651Q^{-0.6}$		
峰现时间 (h)	$39.3Q^{-0.5}$	$280Q^{-0.5}$	$858Q^{-0.5}$	$1521Q^{-0.5}$		

4.2.4 设计净雨过程的推求

(1) 典型洪水过程对应的净雨过程的推求

① 清河水库坝址以上净雨过程推求

1953年,清河水库坝址以上流域共建有东石人沟、凉水泉子、大孤家子和北荒地四个雨量观测站,受当时各种条件所限,这些站的时段降雨观测资料不完整,虽然是八段制,但观测时间不规范,原观测时间为3、6、9...,目前规范使用的是2、5、8...,解决这一问题采用以下两种方法,无论哪种方法其降雨总量274.6mm不变。

方法一:以原时段降雨资料为基础,计算累计雨量,然后绘出时段累计雨量图,依规范规定的观测时间摘取点子,然后两个相邻时间的累计雨量相减,即得时段降雨量,见表4.7。

方法二:西丰雨量站时段降雨数据完整且距暴雨中心较近,此次降雨总量277.8mm,具有一定的代表性,求分配系数 $K = \frac{274.6}{277.8} = 0.9885$ 。以降雨总量274.6mm控制,计算流域时段平均降雨量,其结果见表4.7。

从表4.7中数据看,除前2个时段雨量差别较大,其他时段均较接近,经与洪水过程线对应比较,本文选择了方法一求得的时段降雨量,首先以“DHF”产流模型或蓄满产流模型推求净雨过程,然后以实际次净雨总量修正净雨过程。

表 4.7 “5381”清河水库时段平均降雨量、净雨量(mm)计算表

Tab.4.7 “5381” Qinghe reservoir l average rainfall, runoff computation

月日	时	方法一			方法二			
		Pi	Ri	ΣRi	西丰 Pi	Pi	Ri	ΣRi
8 18	17	0.5						
	20	0.6						
	23	7.9	2	2				
19	2	39	34	36	19.3	19.1	13	13

续表 4.7

月日	时	方法一			方法二			
		Pi	Ri	ΣRi	西丰 Pi	Pi	Ri	ΣRi
	5	29	28	64	42.1	41.6	36	49
	8	5.8	5	69	13.8	13.6	12	61
	11	0.9	0	69	2.2	2.2	1	62
	14	1.3	1	70	0.6	0.6	0	62
	17	5.2	5	75	10.4	10.3	10	72
	20	48.8	48	123	52.8	52.2	52	124
	23	46	46	169	30.9	30.5	30	154
20	2	32	32	201	44.3	43.8	44	198
	5	26	26	227	35.2	34.8	35	233
	8	18	18	245	17.7	17.5	17	250
	11	9.5	9	254	6.1	6	6	256
	14	3.1	3	257	2.4	2.4	2	258
	17	1	1	258				
	20							
合成		274.6	258	258	277.8	275	258	258

“9571”暴雨的各站时段降雨量摘自整编资料，时段降雨资料完整，观测时间为规范的八段制，由于降雨分布比较均匀，采用算术平均法计算流域时段平均降雨量，利用上述两种产流模型之一推求净雨过程，净雨总量为 290mm，结果见表 4.8。

表 4.8 “9571”清河水库时段平均降雨量、净雨量(mm)计算表

Tab.4.8 “9571” Qinghe reservoir l average rainfall, runoff computation

日	时-时	清河	八颗树	耿王庄	凉水泉	大孤家	土口子	P	R
25	11~14	12	13		9	15	7	11.2	1
	14~17	13	17		13	12	6	12.2	2
	17~20	23	12		9	13	5	12.4	3
26	2~5	6	6		11	1	0	5.4	2
	5~8	4	6		5	9	15	8.3	5
	8~11	2	10		13	23	31	17.4	15
	11~14	1	14		13	4	8	8.9	7
	14~17	2	3		4	8	0	3.4	2
	17~20		1		3	16	2	8.9	7
28	17~20	19			1			2.1	
	20~23	14	39	41	22	16	6	20.8	16
	2~23	26	103	111	91	39	16	60	56
29	2~5	22	79	44	43	43	43	45.5	46
	5~8	13	16	30	21	92	76	49.1	49
	8~11	6	13	21	21	28	24	20.8	21

续表 4.8

日 时-时	清河	八颗树	耿王庄	凉水泉	大孤家	土口子	P	R
11~14	4	1	0	1	0	4	1.6	2
14~17	8	3	4	4	9	0	4.6	5
17~20	2	2	3	4	5	15	6.1	6
20~23	0	1	0	1	3	0	1	
23~2	0	2	0	0	3	9	2.9	3
2~5	7	11	10	9	15	33	15.8	16
5~8	10	9	14	14	13	19	13.8	13
8~11	5	6	8	7	5	16	8.3	8
11~14	2	2	2	1	2	3	2	
14~17	2	7	5	6	5	2	4.5	5
17~20						2	0.4	
Σ	203	376	293	326	379	342	347.4	290

② 清·南~开区间净雨过程推求

区间流域面积内有 7 个雨量观测站，它们是开原、松树、西丰、高丽幕子、南城子、凉水泉子和清河站，各站降雨量摘自 1953 年水文年鉴， Δt 取 3 小时。区间平均雨量取 7 站雨量的算术平均值，或开原、松树、西丰、高丽幕子 4 站的算术平均值。由于各观测站没有完整的时段雨量，可参照西丰站时段降雨过程按比例计算，区间降雨量为 238.8mm，比例系数 $K = 238.8/277.8 = 0.8596$ ，计算结果见表(4.9)。以产流预报模型推求净雨过程，再根据实际净雨量 188mm 修正，结果见表(4.9)。

表 4.9 “5381” 清·南~开区间时段降雨量、净雨量(mm) 计算表

Tab.4.9 “5381” average rainfall, runoff computation~from Qing·Nan to the development zone

月 日	时	西丰站雨量	区间雨量	区间净雨	区间累积净雨
8	19	2	19.3	16.6	4
		5	42.1	36.2	14
		8	13.8	11.1	6
		11	2.2	1.9	1
		14	0.6	0.5	0
		17	10.4	8.9	5
		20	52.8	45.4	44
		23	30.9	26.7	25
	20	2	44.3	38.1	37
		5	35.2	30.3	30
		8	7.7	15.2	15
		11	6.1	2.1	5
		14	2.4		2
	合计		277.8	238.8	188

“9571”各站时段降雨摘自 1995 年整编资料，由于时段雨量数据完整，可直接用产流模型推求净雨过程，并以实际净雨 99mm 修正，结果见表(4.10)。

表 4.10 “9571”清·南~开区时段降雨量、净雨量(mm)计算表

Tab.4.10 “9571”average rainfall, runoff computation~fromQing·Nan to the development zone

月	日	时-时	开原 0.1	松树 0.28	西丰 0.38	振兴 0.24	P	Ri
7	25	5-8	2.6	0.4	0	1.1	0.6	
		8~11	2.4	1.3	2	6.4	2.9	
		11~14	8.7	5	3.1	2.3	4	
		14~17	10.4	12	12.1	15.5	12.7	1
		17~20	17.9	24.9	7.5	30.5	18.9	2
		20~23	0.2	2.9	3.7	1	2.5	
		23~2	0	0	0	0	0	
26	2~5	16	6.1	4.5	4.6	6.1		
		5~8	9.7	7.2	7.6	5.9	7.3	
		8~11	1.1	2.6	5.4	11.4	5.6	
		11~14	1.2	0.3	3.8	19.1	6.2	
		14~17	0.9	1.3	2.1	5.7	2.6	
		17~20	0	5.5	0	4.7	2.7	
27	2~5	1.8	0	0	0	0.2		
		5~8	0.1	0.6	0.2	0.2	0.3	
		8~11	0	0	0	0.7	0.2	
28	14~17	0.5	0	0	0	0		
		17~20	28	23.9	11.8	0.9	14.2	3
		20~23	1.4	1.7	0.5	11.4	3.5	1
		23~2	6.2	1.1	19.2	46	19.3	11
29	2~5	7.1	1	13.3	41.7	16	13	
		5~8	8.8	5	10.9	17.3	10.6	9
		8~11	6.4	15.5	15.6	17.5	15.1	14
		11~14	2.8	1.7	1.7	0.9	1.6	1
		14~17	8.5	6.4	6.6	4	6.1	6
		17~20	1	3.8	4	4	3.2	3
		20~23	0.3	1.5	0.9	0.4	0.9	
	23~2	3	1.6	0.8	0.4	1.1	1	
30	2~5	7	7.7	7.2	11.6	8.4	8	
		5~8	8.2	10.6	17.7	19.8	15.3	15
		8~11	3.4	8.1	9.5	9.5	8.5	8
		11~14	0.8	1.4	1.9	1.7	1.6	1
		14~17	0.1	0.1	2	6.3	2.3	2
ΣP			166.5	161.2	175.6	302.5	200.5	99

③ 辽干福~铁区间净雨过程推求

福~铁区间内设 15 个雨量站，各站时段降雨量摘自 1953 年水文年鉴，因区间面积大、洪水汇流时间长， Δt 取 6 小时。时段降雨记录不全的参照相邻站点直接插值计算，用区间指数双层产流模型计算各时段净雨量，亦以实际净雨 124mm 进行修正，计算结果见表(4.11)。

表 4.11 “5381” 福~铁区间流域时段平均降雨量、净雨量(mm)计算表

日时-时	梨树	王宝庆	双庙子	宝力镇	昌图	高丽幕子	西丰	松树	开原	康平	通江口	铁岭	P	R
	0.08	0.09	0.086	0.1	0.06	0.05	0.058	0.05	0.045	0.06	0.083	0.039		
1820~2				8.4		38.8	19.2	11	11.6	12.3	25.7	38.2	11.5	1
19 2~8	47.7	29.3	48.3	50.2	34.5	51.7	55.9	20.8	23.3	57.5	13.3	12.5	37.6	13
8~14	51.6	22.9	62	26.9	39	0.2	2.8	5.7	0.2	12.2	15.1	0.1	25.9	12
14~20	31.9	34.9	62.3	33.9	79.3	52.4	63.2	30	17.9	11.1	22	68.4	43.5	30
20~2	15.6	17.8	56.8	33.9	13.3	87	75.2	52.8	45.7	24.1	51	61.6	39	36
20 2~8	11.4	10.3	25.5	28.2	53.2	87	52.9	52.8	45.7	7.9	19.5	40.8	31.6	28
8~14	0.6	0.3	0.6	6.4	13.5	20.1	8.5	12.3	11.3	0	3.5	12.7	6.4	4
14~20														
ΣD	158.8	116	255.5	188	233	337	277.7	185	155.7	125.1	150.1	234.3	196	124

