

# 水库汛限水位

## 计算理论与方法

曹升乐 等 著

水利部成都山地水土保持研究所 编  
中国水利水电出版社 北京 100044



责任编辑：孙月平

E-mail: nyp@waterpub.com.cn



**高济阳**，1960年8月生，工学博士，教授，国际水文计划中国国家委员会委员，高等学校水利水电类教学指导委员会委员，山东水利学会副理事长，《水文》杂志编委，《山东水利》杂志编委会副主任。现任山东大学土建与水利学院院长。近年来主持完成了国家“863”项目子题，自然科学基金项目等10余项，多次获得省部级奖励，发表科研论文60余篇。



**张良**，男，汉族，1963年7月生，高级工程师。1986年大学毕业后，一直在山东省防汛部门从事防汛和水利管理工作，对水库洪水控制运用和洪水资源化有一定研究，发表了多篇有关论文。



**张益中**，男，1964年3月生，济南市水利局高级工程师，1984年参加工作。主要从事水利工程建设管理和防汛工作。其负责研究的“济南市小清河流域洪水预报调度系统研究”课题，获2003年山东省科学技术进步三等奖。

ISBN 7-5084-2165-5



9 787508 421650 >

ISBN 7-5084-2165-5 / TV · 497

定价：19.00元

华北水利水电学院图书馆



209159211

TV679.1

C143

# 水库汛限水位

## 计算理论与方法

曹升乐 尹长文 安玉坤 著

SHUIKU XUNXIAN SHUIWEI  
JISUAN LILUN YU FANGFA



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

915921

### 图书在版编目 (CIP) 数据

水库汛限水位计算理论与方法/曹升乐, 尹长文, 安玉坤著. —北京: 中国水利水电出版社, 2004

ISBN 7-5084-2165-5

I. 水 ... II. ①曹 ... ②尹 ... ③安 ... III. 水库—防洪—水位—计算 IV. TV62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 052801 号

书 名	水库汛限水位计算理论与方法
作 者	曹升乐 尹长文 安玉坤 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a> E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a> 电话: (010)63202266(总机)、68331835(营销中心) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32 开本 5.875 印张 132 千字
版 次	2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—2500 册
定 价	19.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



## 内 容 提 要

水库兴利与防洪是一对尖锐对立的矛盾，如汛期防洪限制水位过高，则利于兴利而不利于防洪；反之，则利于防洪而不利于兴利。为解决这一对矛盾，本书从设计暴雨的计算理论入手，提出了设计暴雨过程线的概念，建立了设计暴雨的计算理论与方法，并通过实例详细说明了其计算过程。为了根据流域的设计暴雨确定流域的设计洪水，较为系统地研究了流域产汇流计算理论与方法，从而给出了分期设计洪水。为了科学地确定汛限水位，提出了水库调度的“峰量综合控制法”，在此基础上确定了分期汛限水位及汛限水位过程线。在分析降雨变化特征后，在国内外首次提出了设计暴雨的动态变化及动态汛限水位过程线的概念、理论和确定方法。为了解决动态汛限水位过程线的实际应用，对多序列的展延问题进行了系统研究，提出了相应的展延理论与方法。最后对水库的预蓄与预泄问题进行了研究。随着经济与社会的快速发展，我国北方地区的水资源短缺已成为制约经济与社会发展的瓶颈，而在保证水库防洪安全的前提下，如何提高兴利效益是解决水资源短缺的一个重要途径。本书就是针对如何较好地解决水库兴利与防洪的矛盾，使水库发挥最大的经济效益，缓解水资源危机而著的。

本书可供从事水利计算专业的技术及管理人员使用，同时也可作为大学本科以上水利水电类及相关专业的教材。



## 前 言

目前,我国北方大部分地区水资源危机日益加剧,水资源已成为制约社会与经济发展的瓶颈。随着社会与经济的快速发展,水资源的需求量还会不断增加,供需矛盾将变得更为尖锐。水资源危机一是可通过调用客水缓解;二是可充分利用当地水,减少浪费,使其发挥最大的效益。而水库作为利用当地地表水的重要手段,理应发挥更大的兴利作用。水库一方面承担防洪任务,另一方面又承担兴利任务,而且防洪与兴利又是一对尖锐对立的矛盾,而矛盾的焦点就是在汛期水库运行时应采用怎样的汛限水位。采用的汛限水位高,有利于兴利而不利于防洪;采用的汛限水位低,则有利于防洪而不利于兴利。我们的目的就是怎样合理地确定水库汛限水位,使水库在满足防洪安全保证率的基础上,最大限度地多蓄水兴利。因此,加强水库汛限水位计算理论与方法的研究十分必要。

当前水库运行方面存在的主要问题是:在汛期,水库采用一个(有时几个)固定的汛限水位,当大暴雨发生在汛初时,为了安全常常不敢蓄水,而到汛末时常因无大的降水而又蓄不上水,使水库只能满足防洪安全,而达不到多蓄水兴利的目的。为了合理地确定水库的汛限水位、保证在防汛与兴利相协调的基础上充分发挥水

库的兴利效益，在国家防汛抗旱总指挥部办公室和山东省防汛抗旱指挥部办公室的直接领导下，结合门楼水库的实际情况，我们开展了水库汛限水位确定理论与方法的研究。研究内容主要包括：流域设计暴雨计算理论与方法；流域产汇流计算模型；水库调度方法；水库汛限水位过程线及动态水库汛限水位过程线的概念、理论与确定方法；时段降水量序列的展延方法；预蓄与预泄和水库汛限水位确定方法等。本书对上述理论与方法作了系统介绍。

在本书编写过程中，得到了山东省水利厅王松研究员、宋茂斌和郭广军高级工程师，山东大学负汝安副教授、王艳玲高级工程师，门楼水库管理局王志涛局长的大力帮助。山东大学研究生刘薇、王旭峰、朱文心、周飞参加了大量的分析计算工作。在此书出版之际，向他们一并表示深深的谢意。

由于水平所限，书中难免存在错误与不当之处，敬请批评指正。

作者

2004年4月

# 目 录



## 前 言

<b>第一章 概述</b> .....	1
第一节 引言 .....	1
第二节 门楼水库概况 .....	3
第三节 门楼水库开展汛限水位研究的必要性和可行性 .....	12
<b>第二章 流域产汇流计算模型研究</b> .....	23
第一节 基本资料的选用与处理 .....	23
第二节 产流（下渗）计算模型 .....	26
第三节 汇流计算的系统分析模型 .....	42
第四节 变动积分流域汇流计算数学模型.....	51
<b>第三章 流域设计暴雨计算方法研究</b> .....	68
第一节 现方法存在的问题 .....	68
第二节 实测数据的处理.....	79
第三节 设计暴雨计算方法 .....	85
第四节 旬设计暴雨计算方法分析、结果选用及其修正 .....	100
第五节 月设计暴雨计算及其结果分析 .....	106
<b>第四章 汛限水位研究与确定</b> .....	117
第一节 旬设计洪水的确定 .....	117

第二节	月设计洪水的确定 .....	123
第三节	峰量综合控制法研究 .....	124
第四节	汛限水位过程线的分析计算 .....	127
第五节	水库实用调度说明 .....	134
<b>第五章</b>	<b>水库动态汛限水位过程线研究.....</b>	<b>136</b>
第一节	动态汛限水位过程线的基本概念与计算公式 .....	136
第二节	降水量序列的展延 .....	140
第三节	水库动态汛限水位过程线的分析确定 .....	154
<b>第六章</b>	<b>其它有关问题研究.....</b>	<b>161</b>
第一节	降雨与洪水资料统计分析.....	161
第二节	尾水利用研究 .....	163
第三节	预蓄量的分析研究 .....	166
第四节	降水量序列展延模型研究.....	168
<b>参考文献</b> .....		<b>181</b>