Tab.4.11 “5381” average rainfall, runoff computation—from Fu to Tie

“9571” 暴雨洪水时段降雨量完整，可直接推求净雨过程，结果列于表(4.12)。

表 4.12 “9571” 福~铁区间流域时段平均降雨量、净雨量(mm)计算表

Tab.4.12 “9571” average rainfall, runoff computation~from Fu to Tie

日时时	王宝庆	双庙子	宝力镇	昌图	庆云堡	高丽幕子	西丰	松树	开原	通江	铁岭	P	R
	0.087	0.086	0.1	0.06	0.045	0.049	0.058	0.05	0.045	0.083	0.039		
25 2~8	0	0	0	0.1	6.9	1.1	0	0.4	2.6	0	9.4	1.4	
8~14	1.5	1.8	2.5	5.8	16.9	8.7	11.4	6.3	11.1	7	20	6.8	
14~20	14.6	25.2	15.6	15.7	161	46	19.6	36.9	28.3	21.8	27.2	21.6	1
20~2	31.2	9.6	38.1	11	2.6	1	3.7	2.9	0.2	5.4	3.5	15.3	2
26 2~8	57.8	35.2	79.5	29	33.7	10.5	12.1	13.3	25.7	40.5	10.1	39.5	7
8~14	2.2	17.6	3.5	19.8	6.6	30.5	9.2	2.9	2.3	19.6	5.1	9.5	3
14~20	0.7	15	0.2	5.5	1.5	10.4	2.1	6.8	0.9	4	0.2	3.6	1
20~2	0	0	0.6	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0.1	
27 2~8	0.5	0.7	1.2	1.2	0.9	0.2	0.2	0.6	1.9	0.6	1.1	0.8	
8~14	0.2	0.4	0.7	0	0	0.7	0	0	0	0	0	0.2	
14~20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20~2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
28 2~8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8~14	0.9	0.5	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0.3	
14~20	3.2	23.1	1.4	31	22.5	0.9	11.8	25.5	28.5	26	5.7	13.4	10
20~2	13.9	23.6	19.5	0.9	12.5	57.4	19.7	1.4	7.6	0	54.7	18	16
29 2~8	0	1.3	2.6	9.3	15	59.01	24.2	13.3	15.9	0.5	52.9	12.5	11
8~14	4.7	7.5	8	13	10.8	18.4	17.3	9.7	9.2	16.9	5.9	9.8	9
14~20	0.3	4.6	2.7	6.8	8.6	8	10.6	10.5	9.5	8.2	3.5	5	5
20~2	0.2	5.6	3	4.4	1.8	0.8	1.7	2.8	2.3	1.1	2.7	2	1
30 2~8	2.8	13.7	9.2	16.3	12.2	31.4	24.9	16.7	15.2	12.6	6.8	11.3	11
8~14	0	4.2	2.1	6.9	3.2	11.3	11.4	8.5	4.2	6.6	6.8	4.6	4
14~20	0	0	0	0	0	6.3	1.8	0.1	0.1	0.1	1.5	0.6	
ΣP	134.7	189.6	190.4	177	171.8	302.6	181.7	159	165.5	170.9	217.1	176	81

(2) 推求全区设计洪水所对应的净雨过程

用同倍比法,以区间和水库典型洪水所对应的净雨过程 $R_{d(i)}$ 放大区间设计标准及水库相应标准洪水所对应的净雨过程 $R_{pi(i)}$ 。反之,以区间和水库典型净雨过程放大水库设计标准及区间相应标准洪水的净雨过程。因无洪水总量设计值,故采用设计七日洪量代替之。即:

$$R_{pi(i)} = K_i \times R_{d(i)} \quad (4.1)$$

式中: K_i ——同倍比放大系数, $K_i = W_{pi} / W_{di}$, $i = 1, 2$;

W_{di} ——区间或水库典型七日洪量；

W_{pi} ——区间、水库设计标准或水库区间相应标准七日洪量；

i ——代表水库与区间洪水。

依清河全区设计成果中七日洪量与“5381”典型洪水七日洪量，考虑两种组合，一是清河全区设计、清河水库同频率设计，清·南~开区间相应。清河水库设计频率分别为 $P=0.01\%$ 、 0.1% 、 1% 、 2% 、 5% 、 10% ，清河水库典型洪水七日洪量为 5.22 亿 m^3 ，对应的放大系数依次为： $K=2.1456$ 、 1.6571 、 1.1590 、 1.006 、 0.7989 、 0.6398 。清·南~开区间典型洪水七日洪量为 3.14 亿 m^3 ，相应频率的放大系数依次为 $K=2.1874$ 、 1.7134 、 1.2166 、 1.0701 、 0.8599 、 0.6974 。

二是清河全区设计、清·南~开区间同频率设计、清河水库相应，清·南~开区间设计频率分别为： $P=0.01\%$ 、 0.1% 、 1% 、 2% 、 5% 、 10% ，对应的放大系数依次为： $K=2.0881$ 、 1.6264 、 1.1379 、 0.9923 、 0.7873 、 0.6303 。以不同频率的放大系数乘以典型净雨过程，即得清河水库设计、相应，清·南~开区间设计、相应的净雨放大过程，结果见表(4.13)、(4.14)。

基于权权的多目标防洪预报调度方式优选

表 4.13 “5381” 清河水库相应净雨 (mm) 放大过程表

Tab.4.13 “5381”Qinghe reservoir corresponding runoff enlargement process

月日时	Ri	放大过程表										
		ΣRi	Ri	ΣRi	Ri	ΣRi	Ri	ΣRi	Ri	ΣRi	Ri	ΣRi
	0.01%	2.0881	0.1%	1.6264	1%	1.138	2%	0.9923	5%	0.7873	10%	0.6303
8 18 23	2	4.2	3.3	3.3	2.3	2.3	2	2	1.6	1.6	1.3	1.3
19 2 34	71	75.2	55.3	58.6	38.7	41	33.7	35.7	26.8	28.4	21.4	22.7
5 28	58.5	133.7	45.5	104.1	31.9	72.9	27.8	63.5	22	50.4	17.6	40.3
8 5	10.4	144.1	8.1	112.2	5.7	78.6	5	68.5	3.9	54.3	3.2	43.5
11 0		144.1		112.2		78.6		68.5		54.3		
14 1	2.1	146.2	1.6	113.8	1.1	79.7	1	69.5	0.8	55.1	0.6	44.1
15		149		116		81		70		56		
16		152		118		83		72		57		
17 5	10.4	156.6	8.1	121.9	5.7	85.4	5	74.5	3.9	59	3.2	47.3
18		194		152		102		86		70		
19		226		178		120		100		79		
20 48	100.2	256.8	78.1	200	54.6	140	47.6	122.1	37.8	96.8	30.3	77.6
21		295		228		155		127		108		
22		324		253		174		150		120		
23 46	96.1	352.9	74.8	274.8	52.3	192.3	45.6	167.7	36.2	133	29	106.6
24		379		294		203		180		140		
20 1		403		310		215		190		150		
2 32	66.8	419.7	52	326.8	36.4	228.7	31.8	199.5	25.2	158.2	20.2	126.8
3		440		340		240		210		164		
4		456		355		249		217		170		
5 26	54.3	474	42.3	369.1	29.6	258.3	25.8	225.3	20.5	178.7	16.4	143.2
6		487		378		264		230		183		
7		499		387		270		236		188		

续表 4.13

月日时	Ri	ΣRi	Ri	ΣRi	Ri	ΣRi	Ri	ΣRi	Ri	ΣRi	Ri	ΣRi
	0.01%	2.0881	0.10%	1.6264	1%	1.138	2%	0.9923	5%	0.7873	10%	0.6303
8 18	37.6	511.6	29.3	398.4	20.5	278.8	17.9	243.2	14.2	192.9	11.3	154.5
11 9	18.8	530.4	14.6	413	10.2	289	8.9	252.1	7.1	200	5.7	160.2
14 3	6.3	536.7	4.9	417.9	3.4	292.4	3	255.1	2.4	202.4	1.9	162.1
17 1	2.1	538.8	1.6	419.5	1.1	293.5	1	256.1	0.8	203.2	0.6	162.7
合计	258	538.8		419.5		293.5		256.1		203.2		162.7

表 4.14 “5381” 清·南~开区间设计、相应净雨 (mm) 放大累积过程
 Tab.4.14 “5381” the design and corresponding runoff enlargement process from Qing·Nan to development zone

日 时段	R	清·南~开区间设计					清·南~开区间相应						
		0.01%	0.10%	1%	2%	5%	10%	0.01%	0.10%	1%	2%	5%	10%
19 2	4	7.6	5.9	4.1	3.6	2.8	2.3	6.6	5.1	3.6	3.2	2.6	2.1
5 14	14	35.6	27.5	19.1	16.6	13.1	10.6	30.6	23.9	17	15	12.1	9.8
8 6	6	48.3	37.3	25.9	22.5	17.8	14.4	41.5	32.5	23.1	20.4	16.4	13.3
11 1	1	49.3	38.1	26.4	23	18.2		42.4	33.2	23.6	20.8	16.7	13.6
14 0	0	49.3	38.1	26.4	23	18.2		42.4	33.2	23.6	20.8	16.7	13.6
17 5	5	68.4	52.8	36.6	31.9	25.2	20.3	58.8	46.1	32.7	28.8	23.1	18.8
18		102	80	68	50	35		85	72	49	45	35	
19		140	110	77	65	50		123	96	67	30	49	
20 44	44	183.6	141.5	98.4	85.4	67.7	54.3	157.5	123.1	87.7	77.2	62	50.3
21		204	155	110	94	75		175	140	100	85	67	
22		223	173	120	105	83		195	155	110	97	75	
23 25	25	250.9	193.3	134.5	116.7	92.5	74.1	215.2	168.7	119.8	105.5	84.7	68.7
24		285	215	153	130	105		240	182	135	117	94	

基于模糊的多目标决策防洪预报调度方式优选

续表 4.14

日时段	R	清·南~开区间设计					清·南~开区间相应						
		0.01%	0.10%	1%	2%	5%	10%	0.01%	0.10%	1%	2%	5%	10%
20	1	320	245	170	145	117	268	212	150	132	105		
	2	37	347.5	267.7	186.3	167.6	128.1	102.6	298	233.6	165.9	146.1	117.3
	3		378	290	200	173	140	324	250	176	155	126	
	4		404	308	215	185	148	345	268	180	173	135	
	5	30	428.2	326.7	227.4	197.3	156.4	125.2	363.8	285.2	202.5	178.3	143.2
	8	15	462.4	356.1	247.9	215.1	170.5	136.5	396.6	310.9	220.7	194.4	156.1
	11	5	474.6	365.1	254.5	220.8	175	140.1	407.1	319.1	226.5	199.5	160.2
	14	2	479	368.8	256.8	222.8	176.6	141.4	410.8	322	228.6	201.3	161.7
	Σ	188	479	368.8	256.8	222.8	176.6	141.4	410.8	322	228.6	201.3	161.7

采用相同方法，以“9571”洪水为典型，清河水库典型洪水七日洪量为 5.91 亿 m³，依照清河全区设计成果、计算不同组合、不同频率净雨放大过程，结果见表(4.15)、(4.16)。

表 4.15 “9571”清河水库设计、相应净雨(mm)放大累积过程

Tab.4.15 “5381”Qinghe reservoir design and corresponding runoff enlargement process

日 时 段	R	清河水库设计						清河水库相应					
		0.01 %	0.1 %	1%	2%	5%	10%	0.01 %	0.10 %	1%	2%	5%	10%
25. 14- 26. 20	44	83.5	64.3	45	39.1	30.9	24.9	81.1	63.1	44.1	38.6	30.7	24.6
28 23	16	113.8	87.7	61.4	53.3	42.2	33.9	110.6	86.14	60.2	52.6	41.8	33.5
29 2	56	219.9	169.7	118.7	103	81.7	65.5	213.9	166.5	116.5	101.7	80.7	64.6
5	46	307.1	237	165.8	143.9	114.2	91.5	298.7	232.6	162.7	142	112.7	90.2
8	49	400	308.7	216	187.4	148.8	119.2	389.1	303	211.9	184.6	146.8	117.5
11	21	439.8	339.4	237.5	206.1	163.6	131.1	427.8	333.2	233	203.3	161.4	129.2
14	2	443.6	342.3	239.5	207.9	165	132.2	431.5	336.1	235	205.1	162.8	130.3
17	5	453.1	349.6	244.6	212.3	168.5	135	440.7	343.3	240	209.5	166.3	133.1
20	6	464.5	358.4	250.7	217.6	172.7	138.4	451.8	351.9	246	214.8	170.5	136.4
30 2	3	470.2	362.8	253.8	220.3	174.8	140.1	457.3	356.2	249	217.4	172.6	138.1
5	16	500.5	386.2	270.2	234.5	186.1	149.1	486.8	379.2	265.1	231.4	183.7	147
8	13	525.1	405.2	283.5	246	195.3	156.4	510.8	397.9	278.2	242.8	192.7	154.2
11	8	540.3	416.9	291.7	253.1	200.9	160.9	525.6	409.4	286.2	249.8	198.3	158.7
17	5	549.8	424.2	296.8	257.5	204.4	163.7	534.8	416.6	291.2	254.2	201.8	161.5
Σ	290	549.8	424.2	296.8	257.5	204.4	163.7	534.8	416.6	291.2	254.2	201.8	161.5

表 4.16 “9571”清·南~开区间设计、相应净雨(mm)放大累积过程

Tab.4.16 “9571” the design and corresponding runoff enlargement process from Qing·Nan to development zone

日	时段	R	清·南~开区间设计						清·南~开区间相应					
			0.01%	0.10%	1%	2%	5%	10%	0.01%	0.10%	1%	2%	5%	10%
25	17	1	5.1	3.9	2.7	2.4	1.9	1.5	4.4	3.4	2.4	2.1	1.7	1.4
	20	2	15.3	11.7	8.2	7.1	5.7	4.5	13.1	10.3	7.3	6.4	5.1	4.2
28	20	3	30.6	23.5	16.4	14.2	11.3	9	26.2	20.6	14.6	12.8	10.3	8.4
	23	1	35.7	27.4	19.1	16.6	13.2	10.5	30.6	24	17	14.9	12	9.8
29	2	11	91.8	70.6	49.1	42.7	33.9	27	78.7	61.7	43.8	38.4	30.9	25.1
	5	13	158	121.6	84.6	73.5	58.3	46.5	135.5	106.2	75.4	66.2	53.3	43.2
	8	9	203.8	156.9	109.2	94.8	75.2	60	174.8	137	97.3	85.5	68.8	55.8
	11	14	275.1	211.8	147.4	128	101.5	81	236	185	131.4	155.5	92.9	75.3
	14	1	280.2	215.7	150.1	130.4	103.4	82.5	240.4	188.4	133.8	117.6	94.6	76.7
	17	6	310.8	239.2	166.5	144.6	114.7	91.5	266.6	209	148.4	130.4	104.9	85.1
	20	3	326.1	251	174.7	151.7	120.3	96	279.7	219.3	155.7	136.8	110.1	89.3
	23	0	326.1	251	174.7	151.7	120.3	96	279.7	219.3	155.7	136.8	110.1	89.3
30	2	1	331.2	254.9	177.4	154.1	122.2	97.5	284.1	222.7	158.1	138.9	111.8	90.7
	5	8	372	286.3	199.3	173.1	137.2	109.5	319.1	250.1	177.6	156	125.6	101.9
	8	15	448.4	345.2	240.3	208.6	165.4	132	384.6	301.5	214.1	188.1	151.4	122.8
	11	8	489.2	376.6	262.2	227.6	180.4	144	419.6	328.9	233.6	205.2	165.2	134
	14	1	494.3	380.5	264.9	230	182.3	145.5	424	332.3	236	207.3	166.9	135.4
	17	2	504.5	388.3	270.4	234.7	186.1	148.5	432.7	339.2	240.9	211.6	170.3	138.2
	Σ	99	504.5	388.3	270.4	234.7	186.1	148.5	432.7	339.2	240.9	211.6	170.3	138.2

根据辽干全区设计成果中七日洪量与 1953 年典型洪水的七日洪量，洪水组合为石佛寺设计，四库~石区间同频率设计，清河、南城子、柴河和榛子岭水库相应。区间设计频率分别为： $P=0.33\%$ 、 1% 、 2% 、 5% 、 10% 。对应放大系数依次为： $K=1.707$ 、 1.435 、 1.269 、 1.03 、 0.846 。清河水库相应频率，对应的放大系数为： $K=1.218$ 、 1.031 、 0.887 、 0.72 、 0.588 。以不同组合、不同频率的放大系数乘以典型净雨过程，即得区间设计、清河水库相应的不同频率净雨放大过程。根据辽河堤防设计标准，本文考虑石佛寺设计二十年一遇的洪水组合。结果见表(4.17)、(4.18)。

表 4.17 “5381”四库~石区间设计、清河水库相应净雨(mm)放大过程表

Tab.4.17 “5381” the design and corresponding runoff enlargement process from Siku to Shi

月	日	时	Rdi	Rpi	ΣRpi	Rpi	ΣRpi	Rpi	ΣRpi	Rpi	ΣRpi	Rpi	ΣRpi
				0.33%	1.218	1%	1.031	2%	0.887	5%	0.72	10%	0.588
8	19	2	36	43.8	43.8	37.1	37.1	31.9	31.9	25.9	25.9	21.2	21.2
	8		33	40.2	84	34	71.1	29.3	61.2	23.8	49.7	19.4	40.6
	14		1	1.2	85.2	1	72.1	0.9	62.1	0.7	50.4	0.6	41.2
	20		53	64.6	149.8	54.6	126.7	47	109.1	38.2	88.6	31.2	72.4
	20		2	78	244.8	80.4	207.1	69.2	178.3	56.2	144.8	45.9	118.3
	8		44	53.6	298.4	45.4	252.5	39	217.3	31.7	176.5	25.9	144.2
	14		12	14.6	313	12.4	264.9	10.6	227.9	8.6	185.1	7.1	151.3
	17		1	1.2	314.2	1	265.9	0.9	228.8	0.7	185.8	0.6	151.9
	合计		258		314.2		265.9		228.8		185.8		151.9

表 4.18 “5381”石佛寺设计、四库~石设计净雨(mm)放大过程表

Tab.4.18 “5381” the Shifou design and runoff enlargement process from Siku to Shi

月	日	时	Rdi	Rpi	ΣRpi	Rpi	ΣRpi	Rpi	ΣRpi	Rpi	ΣRpi	Rpi	ΣRpi	
				0.33%	1.707	1%	1.435	2%	1.269	5%	1.03	10%	0.846	
8	19	2	1	1.7	1.7	1.4	1.4	1.3	1.3	1	1	0.8	0.8	
	8		13	22.2	23.9	18.7	20.1	16.5	17.8	13.4	14.4	11	11.8	
	14		12	20.5	44.4	17.2	37.3	15.2	33	12.4	26.8	10.2	22	
	20		30	51.2	95.6	43.1	80.4	38.1	71.1	30.9	57.7	25.4	47.4	
	20		2	36	61.5	157.1	51.7	132.1	45.7	116.8	37.1	94.8	30.5	77.9
	8		28	47.8	204.9	40.2	172.3	35.5	152.3	28.8	123.6	23.7	101.6	
	14		4	6.8	211.7	5.7	178	5.1	157.4	4.1	127.7	3.4	105	
	17		0											
	合计		124		211.7		178		157.4		127.7		105	

同样方法,推求以“9571”洪水为典型的不同组合、不同频率的净雨放大过程,结果见表(4.19)。

表 4.19 “9571”四库~石区间设计、清河水库相应净雨(mm)放大过程表

Tab.4.19 “9571” the Siku design and Qinghe reservoir runoff enlargement process

日 时-时	R	辽干区间设计					R	清河水库相应				
		0.33%	1%	2%	5%	10%		0.33%	1%	2%	5%	10%
25. 14~28. 14	14	44.4	37.4	33.1	26.7	22	44	47.4	40.1	34.4	28	22.8
28 14~20	10	76.1	64.1	56.7	45.8	37.7	0	47.4	40.1	34.4	28	22.8
20~2	16	126.9	106.8	94.5	76.4	62.9	72	124.9	105.6	90.8	73.8	60.2
29 2~8	11	161.8	136.2	120.5	97.4	80.2	95	227.1	192	165.2	134.2	109.5
8~14	9	190.4	160.2	141.7	114.6	94.4	23	251.8	212.9	183.2	148.8	121.4
14~20	5	206.3	173.5	153.5	124.2	102.3	11	263.6	222.9	191.8	155.8	127.1
20~2	1	209.5	176.2	155.9	126.1	103.9	3	270	225.6	194.1	157.7	128.7
30 2~8	11	244.4	205.5	181.9	147.1	121.2	29	301.2	252	216.8	176.1	143.8
8~14	4	257.1	216.2	191.3	154.7	127.5	8	309.8	259.3	223.1	181.2	148
14~20							5	315.2	263.9	227	184.4	150.6
Σ	81	257.1	216.2	191.3	154.7	127.5	290	315.2	263.9	227	184.4	150.6

4.2.5 预见期分析

本文对清河水库、清·南~开区间及福~铁区间的预见期进行了统计分析,统计清·南~开区间洪峰流量大于 $400\text{m}^3/\text{s}$ 的洪水 13 次,平均预见期为 14 小时,最长的预见期为 19 小时,最短的 10 小时。考虑到降雨分布集中在下游的不利情况,取洪峰预见期为 11 小时,小于 11 小时预见期的洪水只有 2 次。统计清河水库洪峰大于 $400\text{m}^3/\text{s}$ 的洪水 16 次,洪峰平均预见期为 11.4 小时,最长的预见期为 18 小时,最短的 5 小时。考虑降雨中心在下游的分布,确定洪峰预见期为 9 小时,小于 9 小时预见期的洪水只有两次,这是由于暴雨走向与河流方向一致的结果。统计辽干上铁岭站较大洪水 6 次,平均预见期为 32.7 小时,取其预见期为 30 小时,铁岭至石佛寺的洪水传播时间为 21 小时,这样,石佛寺洪水预见期为 51 小时。

4.2.6 分析作业预报时间和调度令传送, 闸门操作时间

作业预报时间、调度令传送、闸门操作时间统称准备工作时间。作业预报时间包括信息传送、洪水预报、调度演算、方案确定等时间。信息传送因传递手段不同、传送时间差别也较大,清河水库坝址以上采用水情自动化测报系统,信息传输时间只需十几秒,而清·南~开区间、福~铁区间主要以拍发水情电报或程控电话的形式传递信息,以电报形式传递速度较慢,约 1~2 小时左右,以程控电话形式传递速度较快,约 0.5 小时便可手机齐全。为确保洪水预报的及时性和可靠性,采用人、机比照法,人工计算需要 0.5 小时,计算机操作只需 10 分钟,特别是多目标、多方案调度决策更能体现出其优越性。调度令传递包括基层请示汇报、等待上级决策,下达调度令,根据以往经验约需半小时