# 概 述

## 第一节 引 言

按照通常的概念，对于某一日而言，要么它属于汛期，要么它属于非汛期，即非此即彼。事实上，汛期与非汛期不应该用某一时刻来划分，从非汛期到汛期和从汛期到非汛期都有一个过渡过程。我们知道，汛期与非汛期的定量标志是降水量的大小，而降水量的大小是由当地的气候条件所决定，随着气候的变化而变化。一般来讲，一年四季中气候变化是一个渐变过程，因此，从天气系统的变化成因来讲，降水量在一年四季中的变化应遵循一个渐变过程，也就是说描述降水量多少的汛期与非汛期也不应该有一个明显的分界点。对于我国北方大部分地区而言，8月中上旬可定义为汛期。用模糊数学的语言来讲，即8月中上旬中任一天隶属于汛期的程度为1.0；而1月上旬可定义为非汛期，即1月上旬中任一天隶属于汛期的程度为0。那么对于其它时间内的某一天，例如6月1日，它属于汛期还是非汛期，对于北方地区而言，6月1日应处于非汛期向汛期的过渡段上，它既不完全属于非汛期，也不完全属于汛期。在一年当中汛期与非汛期应遵循



下述变化过程：非汛期—过渡段—汛期—过渡段—非汛期。在水库防洪与兴利调度中，最重要的一个问题就是如何选定汛期水库防洪限制水位。当防洪限制水位确定得偏高时，有利于兴利而不利于安全。反之，则有利于安全而不利于兴利。

为了解决好安全与兴利两者之间的矛盾，确定好汛限水位就非常重要。如前所述，汛期与非汛期在一年当中是一个缓变过程，因此，反映汛期特性的防洪限制水位也应遵循这一变化规律，即汛期水库防洪限制水位应是一条随时间而变化的曲线，在汛期（隶属度为 1.0）该曲线最低，随着汛期向非汛期过渡，该曲线逐渐变高，到非汛期则达到正常蓄水位。

目前确定汛限水位的方法是，在实测序列中每年选一个最大值（不管发生在何月何日），根据该最大值序列进行频率计算推求设计暴雨（或洪水），再经过产汇流、调洪计算推求汛限水位。该汛限水位则作为整个汛期（一般 6~9 月）的防洪限制水位。该法的基本假定是，同一量级暴雨在汛期中任一时段发生的频率相同。事实上，暴雨是由气候条件所决定，在汛期中不同时刻同一量级暴雨发生的频率显著不同，越靠近主汛期，其发生的频率越高。可以设想，在 6~9 月期间，不同时间确定各自的设计暴雨（相同频率），根据各自的设计暴雨确定其相应时间的防洪限制水位，将不同时间的防洪限制水位连线，则得到全汛期水库防洪限制水位过程线。水库只要按照该过程线调度，则在汛期中任一时间具有相同的安全保证率，且实现尽可能多的兴利。

由于汛期中不同时期的降雨又存在一定的联系，从统计规律而言，若汛期中前一时期内发生的降雨相对较多，则后一时期内

发生降雨的频率会降低；反之，若前一时期内发生的降雨相对较少，则后一时期内发生降雨的频率会相应增大。因此，可以在统计理论的指导下，对汛限水位过程线进行动态修正。修正后的过程线则称为动态汛限水位过程线。水库若按动态汛限水位过程线调度，则可更好地发挥兴利效益。

综上所述，本书首先对设计暴雨的计算理论和方法进行系统介绍，并在此基础上对汛限水位过程线和动态汛限水位过程线的有关概念、理论、分析确定方法和实际应用问题作全面介绍，最后对有关问题进行讨论。

为了便于读者理解与掌握汛限水位确定的有关理论与方法，本书将以门楼水库的研究成果为背景，对有关理论与方法进行系统介绍。

## 第二节 门楼水库概况

### 一、流域自然地理概况

门楼水库地处大沽夹河支流内夹河下游，控制流域面积  $1079\text{km}^2$ 。大沽夹河为烟台市两大河流之一，由内、外夹河组成，控制总流域面积  $2296\text{km}^2$ 。内夹河又名清洋河，发源于栖霞市城南小灵山一带，流经栖霞市、蓬莱市和福山区，在福山区东北永福园与外夹河汇流，控制流域面积  $1224\text{km}^2$ 。门楼水库坝址以上流域地貌为低山丘陵区，其中山地面积占 80%，丘陵占 20%，地势为西南高、东北低，沿河两岸有少量的冲积平原。流域内著名山峰为艾山，海拔高度 817m，流域平均宽度 25.8km，

属单支河流，干流平均坡度 0.00178。流域内多系片麻岩，风化严重，土壤以砂壤土、壤土为主，其次为砂土。土壤透水性较好，肥力一般，适宜温带植物生长，森林覆盖率在 21.7% 以上。

## 二、流域内水利工程概况

门楼水库流域上游有庵里中型水库 1 座，控制流域面积  $150\text{km}^2$ ，总库容 7503 万  $\text{m}^3$ ，兴利库容 3810 万  $\text{m}^3$ 。门楼水库至庵里水库区间有小型水库 80 座，其中小（1）型水库 10 座，小（2）型水库 70 座，控制净流域面积  $192\text{km}^2$ ，总库容 4439.7 万  $\text{m}^3$ ，兴利库容 2827.3 万  $\text{m}^3$ 。

### 1. 门楼水库

门楼水库是烟台市最大的地表蓄水工程，承担着烟台市区防洪和供水双重任务。水库于 1958 年 11 月动工兴建，1960 年 11 月底基本建成主副坝、溢洪道、东放水洞等枢纽工程。以后又根据工程的运行情况进行了多次续建加固，最近一次大的除险加固一期工程是 1996 年 9 月开工建设、1999 年 10 月完工的，完成了主坝坝基混凝土防渗墙截渗工程和东副坝、西放水洞、溢洪道加固工程。水库设计总库容 2.02 亿  $\text{m}^3$ ，兴利库容 1.264 亿  $\text{m}^3$ ，死库容 0.1 亿  $\text{m}^3$ 。水库原设计灌溉面积 22.6 万亩，1982 年“三查三定”核定灌溉面积 21.1 万亩，1996 年水库加固设计灌溉面积 14.9 万亩。门楼水库自 1981 年开始向烟台市区供水，目前日供水能力约 13 万 t。水库枢纽包括主坝、副坝、溢洪道、放水洞、电站等工程。溢洪道宽 136.5m，设 12 孔  $10\text{m} \times 6\text{m}$  平面钢闸门，实用堰顶高程 25.38m，最大泄流量  $5378\text{m}^3/\text{s}$ 。放水洞共 2 个：东放水洞进口底高程 18.38m，最大泄量  $37.8\text{m}^3/\text{s}$ ；西放

水洞进口底高程 18.38m, 最大泄量  $21.3\text{m}^3/\text{s}$ 。电站共 2 个, 总装机容量 1500kW。门楼水库主要特性指标见表 1-1。

表 1-1 门楼水库主要工程指标情况表

工程地点		福山区门楼镇	主 坝	坝型	粘土心墙砂壳坝
流域面积 ( $\text{km}^2$ )		1079		坝长 (m)	1440
干流坡度		0.00178		坝顶高程 (m)	37.1
多年平均降雨量 (mm)		686.4		最大坝高 (m)	23.22
水位 (m)	校核 ( $P=0.01\%$ )	33.46	溢 洪 闸	型 式	露顶式溢洪闸
	设计 ( $P=1\%$ )	31.65		堰顶高程 (m)	25.38
	兴利水位	30.68		闸孔数	12 孔
	死水位	20.50		闸门尺寸 ( $\text{m}^2$ )	$10 \times 6$
库 容  (亿 $\text{m}^3$ )	总库容	2.02	放 水 洞	断面尺寸 ( $\text{m}^2$ )	$\phi 2.5/\phi 2.0$
	调洪库容	0.66		最大泄量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	37.8/21.3
	防洪库容 ( $P=1\%$ )	0.21	工 程 效 益	设计灌溉面积 (万亩)	14.9
	兴利库容	1.264		设计城市供水量 (万 $\text{t}/\text{d}$ )	17.1
	死库容	0.10		校核洪水时削峰	21.8%