左右，闸门操作有 5 分钟就足够了。综上所述，为安全计，确定清河水库为清·南~开区间错峰的准备工作时间为 1 小时，福~铁区间准备工作时间为 2 小时。

4.3 洪水预报调度方式及其规则的拟定

初步拟定了四个可操作预报调度方式。预报调度方式之一是净雨为第一判别指标，水位和流量作为第二判别指标；预报调度方式二是不考虑水位控制指标，其它同方式一；方式之三是考虑水位控制指标，因水库至石佛寺洪水传播时间长，所以水库关闸错峰不会对辽河产生明显效果，为了安全及运用方便，辽河错峰流量按 $300\text{m}^3/\text{s}$ 计，为清河堤防错峰流量仍为 0，其它方式同方式一；方式四是采用净雨、水位双指标控制，辽河错峰流量为 $300\text{m}^3/\text{s}$ ，当清河水库坝址以上流域累计净雨大于 200mm 时，清河有错峰任务时的错峰流量为 0。

以 1953 年典型洪水设计，以 1995 年暴雨洪水校核，调度规则采用净雨、水位和流量为判别指标，以清·南~开区间累计净雨量、清河水库坝址以上累积净雨量、清·南~开区间预报流量作为清河错峰的判别指标，以福~铁区间累积净雨量作为辽河错峰的判别指标，以清河水库坝址以上累积净雨量、清河水库库水位作为开启溢洪道的判别指标。

依据水库调度原则，以水库设计二十年一遇洪水标准对应的累积净雨 200mm 作为开启溢洪道 2 孔的判别指标，同时也是开启溢洪道的最小值，如调洪计算表(4.20)所示，当累积净雨 $\geq 200\text{mm}$ 、输水道流量 $300\text{m}^3/\text{s}$ 时，若不开启溢洪道则最高库水位为 135.12 米，超过限制水位 134.60m。以水库设计五十年一遇洪水标准对应的累积净雨 260mm 作为开启溢洪道 4 孔的判别指标，同时也是控制搬迁水位的最小值，如调洪计算表(4.21)所示，当累积净雨 $\geq 260\text{mm}$ 、输水道流量 $300\text{m}^3/\text{s}$ 、溢洪道只开 2 孔时，则最高水位为 134.89 米，超过限制水位 134.80m。以水库设计百年一遇洪水标准对应的累积净雨 290mm 作为全开启溢洪道 6 孔的判别指标。

清河水库对下游有多级标准防洪任务，有错峰要求，又有闸门控制，考虑短期入库及区间洪水预报，属于补偿型。

表 4.20 调洪计算表

Tab.4.20 The computation of adjusts the flood

月日	时	累积净雨 (mm)	入库流量 m^3/s	出库流量 m^3/s			库容 10^6m^3	库水位 m	
				输水洞泄量	开闸孔	溢洪道泄量			总泄量
8.19	4	51.2	56	71	0	0	71	544.5	129.00
8.19	8	55.2	336	71	0	0	71	546.3	129.04
8.19	11	55.2	455	300	0	0	300	547.33	129.07
8.19	12		529	300	0	0	300	548.02	129.09
8.19	13		537	300	0	0	300	548.86	129.11

基于熵权的多目标决策防洪预报调度方式优选

续表 4.20

月日	时	累积 净雨 (mm)	入库流 量 m ³ /s	出库流量 m ³ /s				库容 10 ⁶ m ³	库水位 m
				输水洞 泄量	开闸 孔	溢洪道 泄量	总泄量		
8.19	14	56	529	300	0	0	300	549.7	129.13
8.19	16	58	468	300	0	0	300	551.13	129.17
8.19	18	70	468	300	0	0	300	552.35	129.2
8.19	20	98.3	650	300	0	0	300	554.21	129.24
8.19	22	123	1000	300	0	0	300	557.99	129.34
				0	0	0	0		
8.19	24	144	2510	0	0	0	0	570.63	129.66
8.20	1	150	2800	0	0	0	0	580.12	129.88
8.20	2	160.6	3120	0	0	0	0	590.75	130.13
8.20	3	165	3170	0	0	0	0	602.11	130.39
8.20	4	174	3210	0	0	0	0	613.67	130.64
8.20	5	181.4	3120	0	0	0	0	625.07	130.89
8.20	6	186	3060	0	0	0	0	636.19	131.14
8.20	8	195.8	2900	0	0	0	0	657.65	131.62
8.20	10		2700	0	0	0	0	677.77	132.05
8.20	11	203	2670	0	0	0	0	687.44	132.25
				300	0	0	300		
8.20	12		2640	300	0	0	300	695.95	132.43
8.20	14	205.4	2500	300	0	0	300	712.33	132.76
8.20	16		2360	300	0	0	300	727.63	133.07
8.20	18	206.2	2230	300	0	0	300	742.01	133.34
8.20	20		2100	300	0	0	300	755.49	133.59
8.20	22		1940	300	0	0	300	767.87	133.82
8.20	23		1860	300	0	0	300	773.63	133.93
8.21	2		1650	300	0	0	300	789.34	134.23
8.21	5		1400	300	0	0	300	802.58	134.47
8.21	8		1180	300	0	0	300	813.27	134.68
8.21	11		960	300	0	0	300	821.56	134.83
8.21	14		760	300	0	0	300	827.6	134.94
8.21	17		570	300	0	0	300	831.54	135.02
8.21	20		500	300	0	0	300	834.08	135.06
8.21	23		430	300	0	0	300	835.86	135.1
8.22	2		370	300	0	0	300	836.95	135.12
8.22	5		291	300	0	0	300	837.29	135.12
8.22	17		214	300	0	0	300	835.24	135.08
8.23	6		180	300	0	0	300	830.43	135
8.23	14		160	300	0	0	300	826.69	134.93

表 4.21 调洪计算表

Tab.4.21 The computation of adjusts the flood

月日	时	累积 净雨 (mm)	入库流 量 m^3/s	出库流量 m^3/s			库容 $10^6 m^3$	库水位 m	
				输水 洞泄 量	开闸 孔	溢洪道 泄量			总泄 量
8.19	4	64.4	71	71	0	0	71	544.5	129
8.19	6.4		300	71	0	0	71	545.49	129.02
				300	0	0	300		
8.19	8	69.4	422	300	0	0	300	545.84	129.03
8.19	11	69.4	572	300	0	0	300	547.97	129.09
8.19	14	70.4	664	300	0	0	300	551.4	129.17
8.19	16	73	588	300	0	0	300	553.75	129.23
8.19	18	93	588	300	0	0	300	555.83	129.28
8.19	19	110	610	300	0	0	300	556.91	129.31
8.19	20	123.7	636	300	0	0	300	558.08	129.34
8.19	21	140	815	300	0	0	300	559.61	129.38
				0	0	0	0		
8.19	22	155	1190	0	0	0	0	563.22	129.47
8.19	23	170	1850	0	0	0	0	568.7	129.61
	24	180	2970	0	0	0	0	577.3	129.82
8.20	1	192	3780	0	0	0	0	589.41	130.1
8.20	2	202.2	4460	0	0	0	0	604.27	130.14
				300	2	319	619		
8.20	3	210	4570	300	2	355	655	618.78	130.75
8.20	4	220	4600	300	2	392	692	632.68	131.06
8.20	5	228.4	4600	300	2	430	730	646.35	131.36
8.20	6	234	4580	300	2	467	767	659.38	131.65
8.20	7	240	4520	300	2	505	805	672.57	131.94
8.20	9		4230	300	2	576	876	697.59	132.46
8.20	11	255.6	3920	300	2	640	940	720.25	132.92
8.20	13		3640	300	2	699	999	740.83	133.32
8.20	14	258.6	3470	300	2	727	1027	750.24	133.5
8.20	15		3330	300	2	752	1052	759.48	133.66
8.20	16		3200	300	2	776	1076	767.59	133.82
8.20	17	259.6	3050	300	2	798	1098	775.07	133.96
8.20	18		2880	300	2	819	1119	781.84	134.09
8.20	19		2810	300	2	837	1137	788.08	134.2
8.20	20		2720	300	2	855	1155	793.93	134.31
8.20	21		2630	300	2	871	1171	799.38	134.41
8.20	22		2500	300	2	886	1186	804.05	134.51
8.20	23		2420	300	2	900	1200	808.59	134.59

续表 4.21

月日	时	累积 净雨 (mm)	入库流 量 m ³ /s	出库流量 m ³ /s			库容 10 ⁶ m ³	库水位 m	
				输水 洞泄 量	开闸 孔	溢洪道 泄量			总泄量
8.20	24		2235	300	2	913	1213	812.6	134.67
8.21	2		2030	300	2	933	1233	819.13	134.79
8.21	6		1240	300	2	950	1250	824.77	134.89
8.21	8		1010	300	2	947	1247	823.88	134.88
8.21	18		610	300	2	902	1202	809.04	134.6

4.3.1 初拟的预报调度方式之一

预报调度方式之一净雨为第一判别指标，水位和流量为第二判别指标。目前，清河堤防现有防洪标准只有十年一遇，远远小于设计值五十年一遇标准，则从实际出发，保清河全区十年一遇标准洪水不决堤。当辽河全区发生二十年一遇标准洪水时，确保辽河组合流量小于堤防安全泄量 5500m³/s。在控制运用中，当第一指标出现时，做好闸门开启准备，只有当第二指标出现时闸门方可运作。

初拟的预报调度方式之一包括两部分，一是考虑清河全区设计洪水预报调度方式，二是考虑辽干全区设计洪水预报调度方式。

(1) 考虑清河全区设计洪水预报调度方式的拟定

① 以累积净雨作错峰起始时刻判断指标

为保清河堤防十年一遇标准洪水不决堤，采用清·南~开区间设计十年一遇标准洪水所对应的累积净雨量减去最后四个时段(即 12 小时)净雨量值所得的 100mm 作判断指标，即：

$$\Delta R(P=10\%) = \sum^n R(P=10\%) - \sum^{n-4} R(P=10\%) = 100\text{mm}$$

同样方法，以清河水库相应十年一遇标准洪水对应的累积净雨量减去 12 小时的净雨量值作判断指标，该值为 120mm。

② 错峰起始提前量 T_n

$$T_{\text{始错}} = t_{\text{始退}} + t_{\text{退历}} + \Delta t_f \quad (4.2)$$

式中： $t_{\text{始退}}$ ——水库泄量突减，防护地点流量开始消退的时间；

$t_{\text{退历}}$ ——防护地点流量开始消退至最低值的历时；

Δt_f ——防护地点峰现时间的预报平均误差。

由表(4.5)可知: $t_{\text{始退}}=1.5h$, $t_{\text{退历}}=3.5h$, $t_{cb}=t_{\text{始退}}+t_{\text{退历}}=5h$, 清·南~开区间洪峰预见期 $t_f=11h$, 峰现时间预报误差 $\Delta t_f=3h$

$$T_{st}=t_{cb}+\Delta t_f=1.5+3.5+3=8h$$

$$\text{区间洪水预报的有效预见期 } T_g=t_f-t_z=11-1=10h$$

$$\text{必需的降雨预报期 } \Delta T=T_{st}-T_g=8-10=-2h$$

因为 $\Delta T < 0$, 所以可以不考虑降雨预报, 用落地雨判断错峰起始时刻就足够了。

③ 分析错峰效果

以保清河十年一遇标准洪水为例, 降雨预报误差 $\Delta t_q=3h$, 根据式 $T_c=2(\Delta t_f+\Delta t_q)$, 计算错峰历时为 12 小时, 这是最小错峰历时, 调洪计算时一般大于该值。