注 表中数据为 1996 年加固设计结果。

## 2. 庵里水库

庵里水库位于清洋河上游, 距下游门楼水库约 47km, 是一座集防洪、农业灌溉、城市供水、养殖、发电等综合利用的中型水库。工程于 1958 年 6 月开工, 1960 年 8 月竣工。枢纽工程包括主坝、副坝、溢洪道、放水洞和电站。水库控制流域面积  $150\text{km}^2$ , 总库容 7503 万  $\text{m}^3$ , 兴利库容 3810 万  $\text{m}^3$ 。溢洪道为无



闸控制的开敞式溢洪道，全长 1720m，进口段底高程 114.94m，净宽 35m。放水洞进口底高程 100.44m，设计流量为  $5.34\text{m}^3/\text{s}$ 。电站位于放水洞末端，为坝后式电站，2 台机组，总装机容量 325kW。庵里水库主要特性指标见表 1-2。

表 1-2 庵里水库主要工程指标情况表

工 程 地 点		栖霞城北	大 坝	坝 型	粘土心墙砂壳坝
流域面积 ( $\text{km}^2$ )		150		坝长 (m)	737
干流坡度		0.0033		坝顶高程 (m)	121.1
多年平均降雨量 (mm)		682.5		最大坝高 (m)	28.17
水 位 (m)	校核 ( $P=0.1\%$ )	120.23	溢 洪 道	型 式	开敞式
	设计 ( $P=2\%$ )	118.40		长度 (m)	1720
	兴利水位	114.94		堰顶高程 (m)	114.94
	死水位	100.44		堰顶宽度 (m)	40
库 容 (万 $\text{m}^3$ )	总库容	7503	放 水 洞	型 式	砌石拱有压涵洞
	兴利库容	3810		断面尺寸 ( $\text{m}^2$ )	$1.23 \times 1.23$
	调洪库容	3433		设计流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	5.34
	死库容	260	工 程 效 益	设计灌溉面积 (万亩)	6
下游河道安全泄量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )		380		校核洪水削峰	63.7%

注 表中数据来自 2002 年加固可研报告。

### 3. 小型水库

门楼水库流域内共有小型水库 86 座，控制净流域面积  $206.5\text{km}^2$ ，其中小 (1) 型水库 12 座，小 (2) 型水库 74 座。在庵里水库以下至门楼水库之间共有小型水库 80 座，控制流域面积  $192\text{km}^2$ ，总库容 4439.7 万  $\text{m}^3$ ，兴利库容 2827.3 万  $\text{m}^3$ 。门

楼水库坝址以上主要水利工程情况见表 1-3。

### 三、实测水文资料

门楼水库于 1960 年 11 月建成蓄水，于 1960 年 5 月设立水文站，自 1961 年起至今有系统连续的雨量、水位、蒸发、流量观测资料。

门楼水库流域内共有 12 个国家雨量站，其中门楼、庙后、臧格庄（臧家庄）、邓格庄、栖霞五站为常年观测站，河东村、大庄头、引家疃、罗格庄、百佛院、邹家、金山店子七站为汛期观测站。栖霞和邹家 2 个雨量站位于庵里水库坝址以上，其它 10 个雨量站位于门楼水库—庵里水库区间内。1988 年，根据门楼水库防汛的需要，门楼、庙后、大庄头、臧格庄和庵里 5 个雨量站设为自动遥测雨量站。流域内各雨量站情况见图 1-1。

### 四、暴雨洪水特性

门楼水库流域属暖温带季风型大陆性气候，四季分明。因距海较近，同时具有明显的海洋性气候特征，年内温差较小。

#### 1. 暴雨特性

流域暴雨洪水多发生在夏季 7、8 两个月，季节特征明显，降水量的年际变化较大。根据流域内门楼、臧格庄、庙后、栖霞、邓格庄 5 个雨量站 1964~2001 年 38 年降雨量统计计算，流域多年平均降雨量 686.4mm，最大年降雨量发生在 1964 年，为 1047.8mm；最小年降雨量发生在 1986 年，为 383.6mm，丰枯比为 2.73。单站年降雨量最大的栖霞站，1967 年降雨量为 1386.4mm；最小的臧格庄站，1986 年降雨量为 344mm，丰枯

表 1-3 门楼水库坝址以上主要水利工程情况统计表

项 目	水库规模	数量	水库名称	所在地点	建成时间 (年、月)	流域面积 (km <sup>2</sup> )	库容(万 m <sup>3</sup> )		备 注
							总库容	兴利库容	
庵里水库	中型	1	庵里	庵里	1958.6	150.0	7010.0	3810.0	
庵里水库 坝址以上	小(1)型	2	主格庄	主格庄	1959.3	7.0	135.0	81.6	净流域面积 14.5km <sup>2</sup>
			王格庄	王格庄	1971.12	6.2	198.0	113.6	
		小计				13.2	333.0	195.2	
	小(2)型	4				3.1	80.2	39.8	
	合 计	6				16.3	413.2	235.0	
门楼水库 —庵里水库 区 间	小(1)型	10	西山庄	西山庄村西	1959.7	1.8	110.0	90.0	净流域面积 192km <sup>2</sup>
			磁山	小谷家村南	1981.12	2.3	120.0	89.7	
			黑石	张格庄镇	1971.9	10.0	376.0	226.0	
			桔槌磨	枣园南	1966.9	23.3	241.0	100.0	
			翁留	东翁村北	1961.3	8.4	274.1	184.8	
			罗家	罗家村南	1967.6	8.0	185.0	112.0	



续表

项 目	水库规模	数量	水库名称	所在地点	建成时间 (年·月)	流域面积 (km <sup>2</sup> )	库容(万 m <sup>3</sup> )		备 注
							总库容	兴利库容	
门楼水库 — 庵里水库 区 间	小(1)型	10	董家沟	董家沟村西	1971.5	2.8	186.9	113.0	净流域面积 192km <sup>2</sup>
			田家	田家村	1971.5	25.3	605.5	352.0	
			南埠	南埠村	1971.6	13.1	550.0	362.0	
			南寨	东河	1972.10	4.9	194.7	131.6	
		小计				99.9	2843.2	1761.1	
	小(2)型	70				95.3	1596.5	1066.2	净流域面积 342km <sup>2</sup>
	合 计	80				195.2	4439.7	2827.3	
	中 型	1				150.0	7010.0	3810.0	
	小(1)型	12				113.1	3176.2	1956.3	
	小(2)型	74				98.4	1676.7	1106.0	
全流域	总 计	87				361.5	11862.9	6872.3	

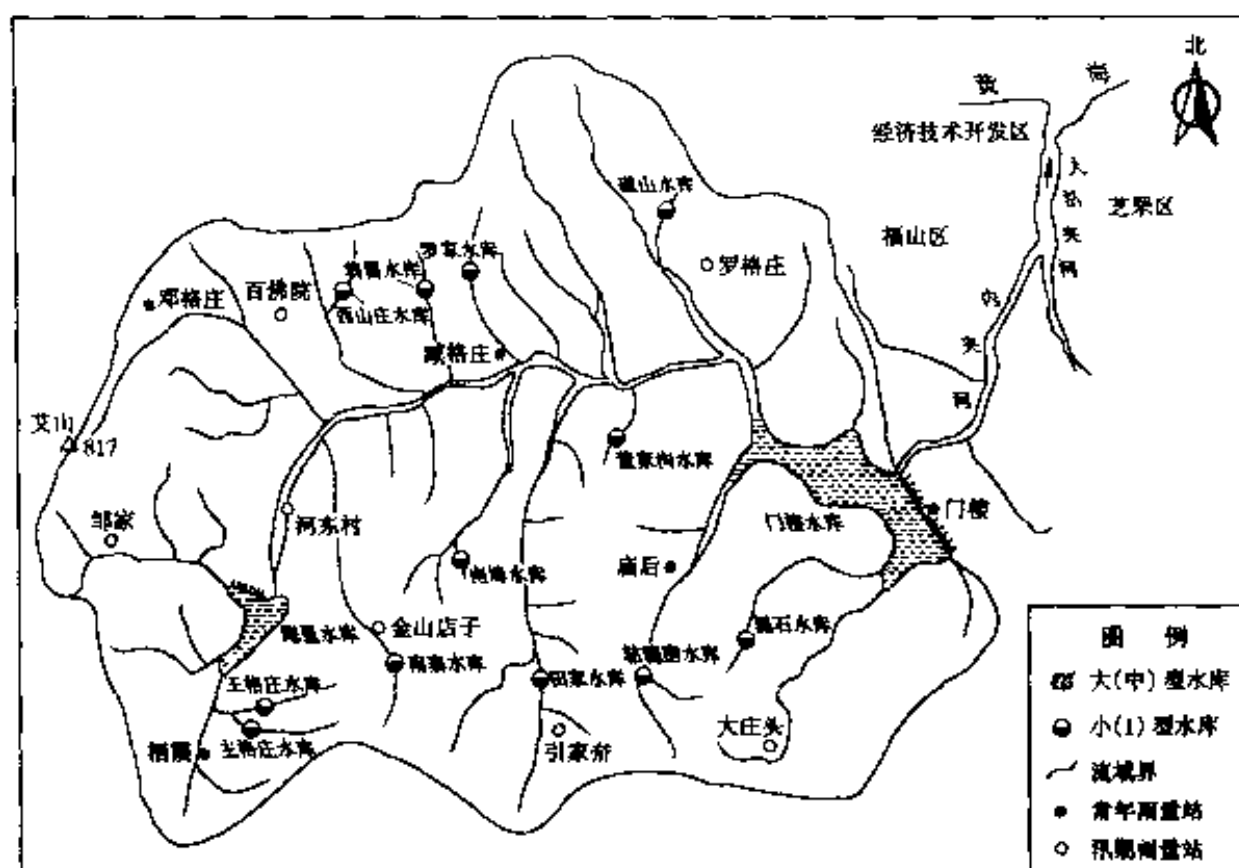


图 1-1 门楼水库流域雨量站及小(1)型水库分布图

比为 4.03。降雨量年内分配也不均匀，主要集中在汛期 6~9 月份，多年平均汛期降雨量 491.7mm，占年降雨量的 71.6%，暴雨多发生在 7~8 月份，在降雨的空间分布上，短历时降雨的中心位置有时较为明显且随机性强。暴雨中心多发生在流域南部和西南部，有时也发生在流域北部，如系列中的 1982 年。根据流域 12 个雨量站 38 年实测降雨量计算，门楼水库流域多年平均最大 24h 和 72h 面雨量分别为 95.6mm 和 117.6mm，最大 24h 降雨量 220.2mm，发生于 1982 年 8 月 25 日，最小 24h 降雨量 38.5mm，发生于 1993 年 6 月 27 日。最大 72h 降雨量

227.3mm, 发生于1997年8月19日, 最小72h降雨量41mm, 发生于1989年8月25日。门楼水库自1964年以来实测到的大暴雨有2次, 分别是1965年7月27日和1997年8月19日暴雨, 实测到的特大暴雨有1次, 为1982年8月25日。受1982年13号台风和冷空气过境的影响, 流域普降了一场特大暴雨, 最大点暴雨发生在流域北部罗格庄, 最大24h点雨量为299.4mm, 全流域最大24h面雨量为220.2mm, 水库实测入库洪峰流量为 $3183\text{m}^3/\text{s}$ , 3日洪水总量为14165万 $\text{m}^3$ 。流域不同时段降雨情况见表1-4。

表 1-4 门楼水库 1964~2001 年不同时段年降雨量均值表

项 目		时间 (h)				
		2	3	6	24	72
全流域	面雨量 (mm)	32.8	43.3	62.9	95.6	117.6
	百分比 (%)	34.3	45.3	65.8	100	123
区间流域	面雨量 (mm)	33.0	43.5	62.7	95.3	117.2
	百分比 (%)	34.6	45.6	65.8	100	123

## 2. 洪水特性

清洋河为典型的山溪性雨源型河流, 河道流量与降水量变化规律一致, 且年内、年际变化较大。枯季流量较小, 洪水集中在汛期。门楼水库坝址以上多年平均净来水量1.478亿 $\text{m}^3$ , 其中汛期6~9月份为1.146亿 $\text{m}^3$ , 占年净来水量的77.5%。年际变化也很大, 最大的1964年, 净来水量为4.29亿 $\text{m}^3$ ; 最小的1989年, 净来水量为0.165亿 $\text{m}^3$ , 丰枯比为26。门楼水库流域地处山丘区, 干流坡度较大, 洪水陡涨陡落, 一次洪水过程持续



时间不长, 历年较大洪水历时一般在 30h 左右, 最大也不超过 72h。水库自建成有实测洪水资料的 1961~2001 年 41 年间, 入库洪水洪峰流量大于  $1000\text{m}^3/\text{s}$  的洪水有 11 次, 大于  $2000\text{m}^3/\text{s}$  的洪水有 3 次, 其中, 年最大洪峰流量为  $3183\text{m}^3/\text{s}$ , 发生于 1982 年; 年最小洪峰流量为  $5.4\text{m}^3/\text{s}$ , 发生于 1989 年。

据气象部门分析, 造成本流域产生暴雨过程的主要天气系统有黄淮气旋、高空切变线、台风以及低槽冷锋等天气系统。其中, 黄淮气旋是造成本地区产生暴雨过程的重要天气系统。

### 第三节 门楼水库开展汛限水位研究的必要性和可行性

门楼水库历年降水量及来水量见表 1-5 和图 1-2、图 1-3。由表 1-5 可求得, 该流域多年平均降水量为 689.3mm, 汛期平均降水量为 493.2mm, 其中 7~8 月为 352.5 mm, 占整个汛期降水量的 71.5%。相对降水量而言, 来水量更为相对集中。全年平均来水量为 16697.4 万  $\text{m}^3$ , 汛期平均来水量为 14433.2 万  $\text{m}^3$ , 而 7~8 月为 9447.8 万  $\text{m}^3$ , 占整个汛期来水量的 65.5%, 占全年平均来水量的 56.6%。由表 1-5 和图 1-2、图 1-3 可见, 在 1960~2001 年水库建成运行后的 42 年间, 该流域总降水量(包括年降水量、汛期降水量和 7~8 月份降水量)和总来水量(包括年来水量、汛期来水量和 7~8 月份来水量)都有不断下降的趋势。同时, 也存在有明显的连丰连枯段, 对降水量而言, 20 世纪 60 年代初期和 70 年代初期均为丰水段, 而 80 年代后期为枯水段。对来水量而言, 60 年代初期和 70 年代初中期均