清·南~开区间设计 ($P=10\%$) 累积净雨达到 100mm 时, t_a 为 20 日 2 时, 水库坝址以上累积净雨量达到 120mm 时, t_a 为 20 日 2 时, 同样方法统计其他频率累积净雨达到各自指标的時刻分别为 19 日 19 时和 19 日 18 时。

已知 $t_z=1h$, 根据 $t_c=t_a+t_z$, 求得错峰开始时刻 t_c 分别为 19 日 20 时和 19 日 19 时。

又已知 $T_{st}=8h$, 根据 $t_b=t_c+T_{st}$, 可求得错峰发生效用时刻 t_b 分别为 20 日 4 时和 20 日 3 时; 还已知 $T_c=12h$, 据 $t_d=t_b+T_c$, 可求得错峰效用结束时刻 t_d 分别为 20 日 16 时和 20 日 15 时, 因 t_h 为 20 日 10 时, 则 $t_d \geq t_h \geq t_b$, 故此指标可用。

④ 清河全区设计洪水预报调度方式的拟定

保清河十年一遇标准洪水, 采用累计净雨、流量和水位作判别指标的预报调度方式: 当清·南~开区间累计净雨达到 100mm, 或清河水库坝址以上累计雨量达到 120mm, 或清·南~开区间预报流量大于 $1900m^3/s$, 水库开始为清河关闸错峰, 错峰结束后, 根据坝址以上净雨情况开启溢洪道泄洪, 输水洞同时放 $300m^3/s$ 。

(2) 考虑辽干全区设计预报调度方式的拟定

① 采用累积净雨作错峰开始时刻的判断指标

福~铁区间的洪水预见期为 30 小时, 铁岭至石佛寺的洪水传播时间为 21 小时, 则

辽干区间洪水预见期为 51 小时。由于区间降雨信息传递较慢, 确定准备工作时间 t_z 为 2 小时, 则区间洪水有效预见期 T_g 为 49 小时。水库泄量突减, 石佛寺站流量开始消退的时间为 36 小时, 消退稳定历时为 10 小时, 错峰起始提前量最小值应为 46h, 考虑到峰现时间预报误差 6h, 则水库错峰起始提前量 $T_m = 52h$ 。必须的降雨预见期 $\Delta T = T_m - T_g = 52 - 49 = 3h$ 。因 $\Delta T > 0$, 必须考虑降雨预报才能满足水库对辽河的错峰要求, 取 $\Delta T = 6$ 小时。

② 分析错峰效果

区间峰现时间预报误差为一个时段, 即 $\Delta t_f = 6h$, 降雨预报滞时 $\Delta t_q = 3h$, 则错峰历时 $T_1 = 2(\Delta t_f + \Delta t_q) = 18h$, 从辽干区间设计标准 $P=5\%$ 洪水所对应的净雨累积过程中, 至后向前减去 12 小时的净雨得到的累积净雨量为 80mm, 考虑六小时的降雨预报, 确定错峰起始时刻的累积净雨量指标为 50mm, 以这个累积净雨作错峰起始的判断指标, 准备工作时间 t_z 确定为 2 小时, 则错峰起始时刻 t_c 为 19 日 17 时。已知 $t_m = 52h$, 根据 $t_b = t_c + t_m$, 求得错峰发生效用时刻 t_b 为 21 日 21 时。

又已知 $T_c = 18h$, 据 $t_d = t_b + t_c$, 求得错峰效用结果时刻 t_d 为 22 日 15 时。

因为 $t_h < t_b < t_d$, 所以错峰效果不理想, 原因有两个, 其一是水库距离防护点太远, 以致达不到完全错峰效果; 其二是 t_z 、 Δt_f 及 T_m 取值过大, t_z 、 Δt_f 合计 8 小时, 我们可以充分利用这部分时间对洪水进行准确的预报, 所以确定错峰起始时刻 t_c 为 19 日 14 时为宜。依次, 错峰发生效用时刻为 21 日 18 时, 错峰效用结果时刻为 22 日 12 时。

因为辽干区间洪水峰现时间 t_h 为 21 日 18 时, 满足 $t_d \geq t_h \geq t_b$, 故此指标可用。

③ 辽干全区设计洪水预报调度方式的拟定

保清河十年一遇标准洪水的同时, 也保辽河二十年一遇标准洪水, 采用累积净雨作判断指标, 当福~铁区间累积净雨大于 50mm, 则水库对辽河关闸错峰, 错峰结束后, 溢洪道开 2 孔, 输水道同时放 $300m^3/s$ 。

(3) 初拟预报调度方式之一

综合清河全区设计洪水预报调度方式和辽干全区设计洪水预报调度方式得到初拟的预报调度方式及其规则之一如下:

- 1) 若 $\sum R_{\text{福-铁}} \geq 50\text{mm}$ 或 $H_{\text{清库}} < 130.65\text{m}$, 则辽河有错峰要求时错峰, 错峰流量为 0 或 $\sum R_{\text{清河}} \geq 120\text{mm}$, 或 $\sum R_{\text{清·南-开}} \geq 100\text{mm}$, 或预报 $Q_{\text{清·南-开}} \geq 1900\text{m}^3/\text{s}$, 或 $H_{\text{清库}} < 130.65\text{m}$, 则清河有错峰要求时关闸错峰。
- 2) 若 $200\text{mm} \leq \sum R_{\text{清库}} < 260\text{mm}$, 或 $H_{\text{清库}} \geq 130.65\text{m}$, 则溢洪道开 2 孔泄洪, 输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。
- 3) 若 $260\text{mm} \leq \sum R_{\text{清库}} < 290\text{mm}$, 或 $H_{\text{清库}} \geq 132.20\text{m}$, 则溢洪道开 4 孔泄洪, 输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。
- 4) 若 $\sum R_{\text{清库}} \geq 290\text{mm}$, 或 $H_{\text{清库}} \geq 133.70\text{m}$, 则溢洪道 6 孔全开, 输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。

4.3.2 初拟的预报调度方式之二

预报调度方式之二不考虑水位控制指标, 其它同方式一。具体的预报调度方式之二及其规则如下:

方式二的预报调度方式

- 1) 若 $\sum R_{\text{福-铁}} \geq 50\text{mm}$, 则辽河有错峰要求时错峰, 错峰流量为 0 或当 $\sum R_{\text{清河}} \geq 120\text{mm}$ 或者 $\sum R_{\text{清·南-开}} \geq 100\text{mm}$ 或预报 $Q_{\text{清·南-开}} \geq 1900\text{m}^3/\text{s}$ 则清河有错峰要求时关闸错峰。
- 2) 若 $200\text{mm} \leq \sum R_{\text{清库}} < 260\text{mm}$, 则溢洪道开 2 孔泄洪, 输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。
- 3) 若 $260\text{mm} \leq \sum R_{\text{清库}} < 290\text{mm}$, 则溢洪道开 4 孔泄洪, 输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。
- 4) 若 $\sum R_{\text{清库}} \geq 290\text{mm}$, 则溢洪道 6 孔全开, 输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。

4.3.3 初拟的预报调度方式之三

预报调度方式之三考虑水位控制指标, 因水库至石佛寺洪水传播时间长, 所以水库关闸错峰不会对辽河产生明显效果, 为了安全及运用方便, 辽河错峰流量按 $300\text{m}^3/\text{s}$ 计, 为清河地方错峰时, 错峰流量仍然为 0, 其它同方式一。

- 1) 若 $\sum R_{\text{福-铁}} \geq 50\text{mm}$, 或 $H_{\text{清库}} < 130.65\text{m}$, 则辽河有错峰要求时错峰, 错峰流量按 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。

2) 若 $\sum R_{\text{清河}} \geq 120\text{mm}$ ，或 $\sum R_{\text{清·南-开}} \geq 100\text{mm}$ ，或预报 $Q_{\text{清·南-开}} \geq 1900\text{m}^3/\text{s}$ ，或 $H_{\text{清库}} < 130.65\text{m}$ ，则清河有错峰要求时关闸错峰。

3) 若 $200\text{mm} \leq \sum R_{\text{清库}} < 260\text{mm}$ ，或 $H_{\text{清库}} \geq 130.65\text{m}$ ，则溢洪道开 2 孔泄洪，输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。

4) 若 $260\text{mm} \leq \sum R_{\text{清库}} < 290\text{mm}$ ，或 $H_{\text{清库}} \geq 132.20\text{m}$ ，则溢洪道开 4 孔泄洪，输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。

5) 若 $\sum R_{\text{清库}} \geq 290\text{mm}$ ，或 $H_{\text{清库}} \geq 133.70\text{m}$ ，则溢洪道 6 孔全开，输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。

4.3.4 初拟的预报调度方式之四

采用净雨、水位双指标控制，辽河错峰流量为 $300\text{m}^3/\text{s}$ ，当清河水库坝址以上流域累积净雨大于 200mm 时，清河有错峰任务时错峰，错峰流量为 0。

初拟的预报调度方式之四及其规则如下：

1) 若 $\sum R_{\text{清河}} < 200\text{mm}$ ，输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。

2) 若 $200\text{mm} \leq \sum R_{\text{清库}} < 260\text{mm}$ ，或 $H_{\text{清库}} \leq 134.50\text{m}$ ，则清河有错峰任务时关闸错峰。或当 $H_{\text{清库}} > 134.50\text{m}$ ，则溢洪道开 2 孔泄洪，输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。

3) 若 $260\text{mm} \leq \sum R_{\text{清库}} < 290\text{mm}$ ，或 $H \geq 131.30\text{m}$ ，则溢洪道开 2 孔泄洪，输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。或当 $H_{\text{清库}} \geq 132.10\text{m}$ ，则溢洪道开 4 孔泄洪，输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。

4) 若 $\sum R_{\text{清库}} \geq 290\text{mm}$ ，或 $H_{\text{清库}} \geq 133.50\text{m}$ ，则溢洪道 6 孔全开，输水道放 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。

4.4 预报调度规划方式的调洪结果

4.4.1 调洪计算方法

调洪计算方法采用陈守煜教授于 1980 年提出的四阶龙格——库塔数值解法，与试算法和图解法相比，具有计算速度快，节省机时，便于计算机实现等特点，适应清河水库陡涨陡落的洪水过程，满足计算精度。

4.4.2 调洪计算与成果

以“5381”洪水为典型设计，以“9571”洪水校核，依据初拟的预报调度方式，及水库坝址至开原水文站、辽河石佛寺水文站的洪水传播时间，考虑洪水的不同组合，对清·南