为丰水段，而 60 年代后期、80 年代后期和 90 年代后期存在有明显的枯水段。

表 1-5 门楼水库历年降水量、来水量表

年 份	降水量 (mm)			来水量 (万 m <sup>3</sup> )		
	全年	汛期	7~8 月	全年	汛期	7~8 月
1962	799.0	669.4	468.7	39000	33860	21338
1963	647.4	366.3	339.1	33500	21216	14490
1964	1132.9	847.1	649.8	51000	42587	25893
1965	885.4	720.7	698.0	37200	30705	25370
1966	873.7	596.7	408.3	11400	7139	3287
1967	770.2	565.7	446.4	14500	11658	7545
1968	493.5	285.7	204.5	3900	2524	1235
1969	539.4	346.4	223.0	6200	4179	3014
1970	860.3	704.4	498.4	21500	20208	14252
1971	963.3	812.7	511.3	29900	26257	10739
1972	698.0	471.9	384.6	11400	32464	2959
1973	944.5	661.3	397.1	24900	16378	6875
1974	781.1	526.3	436.9	18000	13945	9008
1975	949.2	693.9	606.1	27300	21490	12566
1976	954.4	762.0	490.4	47100	36940	23795



续表

年 份	降水量 (mm)			来水量 (万 m <sup>3</sup> )		
	全年	汛期	7~8 月	全年	汛期	7~8 月
1977	636.9	444.6	386.0	14600	12153	7640
1978	840.3	732.1	439.4	21300	19862	13058
1979	800.4	462.3	271.1	20200	16032	10491
1980	523.6	296.1	101.8	6600	4232	1420
1981	516.3	355.1	286.9	3050	2464	1468
1982	821.0	582.4	461.1	23200	21341	17081
1983	588.0	409.0	248.7	3910	3551	1881
1984	492.0	506.3	337.0	5755	4559	4584
1985	814.7	611.0	497.3	26111	24230	18844
1986	370.6	281.7	227.6	883	877	1017
1987	669.8	439.6	248.1	4005	3617	1171
1988	480.0	394.0	290.3	0	0	0
1989	390.1	161.3	122.3	0	0	0
1990	933.1	667.6	514.0	12660	11973	10057
1991	600.4	382.4	166.9	4054	2895	2313
1992	489.0	306.8	211.5	4118	3190	3002
1993	536.2	290.8	130.3	4650	3006	2886

续表

年 份	降水量 (mm)			来水量 (万 m <sup>3</sup> )		
	全年	汛期	7~8月	全年	汛期	7~8月
1994	665.3	490.0	354.2	16580	15204	14008
1995	653.7	501.7	431.5	18390	17642	15600
1996	702.7	500.2	384.1	16980	14490	12172
1997	571.9	344.8	339.3	11610	10369	9698
1998	734.2	509.7	390.4	9679	8505	7838
1999	319.6	208.0	53.0	0	0	0
2000	485.0	286.0	22.1	592	389	296
2001	644.7	535.0	422.0	12078	11896	10676

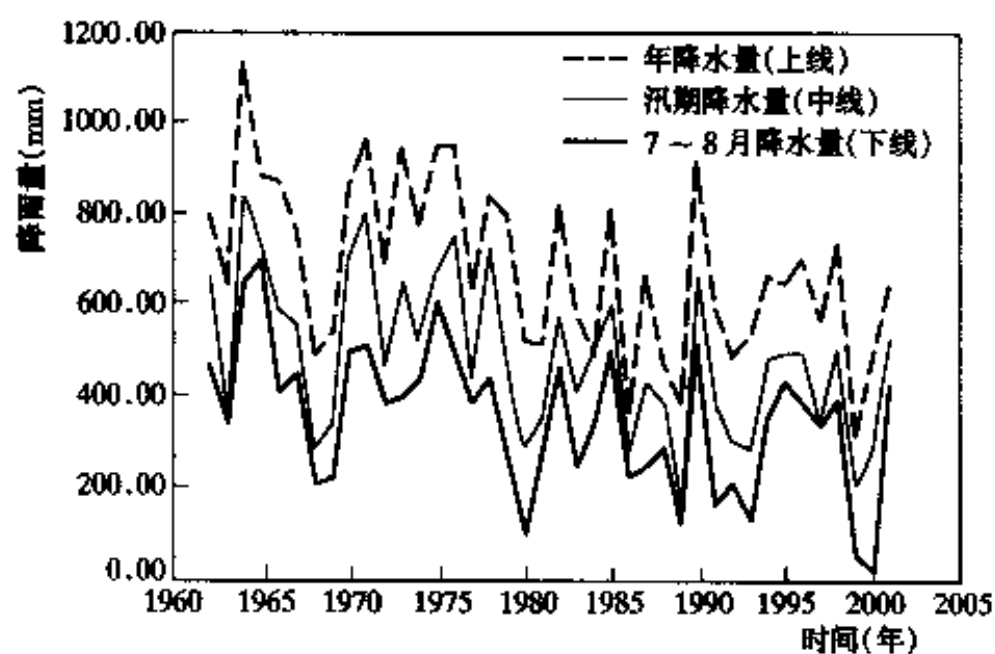


图 1-2 门楼水库历年降水量图

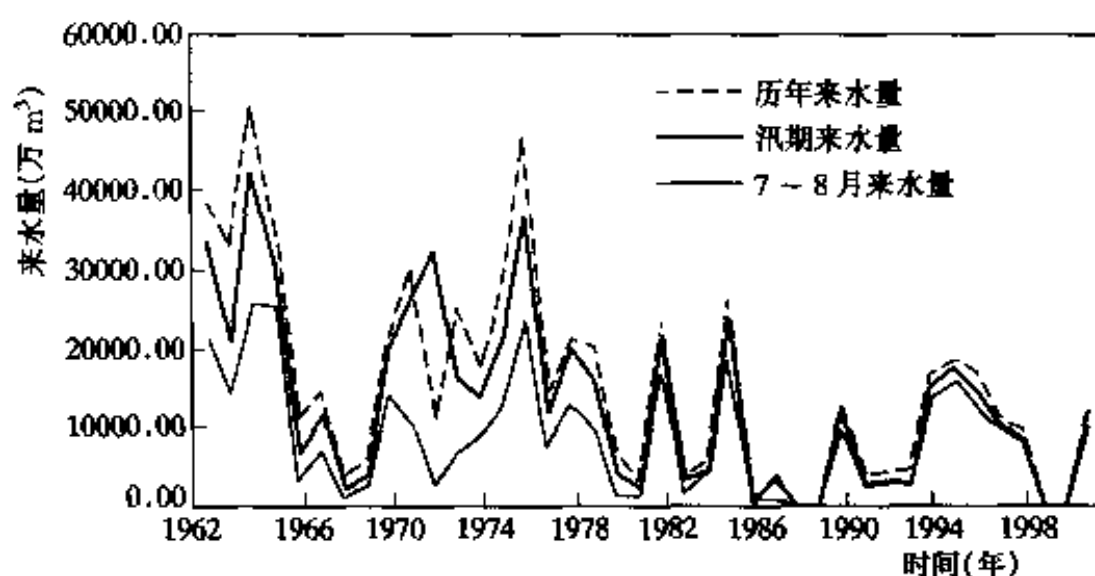


图 1-3 门楼水库历年来水量图

门楼水库历年最高、最低库水位（相应库容）及其相应发生日期见表 1-6 和图 1-4，历年 6 月 1 日和 10 月 1 日的蓄水量见表 1-7 和图 1-5，历年弃水量见表 1-8。

表 1-6 门楼水库历年最高、最低水位及其  
相应库容发生时间对照表

年 份	最高水位 (m)	相应库容 (万 m <sup>3</sup> )	发生时间 (月, 日)	最低水位 (m)	相应库容 (万 m <sup>3</sup> )	发生时间 (月, 日)
1962	29.34	10931	8.19	20.04	808	5.23
1963	28.41	9252	7.25	20.18	869	3.27
1964	28.33	9113	7.30	20.20	877	6.2
1965	30.36	12961	7.28	20.35	942	7.8
1966	26.73	6621	10.13	24.56	3957	7.13
1967	27.31	7471	8.15	24.58	3978	7.12



续表

年 份	最高水位 (m)	相应库容 (万 m <sup>3</sup> )	发生时间 (月·日)	最低水位 (m)	相应库容 (万 m <sup>3</sup> )	发生时间 (月·日)
1968	25.74	5308	1.3	22.77	2336	7.18
1969	24.80	4203	8.23	21.05	1258	7.31
1970	29.30	10854	7.25	23.19	2664	7.16
1971	29.01	10295	7.4	24.70	4103	6.26
1972	27.04	7053	3.8	23.26	2725	7.7
1973	28.38	9200	9.1	24.73	4134	7.12
1974	28.39	9217	8.15	23.89	4301	7.23
1975	28.64	9651	9.1	21.33	1406	7.22
1976	29.26	10777	8.20	23.45	2891	6.29
1977	27.55	7843	8.9	22.04	1821	7.3
1978	28.01	8557	8.16	19.89	751	6.25
1979	27.01	7006	8.3	23.66	3075	6.23
1980	26.88	6827	6.1	22.51	2153	6.29
1981	23.11	2594	9.6	19.16	508	6.30
1982	29.80	11817	8.26	19.10	490	8.5
1983	27.50	7766	2.20	23.61	3031	6.29
1984	26.95	6923	9.30	22.69	2279	7.3
1985	28.51	9425	8.21	25.96	5573	7.25
1986	27.69	9738	1.1	20.70	1097	12.25



续表

年 份	最高水位 (m)	相应库容 (万 m <sup>3</sup> )	发生时间 (月 . 日)	最低水位 (m)	相应库容 (万 m <sup>3</sup> )	发生时间 (月 . 日)
1987	25.00	4416	12.31	19.55	628	6.19
1988	25.15	4597	2.28	20.83	1156	7.9
1989	21.81	1680	3.31	18.42	323	12.31
1990	29.13	10526	9.24	17.86	219	7.5
1991	29.04	10353	1.12	27.85	8308	12.31
1992	27.98	8509	3.5	25.89	5488	8.6
1993	28.10	8714	8.30	27.40	7611	5.16
1994	29.21	10680	8.15	25.71	5272	6.29
1995	29.14	10546	9.29	27.54	7827	7.30
1996	29.05	10372	9.21	27.69	8060	6.15
1997	29.20	10661	1.21	26.79	6703	8.19
1998	29.23	10719	10.1	27.64	7982	7.4
1999	28.67	9703	1.1	25.06	4488	12.31
2000	25.06	4488	1.1	20.75	1120	12.31
2001	30.06	12329	9.8	19.96	777	6.26

由表 1-6 和图 1-4 可以看出,若扣除枯水年由于来水量少,用水量大,水库无法蓄水的实际情况的影响(例如 1989 年和 1999 年为特枯年,全年几乎没有来水),历年最高库水位和最低库水位有不断增加的趋势,水库的兴利效益在不断增大。究其

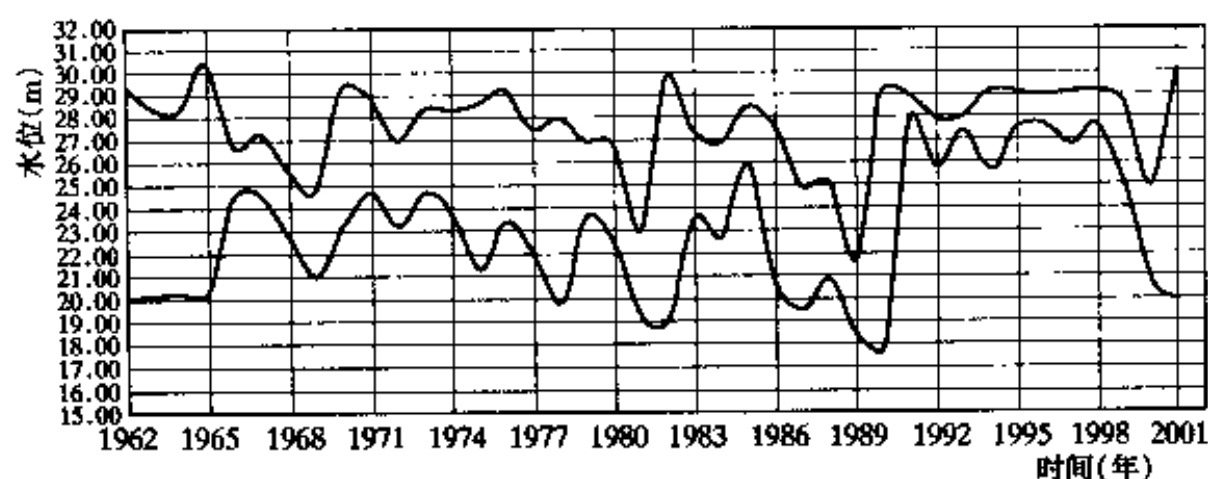


图 1-4 门楼水库历年最高、最低水位图

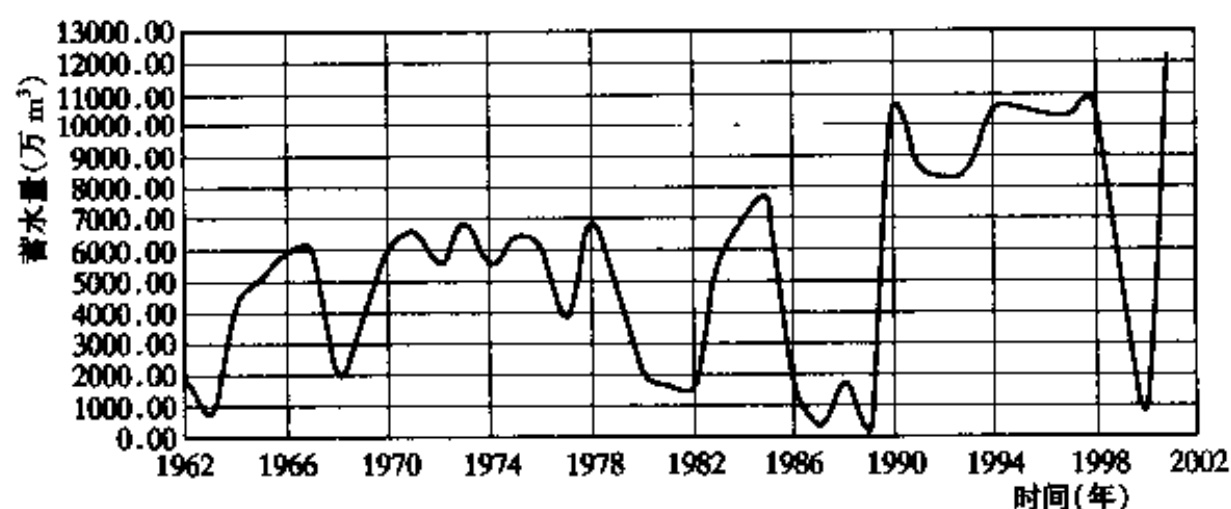


图 1-5 门楼水库年蓄水量变化图

原因，一方面是由于水库除险加固工程的完成为水库蓄更多的水提供了可能，另一方面也说明对该水库的兴利要求也越来越高。由表 1-7 和图 1-5 也可看出，近年来汛末的蓄水量较以前有明显增加（除 1989 年特枯年之外，因为该年没水可蓄），说明水库在汛期做好防洪调度的同时，也对兴利调度越来越重视，水库的兴利作用也越来越大。