~开区间设计、清河水库相应 $P=10\%$ 、 $P=5\%$ 、 $P=2\%$ 、 $P=1\%$ 及清河水库设计 $P=5\%$ 、 $P=2\%$ 、 $P=1\%$ 、 $P=0.1\%$ 、 $P=0.01\%$ 频率的设计洪水进行了调洪计算，同时对辽干区间设计清河水库相应 $P=5\%$ 频率的设计洪水进行了调洪计算。将调洪计算结果的出流过程演进至开原、石佛寺站进行组合（其中清河水库至开原水文站的 $t_{\text{全}}$ 为 2 小时，南城子水库至开原水文站的 $t_{\text{全}}$ 为 6 小时，清河水库至石佛寺水文站的 $t_{\text{全}}$ 为 36 小时），得出 1995 校核典型年不同调度方式的调洪成果和 1953 设计典型年不同调度方式的调洪成果，见表(4.22)和表(4.23)。

依据 1995 典型年不同调方式的调洪成果，从中筛选出了 8 个具有代表性的评价指标，见表(4.24)。

基于权权的多目标决策防洪预报调度方式优选

表 4.22 1995 典型年不同调度方式的调洪成果表
Tab.4.22 different dispatch way of flood in 1995

洪水组合 P%	方式一				方式二				方式三				方式四			
	Z _M (m)	Q _{KY} (m ³ /s)	Q _{SFS} (m ³ /s)	Z _M (m)	Q _{KY} (m ³ /s)	Q _{SFS} (m ³ /s)	Z _M (m)	Q _{KY} (m ³ /s)	Q _{SFS} (m ³ /s)	Z _M (m)	Q _{KY} (m ³ /s)	Q _{SFS} (m ³ /s)	Z _M (m)	Q _{KY} (m ³ /s)	Q _{SFS} (m ³ /s)	
0.01	137.91			137.70			137.91			137.94						
0.1	135.91			135.67			135.91			135.93						
2	134.61			134.61			134.14			134.67						
5	134.57			134.57			134.38			134.50						
1	134.77	6800		134.76	6790		134.71	6780		135.10	6610					
2	134.52	5740		134.52	5740		134.05	5640		134.64	4690					
5(清)	134.49	3170		134.49	3170		134.31	3170		134.49	3470					
(辽)	134.46		4780	134.46		4780	134.28		4780	133.99		4820			4850	
10	134.28	2150		134.28	2150		133.90	2150		133.90	2150					

注 1): Z_M: 最高洪水位; Q_{KY}: 开原水文站洪峰组合值; Q_{SFS}: 石佛寺水文站洪峰组合值

表 4.23 1953 典型年不同调度方式的调洪成果表

Tab.4.23 different dispatch way of flood in 1953

洪水组合 P%	方式一				方式二				方式三				方式四			
	Z _M (m)	Q _{KY} (m ³ /s)	Q _{SFS} (m ³ /s)	Z _M (m)	Q _{KY} (m ³ /s)	Q _{SFS} (m ³ /s)	Z _M (m)	Q _{KY} (m ³ /s)	Q _{SFS} (m ³ /s)	Z _M (m)	Q _{KY} (m ³ /s)	Q _{SFS} (m ³ /s)	Z _M (m)	Q _{KY} (m ³ /s)	Q _{SFS} (m ³ /s)	
0.01	137.94			137.74			137.94			137.89						
0.1	136.13			135.91			136.13			136.10						
2	134.42			134.33			134.42			134.72						
5	133.95			133.95			133.95			134.63						
1	134.21	7060		134.14	7050		134.21	7060		134.24	7010					
2	134.33	5640		134.33	5640		134.33	5640		134.88	4780					
5(清)	133.78	3760		133.78			133.78	3760		134.52	3440					
(江)	133.93		5130	133.93		5130	133.93		5130	134.31		5130			5210	
10	133.89	2210		133.89	2210		133.79	2350		133.79	2350					

注 1): Z_M: 最高洪水位; Q_{KY}: 开原水文站洪峰组合值; Q_{SFS}: 石佛寺水文站洪峰组合值

表 4.24 拟用的不同调度方式的评价指标表
tab 4.24 different dispatch way of Evaluating indicator

调度方式		水库设计 区间相应				区间设计 水库相应		
		0.01%	0.1%	2%	5%	1%	2%	5%(辽)
方式一	Z _M (m)	137.91	135.91	134.61	134.57			
	Q _{KY} (m ³ /s)					6800	5740	
	Q _{SFS} (m ³ /s)							4780
	H _差 (m)	6.54						
方式二	Z _M (m)	137.70	135.67	134.61	134.57			
	Q _{KY} (m ³ /s)					6790	5740	
	Q _{SFS} (m ³ /s)							4780
	H _差 (m)	6.45						
方式三	Z _M (m)	137.91	135.91	134.14	134.38			
	Q _{KY} (m ³ /s)					6780	5640	
	Q _{SFS} (m ³ /s)							4820
	H _差 (m)	6.54						
方式四	Z _M (m)	137.94	135.93	134.67	134.50			
	Q _{KY} (m ³ /s)					6610	4690	
	Q _{SFS} (m ³ /s)							4850
	H _差 (m)	6.56						

注 1): Z_M: 最高洪水位; Q_{KY}: 开原文水文站洪峰组合值; Q_{SFS}: 石佛寺水文站洪峰组合值;
H_差: 调洪末水位与汛限水位 129.00m 的差。

5 基于熵权的水库防洪预报调度方式多目标模糊优选

5.1 水库多目标调度的模糊优选模型

水库及水库群防洪实时预报调度方案的选择,是属于复杂水利系统多目标、多阶段、模糊优化决策问题。对于这样的复杂问题,而且要求决策时间必须尽量短,即占机时间不能过长,传统的动态规划原理及求解有一定难度,实践证明,应用陈守煜教授提出的“多目标、多阶段模糊优选模型的基本原理及解法”可以满足上述要求。这种方法把传统的动态规划原理与技术和模糊优选原理及模型有机的结合起来。它是在有限的可行决策域内寻求满意决策,而不是从数学角度探求所谓的最优值。是一种有效的求解多目标、多阶段模糊优化问题的途径。

方案优选有两个基本性质,一是模糊性,即“优”是一个模糊概念,没有明确的外延,可用于对模糊集合“优”的隶属程度来表示某方案的优越程度,称为方案的优属度。二是相对性,其涵义是,方案的优越程度仅仅是对于参加评优的 n 个方案组成的方案集而言。

基于陈守煜教授的模糊优选原理^[23, 26],假设有满足防洪安全的约束条件的可供优选的 n 个预报调度方式方案,需根据 m 个目标识别优劣,则有 n 个方案、 m 个评价指标的决策特征值矩阵

$$X = (x_{ij}) \quad (5.1)$$

式中: x_{ij} 为方案 j 指标 i 的特征值, $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$ 。

在实际决策中,防洪调度的评价指标通常分为越大越优、越小越优和中间型三类,各类指标对优的相对隶属度计算公式分别为

越大越优型

$$r_{ij} = (x_{ij} - x_{i\min}) / (x_{i\max} - x_{i\min}) \quad (5.2)$$

越小越优型

$$r_{ij} = (x_{i\max} - x_{ij}) / (x_{i\max} - x_{i\min}) \quad (5.3)$$

中间型

$$r_{ij} = 1 - |x_{ij} - x_i^*| / \max_{i=1,2,\dots,n} |x_{ij} - x_i^*| \quad (5.4)$$

其中: $x_{i\max}$ 表示方案集中指标 i 的最大特征值; $x_{i\min}$ 表示方案集中指标 i 的最小特

征值： x_i^* 表示评价指标 i 的理想特征值。

根据公式(5.2)~(5.4)可将评价指标特征值矩阵 X 转换为其对优的相对隶属度矩阵

$$R = (r_{ij}) \quad (5.5)$$

式中： r_{ij} 为方案 j 指标 i 的特征值对优的相对隶属度。

假设评价指标的综合权向量为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ ，满足 $\sum_{i=1}^m w_i = 1, 0 \leq w_i \leq 1$

在多方案优选中，其比较仅限于可供选择的 n 个方案中，因此具有相对性。在可供选择的 n 个方案中，定义相对最优方案隶属度与相对最劣方案隶属度分别为

$$G = (g_1, g_2, \dots, g_m)^T, D = (d_1, d_2, \dots, d_m)^T, \text{ 其中 } g_i = \bigvee_{j=1}^n r_{ij}, d_i = \bigwedge_{j=1}^n r_{ij}.$$

根据加权广义欧式权距离与最小二乘法准则可得方案 j 的相对优属度 u_j 。

$$u_j = \left\{ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (g_i - r_{ij})^2]}{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - d_i)^2]} \right\}^{-1} \quad (5.6)$$

5.2 熵权法确定综合权重

熵”(entropy)一词源自希腊语，表示变化的容量，在1856年由德国物理学家克劳修斯(K. Clausius)为了将热力学第二定律格式化而创立^[14]。这一举措为之后熵理论的蓬勃发展奠定了基础。在熵概念引入近百年之后，1948年，信息论的创始人申农(C.E.Shannon)把通讯过程中信号源的信号不确定性称为信息熵，并给出了信息熵的计算公式^[10]。信息熵是物理学熵概念的泛化，它的引入不仅解决了信息的定量描述难题，而且为熵概念的进一步泛化奠定了基础。在信息论的带动下，熵概念又进入了概率论、通信和计算机领域。20世纪后半叶，以电子计算机为代表的信息革命，推进了与信息密切相关的熵概念史无前例的大扩展。熵定律被伟大科学家爱因斯坦称为“整个科学的首要法则”。这一著名预言，现已逐在自然科学、社会科学及人体学等各领域里得到证实。人们称熵为新的世界观、真理，是现代文明观的科学基础。熵理论具有很大的发展前途，它在过去给人类带来了巨大的进步，同样也必将在未来给人类带来更大的利益，21世纪将是熵理论发展的又一座里程碑。而到现在为止，熵与模糊集理论在洪水预报及水库调度中的应用研究已经从最初的热力学熵到现在的信息熵。

熵权法的基本思想是认为指标的差异程度越大越重要,则权重相应也越大。计算时如何实现各指标间熵值与熵权的转换是关键环节,其直接影响着各指标数学权重的正确性,进而关系着方案评价的合理性、防洪的安全性。已有的由熵值计算熵权的计算式^{[20][21]},当熵值处于一定区间时,其相互间的微小差别可能引起熵权成倍数变化,本文将通过引入熵权法确定各目标的数学权重,将其与经验权重线性组合,基于模糊优选模型进行多方案优选。

在信息论中,熵是系统无序状态的度量。熵权,反应了各个指标向决策者提供的有用信息量。对于可行的 n 个水库预报调度方式方案,依据不同指标间具体数据的变异程度,可根据熵的思想来度量 m 个评价指标的信息效用值,从而确定各指标的熵权。

熵权法确定综合权重的计算步骤

(1) 共建 n 个可行方案, m 个评价指标的特征矩阵 $Y = (y_{ij})$, 其中 $i = 1, 2, \dots, m$;

$j = 1, 2, \dots, n$ 。

(2) 应用(5.2)~(5.4), 将评价指标特征值矩阵归一化处理得矩阵 $B = (b_{ij})$

(3) 根据熵的定义, 确定评价指标 i 的熵值

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \left[\sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \right] \quad (5.7)$$

$$f_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}} \quad (5.8)$$

其中 $0 \leq H_j \leq 1$, 为使 $\ln f_{ij}$ 有意义, 假定 $f_{ij} = 0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$; $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$ 。

(4) 利用熵值计算评价指标 i 的熵权

$$W_{ei} = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i} \quad \text{其中 } i = 1, 2, \dots, m \quad (5.9)$$

(5) 计算评价指标 i 的权重

$$W_i = \frac{W_{ai} \times W_{ei}}{\sum_{i=1}^n W_{ai} \times W_{ei}} \quad (5.10)$$

式中 W_{ai} 为评价指标 i 的经验权重。

5.3 熵权在清河水库防洪预报调度方式优选中的应用

本文依据多级错峰要求选 10 个指标作为评价指标，即清·南~开区间设计 $P=10\%$ 、 $P=5\%$ 、 $P=2\%$ 、 $P=1\%$ ，水库同频率相应，开原水文站洪水组合流量越小越好；清河水库设计 $P=5\%$ 、 $P=2\%$ 、 $P=0.1\%$ 、 $P=0.01\%$ ，清·南~开区间同频率相应，库水位越低越好，调洪末水位越接近汛限水位越好；四库~石区间设计 $P=5\%$ ，诸水库同频率相应，石佛寺水文站洪水组合流量越小越好。其中两个指标灵敏度不高，现取 8 个指标作为评价指标，即清·南~开区间设计 $P=2\%$ 、 $P=1\%$ ，水库同频率相应；清河水库设计 $P=5\%$ 、 $P=2\%$ 、 $P=0.1\%$ 、 $P=0.01\%$ ，清·南~开区间同频率相应，调洪末水位越接近汛限水位越好；四库~石区间设计 $P=5\%$ 。

在满足水库洪水调度原则的条件下，本文对不同预报情势的洪水过程分别拟定了 4 个调度方式，以供决策选择。主要约束条件有清·南~开区间设计十年一遇洪水标准，水库同频率相应开原水文站洪水组合流量小于现状河道安全泄量 $1900\text{m}^3/\text{s}$ ；清·南~开区间设计五十年一遇洪水标准，水库同频率相应，开原水文站洪水组合流量小于设计河道安全泄量 $5000\text{m}^3/\text{s}$ ；清·南~开区间设计百年一遇洪防水标准，水库同频率相应，长大线清河铁路桥过流量不超过 $8000\text{m}^3/\text{s}$ ；辽河全区发生二十年一遇洪水标准，石佛寺水文站洪水组合流量小于 $5500\text{m}^3/\text{s}$ ；水库发生设计二十年一遇洪水标准，最高洪水位低于淹没水位 134.60m ；水库发生设计五十年一遇洪水标准，最高洪水位低于搬迁水位 134.8m ；水库发生实际千年一遇洪水标准，最高洪水位不得超过粘土心墙搞成 136.30m ；水库发生万年一遇洪水标准，最高洪水位小于 137.94m 。

以 1995 年典型放大的设计洪水进行校核，方案 $n=4$ ，指标 $P=8$ ，相应的评价指标矩阵为：

$$Y = \begin{bmatrix} 5740 & 6800 & 134.57 & 134.61 & 135.91 & 137.91 & 4780 & 6.54 \\ 5740 & 6790 & 134.57 & 134.61 & 135.67 & 137.70 & 4780 & 6.45 \\ 5640 & 6780 & 134.38 & 134.14 & 135.91 & 137.91 & 4820 & 6.54 \\ 4690 & 6610 & 134.50 & 134.67 & 135.93 & 137.94 & 4850 & 6.56 \end{bmatrix}$$

根据公式(5.2)~(5.4)，将评价指标特征值矩阵归一化处理得矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.11 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.05 & 0 & 0.11 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.095 & 0.105 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1.1 & 0.37 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由公式(5.7)、(5.8)计算得评价指标的熵值向量

$$H = (0.2131, 0.35, 0.42, 0.44, 0, 0, 0.5, 0)$$

由公式(5.9)得熵权向量

$$W_{ei} = (0.318, 0.283, 0.27, 0.261, 0.3725, 0.3725, 0.24, 0.372)^T$$

经专家和决策者评定指标权重, 指标中校核洪水位、搬迁水位和下游安全泄量权重大一些, 经验权向量

$$W_{ei} = (0.05, 0.1, 0.1, 0.2, 0.1, 0.2, 0.2, 0.05)^T$$

由公式(5.10)得权向量

$$W_i = (0.0526, 0.094, 0.09, 0.1726, 0.1232, 0.2464, 0.16, 0.062)^T$$

由公式(5.6)计算4种方案的相对优属度向量U

$$U = \begin{bmatrix} 0.1834 & 0.71 & 0.25 & 0.085 \end{bmatrix}$$

通过计算, 第二方案为满意方案, 即选择初拟的预报调度方式二为满意方案。

结论与展望

结论

为了保证清河水库安全,保持清河水库主汛限制水位 129.00m 不变,本文从清河水库选择最优的调度方式出发,研究了清河水库原设计水库产汇流方式及特征值,采用蓄满产流模型和“DHF”产流模型对水库及区间洪水进行预报,选用净雨、水位、流量作为水库防洪预报调度方式的判别指标,拟定四种洪水预报调度规划方式,四种规划方式分别为:方式一考虑水位控制指标,净雨为第一判别指标,水位和流量为第二判别指标。清河堤防现有防洪标准只有十年一遇,远远小于设计值五十年一遇标准,则从实际出发,保清河全区十年一遇标准洪水不决堤。当辽河全区发生二十年一遇标准洪水时,确保辽河组合流量小于堤防安全泄量 $5500\text{m}^3/\text{s}$ 。在控制运用中,当第一指标出现时,做好闸门开启准备,只有当第二指标出现时闸门方可运作;方式二不考虑水位控制指标,其它同方式一;方式三考虑水位控制指标,因水库至石佛寺洪水传播时间长,所以水库关闸错峰不会对辽河产生明显效果,为了安全及运用方便,辽河错峰流量按 $300\text{m}^3/\text{s}$ 计,为清河堤防错峰时,错峰流量仍然为 0,其它同方式一;方案四采用净雨、水位双指标控制,辽河错峰流量为 $300\text{m}^3/\text{s}$,当清河水库坝址以上流域累积净雨大于 200mm 时,清河有错峰任务时错峰,错峰流量为 0,运用四阶龙格——库塔数值解法,对拟定的预报调度方式进行调洪验算,对清·南~开区间设计、清河水库相应 $P=10\%$ 、 $P=5\%$ 、 $P=2\%$ 、 $P=1\%$ 及清河水库设计 $P=5\%$ 、 $P=2\%$ 、 $P=1\%$ 、 $P=0.1\%$ 、 $P=0.01\%$ 频率的设计洪水进行了调洪计算,同时对辽干区间设计清河水库相应 $P=5\%$ 频率的设计洪水进行了调洪计算。

本文采用基于熵权的多目标模糊优选原理,对清河水库 4 种防洪预报调度方式进行优选,以 1995 年典型放大的设计洪水进行校核,采用 8 个指标作为评价指标:水库发生万年一遇洪水标准,调洪末水位越接近汛限水位越好;清·南~开区间设计五十年一遇洪水标准,水库同频率相应,开原水文站洪水组合流量小于设计河道安全泄量 $5000\text{m}^3/\text{s}$;清·南~开区间设计百年一遇洪水标准,水库同频率相应,长大线清河铁路桥过流量不超过 $8000\text{m}^3/\text{s}$;辽河全区发生二十年一遇洪水标准,石佛寺水文站洪水组合流量小于 $5500\text{m}^3/\text{s}$;水库发生设计二十年一遇洪水标准,最高洪水位低于淹没水位 134.60m;水库发生设计五十年一遇洪水标准,最高洪水位低于搬迁水位 134.8m;水库发生实际千年一遇洪水标准,最高洪水位不得超过粘土心墙高程 136.30m;水库发生万年一遇洪水标准,最高洪水位小于 137.94m。计算得出 4 种方案的相对优属度向量 $U=(0.1834, 0.71, 0.25, 0.085)$,最终得出第二方案比较满意,可以在满足设计防洪安全前提下,保持主汛限水位 129.00m 不变,实现洪水资源充分利用的目标。

本文方法兼顾了决策者意愿偏好和客观数据属性，从而有效减少主观因素的影响。该方法计算简单、方便，结果合理。

展望

水库防洪预报调度方式是随着水文气象预报理论及技术发展而提出的水库防洪调度新理论，其设计和应用还处于研究阶段。本文在原有水库防洪调度理论研究基础上，针对辽河水库群复杂情况研究，取得一些初步成果。但水库群系统的洪水预报和水库调度是非常复杂的系统工程，还需从以下几个方面进一步开展研究工作：

(1) 今后需进一步研究汛限水位动态控制对下游防洪对象的风险。

(2) 本文应用熵权的方法对洪水预报调度方式进行优选，得出的结论为决策者提供更多的决策信息参考，取得洪水资源利用效益。但今后还需综合分析洪水预报方案及水库调度方式的各种因素误差所带来的风险。

参 考 文 献

- [1] 刘铁. 水电站水库优化调度研究现状与发展趋势[J]. 吉林水利, 2006, 292(10):34-36.
- [2] B. A. Faber, J. R. Stedinger, Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction(ESP) forecasts. Journal of Hydrology. 2001, 249:113-133.
- [3] A. Tilmant, E. H. Faouzi, M. Vanelooster. Optimal operation of multipurpose reservoirs using flexible stochastic dynamic programming. Applied Soft Computing. 2002, 2:61-74.
- [4] Nien-Sheng Hsu, Chih-Chiang Wei. A multipurpose reservoir real-time operation model for flood control during typhoon invasion. Journal of Hydrology. 2007, 336: 282-293.
- [5] 王本德, 张力. 综合利用水库洪水模糊优化调度[J]. 水利学报, 1993(1):35-40.
- [6] 王兴菊, 赵然杭. 水库多目标优化调度理论及其应用研究[J]. 水利学报, 2003(3):104-109.
- [7] 李玮, 郭生练, 刘攀等. 水库汛限水位动态控制方法研究及其应用[J]. 水力发电, 2006, 32(3): 8-12.
- [8] 李玮, 郭生练, 郭富强等. 水电站水库群防洪补偿联合调度模型研究及应用[J]. 水利学报, 2007, 38(7):826-831.
- [9] 王本德, 周惠成等. 水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [10] 曹永强. 汛限水位动态控制方法研究及其风险分析:(博士学位论文). 大连:大连理工大学, 2003.
- [11] 董四辉. 水库防洪预报调度及灾情评价理论研究与应用:(博士学位论文). 大连:大连理工大学, 2005.
- [12] 周惠成, 张改红, 王本德等. 基于防洪预报调度调整水库汛限水位的研究[J]. 水力发电, 2006, 32(5):14-17.
- [13] 王本德, 张静. 水库防洪分类调度方式设计探讨[J]水利发电学报. 2008, 27(5):16-22.
- [14] 陈建珍, 赖志娟. 熵理论及其应用[J]. 江西教育学院学报, 2005, 26(6):9-12.
- [15] A. G. Wilson. The Use of the Concept of Entropy in System Modeling. Operational Research Quarterly, 1970, 21(2):247-265.
- [16] Smith, R. P. Equation of State and the Thermodynamic Properties of Liquid polymers Application of the Hirai-Eyring Model. J. Polym Sci Part A-2 Polym Phys 8(8), 1970:1337-1360.