表 1-7 门楼水库历年 6 月 1 日、10 月 1 日蓄水量表

单位: 万  $\text{m}^3$ 

年 份	6 月 1 日	10 月 1 日	年 份	6 月 1 日	10 月 1 日
	蓄水量	蓄水量		蓄水量	蓄水量
1962		1733	1982	544	1650
1963		882	1983	2699	5390
1964	1093	4312	1984	2629	6923
1965	1156	5067	1985	5187	7564
1966	4561	5881	1986	4019	1474
1967	3727	6005	1987	639	404
1968	3311	2005	1988	1543	1680
1969	2673	3863	1989	955	390
1970	3092	6005	1990	230	10460
1971	4621	6553	1991	8991	8748
1972	4633	5573	1992	7006	8277
1973	4850	6827	1993	7611	8540
1974	4934	5573	1994	6265	10449
1975	4621	6375	1995	8592	10546
1976	4071	6073	1996	8540	10353
1977	3355	3831	1997	8679	10276
1978	5187	6854	1998	8246	10719
1979	3758	4705	1999	7440	5416
1980	6827	2061	2000	2112	1075
1981	617	1638	2001	903	12144

表 1-8 门楼水库历年弃水量表 单位: 万 m<sup>3</sup>

年 份	年弃水量	汛期弃水量	年 份	年弃水量	汛期弃水量
1962	8758	6370	1982	15579	14876
1963	8064	7879	1983	0	0
1964	12240	1086	1984	473	392
1965	18906	16540	1985	3784	3520
1966	812	689	1986	0	0
1967	2119	1881	1987	0	0
1968	803	617	1988	0	0
1969	408	308	1989	0	0
1970	10071	9832	1990	965	965
1971	8896	8120	1991	2882	2882
1972	4825	3720	1992	0	0
1973	17976	16812	1993	4728	2071
1974	8073	6123	1994	9087	8222
1975	7216	5430	1995	10025	9600
1976	11432	9827	1996	8896	8272
1977	5014	4321	1997	6038	5153
1978	7974	6839	1998	4097	3487
1979	12141	10243	1999	206	206
1980	2933	1842	2000	0	0
1981	0	0	2001	6198	5985



由表 1-6~表 1-8 可见, 水库自建成运行以来, 于 2001 年 9 月 8 日出现最高库水位 30.06m, 该年汛末 (10 月 1 日) 蓄水量为 12144 万  $\text{m}^3$ , 全年弃水 6198 万  $\text{m}^3$ 。年最高库水位大于 29.00m 的有 14 年, 而在这 14 年中每年都有大量弃水, 弃水量最小的一年仅汛期也达到 2882 万  $\text{m}^3$ 。而对于 10 月 1 日 (汛末) 而言, 蓄水量最大的是 2001 年, 蓄水量为 12144 万  $\text{m}^3$  (相应库水位为 29.97m)。蓄水量上亿的年份有 7 年, 都发生在 1990 年之后。除 2001 年以外, 蓄水位都没有达到目前采用的水库兴利水位, 造成大量水资源浪费。以 1982 年为例, 该年最高蓄水位在 8 月 26 日达到 29.80m, 而 10 月 1 日 (汛末) 水库蓄水量仅为 1650 万  $\text{m}^3$ , 当年弃水量为 15579 万  $\text{m}^3$ , 汛期弃水量就有 14876 万  $\text{m}^3$ 。又如 1995 年, 该年最高库水位在 9 月 29 日 (汛末) 达到 29.14m, 10 月 1 日水库蓄水量为 10546 万  $\text{m}^3$ , 接近目前采用的兴利库容, 而当年仍有弃水 10025 万  $\text{m}^3$ , 其中汛期弃水 9600 万  $\text{m}^3$ 。可见, 该流域仍有部分水资源没有得到充分利用, 从资源角度讲进一步增加水库兴利蓄水是可行的。

目前, 门楼水库的除险加固工程已全部完成, 下游河道的防洪标准也有了进一步地提高, 为该水库更好地发挥兴利效益奠定了基础。同时, 烟台市水资源供需矛盾日趋突出, 门楼水库作为城市供水的主要水源发挥着越来越重要的作用。因此, 加强对门楼水库汛限水位的研究, 在保障水库安全的前提下, 尽量减少弃水, 增加兴利蓄水, 既十分必要又完全可行。



## 流域产汇流计算模型研究

### 第一节 基本资料的选用与处理

#### 一、基本资料的选用

本次所选用的基本资料包括以下两个方面：

- 1) 用于率定产汇流模型参数的降雨径流资料，选用了 1979~1992 年间 41 场降雨径流资料。
- 2) 用于验证产汇流模型参数的降雨径流资料，选用了 1994 年 6 场降雨径流资料。

#### 二、基本资料的处理

##### 1. 降雨资料的处理

在产汇流模型率定期和验证期需将原始降雨径流资料转换成定时段资料，本文采用的时段长为 1h，在前期影响雨量计算时，需根据本次降雨起始时刻，确定前一日的降水量。

##### 2. 径流资料的处理

因门楼水库入库处无水文站，因此采用了门楼水库的蓄水量



变化过程反推入库流量过程，进而将此过程转换为定时段的出流过程。

### 3. 前期影响雨量的确定

在确定前期影响雨量时，采用了  $n = 30\text{d}$ ，计算公式如下

$$p_{a,t} = k^{1+x}p_{a,t-1} + k^{2+x}p_{a,t-2} + \cdots + k^{n+x}p_{a,t-n}$$

式中  $x$  根据降雨发生的时间确定，其值见表 2-1。

表 2-1

$x$  值 表

降雨发生时间 (h)	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$x$ 值	0.000	0.042	0.083	0.125	0.167	0.208	0.250	0.292	0.333
降雨发生时间 (h)	17	18	19	20	21	22	23	24 (0)	1
$x$ 值	0.375	0.417	0.458	0.500	0.542	0.583	0.625	-0.333	-0.292
降雨发生时间 (h)	2	3	4	5	6	7	8		
$x$ 值	-0.250	-0.208	-0.167	-0.125	-0.083	-0.042	0.000		

### 4. 产流面积的确定

如前所述，流域内（门楼水库之上）有中型水库 1 座，小（1）型水库 12 座，小（2）型水库 74 余座，有 5 个遥测雨量站，即门楼、庙后、大庄头、臧格庄和庵里。由于各地水库的蓄水情况不同，随着降雨的不断延续，蓄满的时间各不相同，因此，对于门楼水库而言，影响门楼水库的产流面积也在不断发生变化。对于各雨量站而言，其控制面积（对门楼水库产生影响部分）也在不断发生变化。流域内现有小（1）型工程的实际情况，见表

2-2。根据其控制面积和兴利库容计算其各自控制的径流深度，进而根据其位置综合分析后，确定的各雨量站控制面积变化情况如表 2-3。

在表 2-3 中，没有考虑庵里站的权重，因为庵里站多年无资料，其权重按照一定关系分配给了臧格庄和庙后两站。

表 2-2 小 (1) 型水库控制径流深表

水 库	西山庄	磁山	黑石	轱辘磨	翁留	罗家	董家沟	田家	南埠	南寨
控制径流深 (mm)	500	390	226	429	220	140	404	139	276	269

表 2-3 雨量站控制面积变化情况表

门 楼	庙 后		大 庄 头		臧 格 庄	
控制面积 (km <sup>2</sup> )	净雨量 (mm)	控制面积 (km <sup>2</sup> )	净雨量 (mm)	控制面积 (km <sup>2</sup> )	净雨量 (mm)	控制面积 (km <sup>2</sup> )
118.47	$h < 100$	203.20	$h < 100$	56.95	$h < 150$	386.24
	$100 < h < 160$	223.74	$100 < h < 160$	68.97	$150 < h < 260$	438.45
	$160 < h < 260$	256.13	$h > 160$	86.16	$h > 260$	456.45
	$h > 260$	265.92				