- [17] Roman-Roldan, R., Bemaola-Galvan, P., Oliver, J. L. Application of information theory to DNA sequence analysis: A review. *Pattern Recognition*, 1996, 29(7):1187-194.
- [18] 李容等. 最大熵方法在系统可靠性 Bayes 评估中的应用[J]. *航天控制*, 1999, 1:75—80.
- [19] Jaynes ET. *Information theory and statistics mechanics*. *phys. Rev*, 1957, 106(3):39-48.
- [20] 邱苑华. *管理决策与应用熵学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [21] 张先起, 梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. *水利学报*, 2005, 36(9):1057-1061.
- [22] 周惠成, 张改红, 王国利. 基于熵权的水库防洪调度多目标决策方法及应用[J]. *水利学报*, 2007, 38(1): 100-106.
- [23] 周惠成, 梁国华, 等. 水库洪水调度系统通用化模板设计与开发[J]. *水科学进展*, 2002, 13(2): 43-48.
- [24] 陈守煜. 防洪调度多目标决策理论与模型[J]. *中国工程科学*, 2000, 2(3): 47-52.
- [25] 王本德, 于义彬, 等. 水库洪水调度系统的模糊循环迭代模型及应用[J]. *水科学进展*, 2004, 15(2): 233-237.
- [26] 陈守煜. *工程模糊集理论与应用*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [27] 周惠成, 梁国华, 等. 基于网络的水库群防洪调度系统应用研究[J]. *大连理工大学学报*, 2002, 42(3): 366-370.
- [28] 邹进, 张勇传. 一种多目标决策问题的模糊解法及在洪水调度中的应用[J]. *水利学报*, 2003, (11): 119-122.
- [29] 周惠成, 闰骏霞, 王本德. 洪水预报误差对水库防洪调度的影响[J]. *东北水利水电*, 2005, 23(9):30-32.
- [30] ChangFi-John, ChenLi. Real-coded genetic algorithm for rule-based flood control reservoir management. *Water Resources Management*. 1998, 12(3): 185-198.
- [31] 王兆红, 邱苑华, 梁美容. 多指标决策的熵权优化模型在使用后评估中的应用研究[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2006, 6(3):28-31.
- [32] 王栋, 朱元生. 最大熵原理在水文水资源科学中的应用[J]. *水科学进展*, 2001, 12(3):75-80.
- [33] Sonuga Jo. Principle of maximum entropy in hydrologic frequency analysis[J]. *J Hydrol*, 1972, 17:177-191.
- [34] Sonuga Jo. Entropy Principle applied to the rainfall-runoff process[J]. *Hydrol*, 1976, 30:81-94.
- [35] SinghVP, SinghK. Derivation of the gamma distribution by using the Principle of maximum entropy (POME) [J]. *Water Resour Bulletin*, 1985, 21(6):941-952.
- [36] 黄克中, 张金阳. 水文频率线型选优的最小信息熵准则[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 1996, 35(增刊):8-14.

- [37] 张明. 最大信息熵理论在地貌瞬时单位线中的应用[J]. 水文, 2000, 20(3):13-14.
- [38] 李元章, 丛树铮. 熵及其在水文频率计算中的应用[J]. 水文, 1985, (1):22-26.
- [39] SinghVP, SinghK. Parameter estimation for log-pearson type III distribution by POME[J]. J Hydraul Eng, 1988, 114(11):112-122.
- [40] SinghVP, GuoH. Parameter estimation for 2-parameter generalized Pareto distribution by POME[J]. Stochast Hydrol Hydraul, 1997, 11(3):211-227.
- [41] 李继清, 张玉山, 王丽萍, 纪昌明. 应用最大熵原理分析水利工程经济效益的风险[J]. 水科学进展, 2003, 14(5):626-630.
- [42] 陈守煜. 多阶段多目标决策系统模糊优选原理及应用[J]. 水利学报, 1990, 1(3): 1-10.
- [43] 王本德. 水库模糊优化调度[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1990.
- [44] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用[M]. 大连理工大学出版社, 1994.
- [45] 大连理工大学, 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 水库防洪预报调度方法与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社.
- [46] 王莲芬, 许树柏. 层次分析引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
- [47] 李学全, 李松仁, 韩旭里. AHP 理论与方法研究一致性检验与权重计算[J]. 系统工程学报, 1997, 2:111-117.
- [48] 郭风鸣. 层次分析法模型选择的思考[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 9:43-49.
- [49] 徐泽水. 判断矩阵一致性改进的一种实用方法[J]. 系统工程, 1998, 16(6):61-63.
- [50] 章志敏, 魏翠萍, 马俊. 层次分析中的一种新的排序方法及其性质[J]. 系统工程学报, 1997, 12(4):109-114.
- [51] 刘豹, 群判断与层次分析[J]. 系统工程学报, 1991, 6(2):34-38.
- [52] 王应明, 群组 AHP 最小二乘排序及其算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 1997, 6: 76-80.
- [53] 李元左. 广义判断下的群组决策方法[J]. 系统工程, 2000. 18(2):76-80.
- [54] S. I. Gass, T. Rapsch. A note on synthesizing group decisions[J]. Decision Support Systems, 1998, (22):59-63.
- [55] H. A. Donegan, F. J. Dodd, T. B. M. McMaster. A new approach to AHP decision making, Operations[J]. Research/Management Science, Vol. 33. N. 1, January-February 1993.
- [56] 舒康, 梁镇韩, AHP 中的指数标度法[J]. 系统工程理论与实践, 1990, 1:6-8.
- [57] 刘树林, 邱莞华, 张瑞清. 再论 AHP 中的指数标度法[J]. 系统工程理论与实践, 1995, 10:78-80.
- [58] 肖人彬, 费奇, 陈班. 广义层次分析[J]. 控制与决策, 1993. 11
- [59] 李元左. 关于广义判断下的 AHP 法[J]. 系统工程理论与实践, 1994, 5:8-16
- [60] 李元左. 广义判断下 UP 的一致性检验与可接受性的进一步探讨[J]. 系统工程理论与实践, 1995, 10: 71-77.
- [61] 陈守煜. 工程水文水资源系统模糊集分析理论与实践[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1998.

- [62] Robert L. Armacost, Michael A. Mullens, William W. Swart, An AHP framework for prioritizing customer requirements in QFD: An industrialized housing application, operations Research/Management Science, Vol. 35, N. 4, July-August 1995.
- [63] Ching-Hsue Cheng, Don-Lin Mon, Evaluating weapon system by analytical hierarchy process based on fuzzy scales, Fuzzy Scales and System, 63:1-10, 1994.
- [64] 谭清美. 世界银行贷款区域综合扶贫项目立项决策研究[J]. 河海大学学报, 1997, 11:56-59.
- [65] 傅荣林, 秦寿康, 陈湛本. 兼容多个综合评价方案及其分类的数学模型[J]. 系统工程学报, 1999, 14(2):179-183.
- [66] 朱道元. 大系统建模中的主成分分析法[J], 系统工程理论与实践, 1991. 1:68-72.
- [67] 刘令, 毛定祥, 因子分析方法在上市公司综合财务分析与评价中的应用[J], 系统工程, 1997. (6):11-15.
- [68] 周泰文, 王晓星, 刘后邢. 模糊数学基础简明教程[M], 武汉:华中理工大学出版社, 1993.
- [69] 王道勇, 模糊综合评判的失效与消除[J], 系统工程理论方法应用, 1998, 7(12):66-69.
- [70] 原思聪, 模糊综合评价方法在个股选择中的应用[J]. 系统工程, 1995, 13(5):69-72.
- [71] 邓勤, 秦建侯, 李隆弟. 水资源质量模糊综合评价中的一些问题探讨[J]. 环境科学学报, 1990, 10(2):257-262.
- [72] 陈守煜, 陈晓冰. 水质模糊评价理论与模型[J]. 环境科学学报, 1991, 11(1):1-8.
- [73] 魏权龄, 评价相对有效性的 DEA 方法[M]. 北京:中国人民大学出版社, 1988.
- [74] 王应明, 傅国伟. 运用 DEA 方法进行聚类分析[J]. 控制与决策, 1993. 8(2):86-90.
- [75] 李光金, 刘永清. DEA 有效决策单元判断与排序的新方法[J]. 系统工程理论与实践, 1996, 8:37-42.
- [76] 李光金, 刘永清. 基于多目标规划的 DEA[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 3:16-22.
- [77] 成思危, 管理科学的现状与展望[J]. 管理科学学报, 1998, 1:1-6.
- [78] 张学文, 马力. 熵气象学[M]. 北京:气象出版社, 1992.
- [79] 宋华岭, 广义与狭义管理熵理论_管理学的新研究领域[J]. 中国煤炭经济学院学报, 2002, 3:45-50.
- [80] 阎植林. 管理决策中的熵理论及应用研究[D]. 北京航空航天大学博士学位论文, 1996.
- [81] 鲁晨光, 投资组合的熵理论和信息价值[M]. 北京:中国科技大学出版社, 1997.
- [82] 冯瑞. 熵[M]. 北京:科学出版社, 1992.
- [83] 符保龙, 韦文惠, 陈如云. 基于熵权的模糊综合分析法在空气质量评价中的应用柳州[J]. 职业技术学院学报, 2007, 7(2): 83-86
- [84] 闫文周, 顾连胜. 熵权决策法在工程评标中的应用[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2004, 36(1):
- [85] 陶菊春, 吴建民. 综合加权评分法的综合权值确定新探[J]. 系统工程理论与实践, 2001,

21(8):43—48.

[86] 王珊珊,张江山.基于熵权的多目标决策-理想点在山仔水库营养化评价中的应用[J].环境科学与管理,2007,32(1):187-190.

[87] 张先起,梁川,刘慧卿.基于熵权的属性识别模型在地下水水质综合评价中的应用[J].四川大学学报(工程科学版),2005,37(3):28-31.

[88] 李济,李岩,李德峰.基于改进 AHP 法定权的模糊优选模型在地下水水质评价中的应用[J].华北水利水电学院学报,2002,23(2):4—6.

[89] 张斌,雍歧东,肖芳淳.模糊物元分析[M].北京:石油工业出版社,1997.

[90] 陈守煜,刘金禄,伏广涛.模糊优选逆命题的解法及在防洪调度决策中的应用[J].水利学报,2002,3:59-63.

致 谢

本文是在导师王本德教授的悉心指导下完成的。从论文的选题、研究到论文撰写修改都得到了王老师的耐心指导和帮助。在论文写作修改过程中，我不但从老师那里学会了知识总结还懂得了做学问的严肃认真。在三年多的学习生活中，王老师严谨的治学态度、广博的知识和孜孜不倦的工作热情给我留下了深刻的印象，耳濡目染使我受益匪浅。在此，向我的导师王本德教授表示我由衷的感谢和深深的敬意。另外，在工程硕士的学习和撰写毕业论文过程，清河水库管理局的领导和同志们给了我很大的帮助和支持，尤其是副局长杨明同志和供水处的领导和同志们，可以这样说，我能顺利地完成学业和撰写毕业论文，与他们的大力支持和鼓励是分不开的，在此向他们表示衷心的感谢。