### 5. 蒸发资料的选用

利用多年实测蒸发资料，按算术平均法求出了各月的平均值，对于月与月之间的过渡段（上月 25 日至下月 5 日）求出两月的平均值的均值。



## 第二节 产流（下渗）计算模型

### 一、基本概念

#### 1. 点下渗计算的基本概念

若假定  $f \sim t$ （下渗率随时间变化曲线）已知，则对于流域内某点而言，若假定第  $i$  时段的降雨强度为  $I_i$ ，时段长为  $\Delta t_i$ ，时段初的土壤下渗率为  $f_i$ ，时段末的下渗率为  $f_{i+1}$  ( $< f_i$ )，则时段内该点的下渗量  $\Delta F_i$  可分别按下述几种情况计算。

$$(1) I_i \geq f_i$$

$$\Delta F_i = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} f(t) dt$$

$$(2) I_i \leq f_{i+1}$$

$$\Delta F_i = I_i \Delta t_i$$

$$(3) f_{i+1} < I_i < f_i$$

$$\Delta F_i \approx I_i(t'_i - t_i) + \int_{t'_i}^{t_i + \Delta t_i} f(t) dt$$

上述公式的基本概念及符号含义如图 2-1 所示。

#### 2. 点下渗计算公式

对于流域内某一点而言，土壤下渗率的变化规律可用数学方程来描述，以霍顿（Horton）公式为例，说明如下

$$\begin{aligned} f(t) &= (f_0 - f_c)e^{-kt} + f_c = f_0e^{-kt} + f_c(1 - e^{-kt}) \\ &= f_1 + f_2 \end{aligned} \quad (2-1)$$

由式 (2-1) 可得其下渗量为

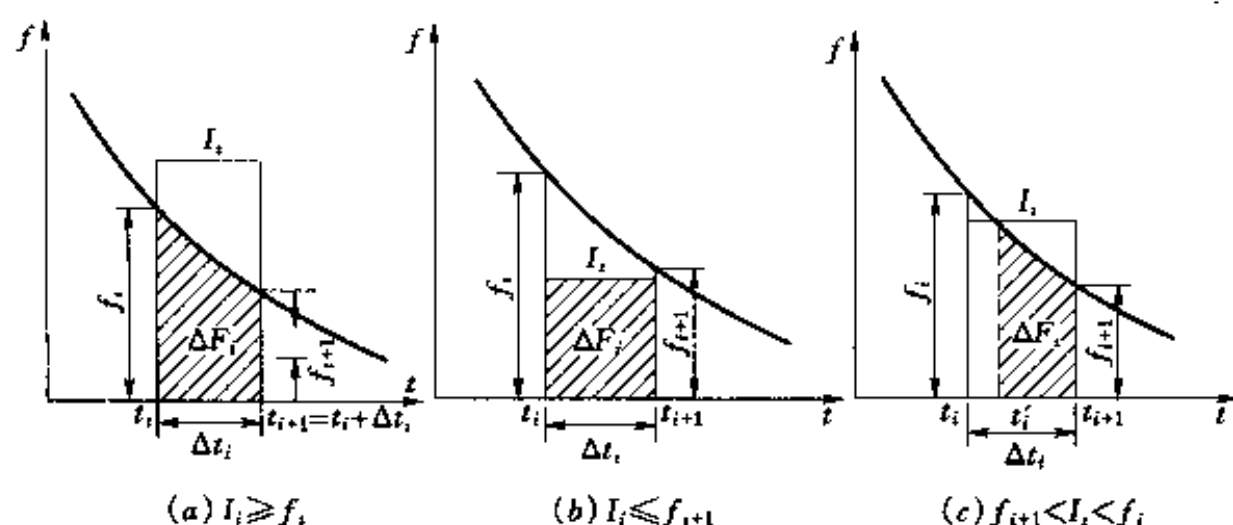


图 2-1 点产流计算示意图

$$\begin{aligned}
 F(t) &= \int_0^t f(t) dt = \int_0^t f_1 dt + \int_0^t f_2 dt \\
 &= f_0(1 - e^{-kt})/k + f_c[t - (1 - e^{-kt})/k] \\
 &= F_1(t) + F_2(t)
 \end{aligned} \tag{2-2}$$

进一步由式 (2-1) 和式 (2-2) 可得

$$t = -\ln(1 - F_1 k / f_0) / k = -\ln(f_1 / f_0) / k \tag{2-3}$$

$$t = -\ln(1 - f_2 / f_c) / k \tag{2-4}$$

$$F_1 = f_0(1 - e^{-kt})/k = f_0(1 - f_1 / f_0)k \tag{2-5}$$

$$\begin{aligned}
 F_2 &= f_c t - f_c(1 - e^{-kt})/k = -f_c \ln(1 - f_2 / f_c) / k - f_2 / k \\
 &\tag{2-6}
 \end{aligned}$$

若假定  $f_0$ 、 $k$ 、 $f_c$  等参数为已知, 则式 (2-3) 和式 (2-4) 为  $t \sim f_1$ ,  $t \sim f_2$  之关系式, 式 (2-5) 和式 (2-6) 为  $F_1 \sim f_1$ ,  $F_2 \sim f_2$  之关系式。

### 3. 流域下渗容量分配曲线

由于下垫面条件及降雨特征的差异, 流域内各点的下渗量随



时间而变化。对于某一点而言,随着降雨过程的不断延续,下渗量  $F'$  不断增大,到某一时刻将会达到一个最大值,此时刻之后下渗量不再增加(没有考虑稳渗影响),此时的下渗量称为该点的下渗容量  $F'_m$ 。类似蓄满产流模型流域蓄水容量分配曲线的概念,可引入流域下渗容量分配曲线以及该曲线与下渗率之间的关系,如图 2-2 所示。曲线下方与横坐标包围的面积,即为全流域各点下渗容量的平均值  $F_m$ 。

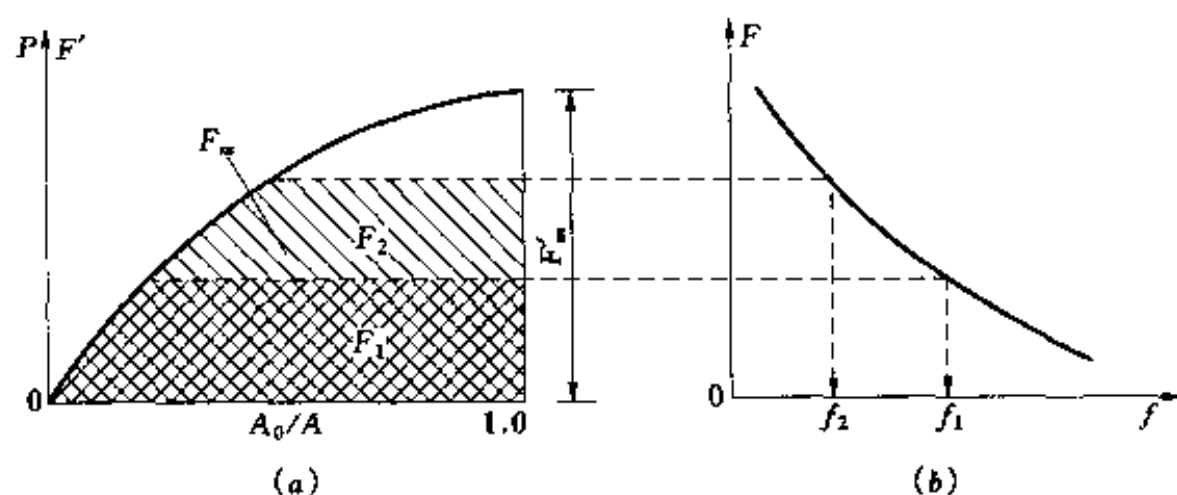


图 2-2 下渗率与下渗量关系图

流域内各点下渗量之和即为流域总下渗量。流域总下渗量由两部分组成,即未饱和面积上的下渗量和饱和面积上的下渗量。前者由  $f_1$  控制,后者则受控于  $f_2$ 。对于某一时段而言,产流计算示意图如图 2-3 所示。

## 二、流域下渗计算模型

流域下渗容量分配曲线,如图 2-2 所示,可用下述方程来描述,即

$$A_0/A = 1 - (1 - F'/F'_m)^n \quad (2-7)$$

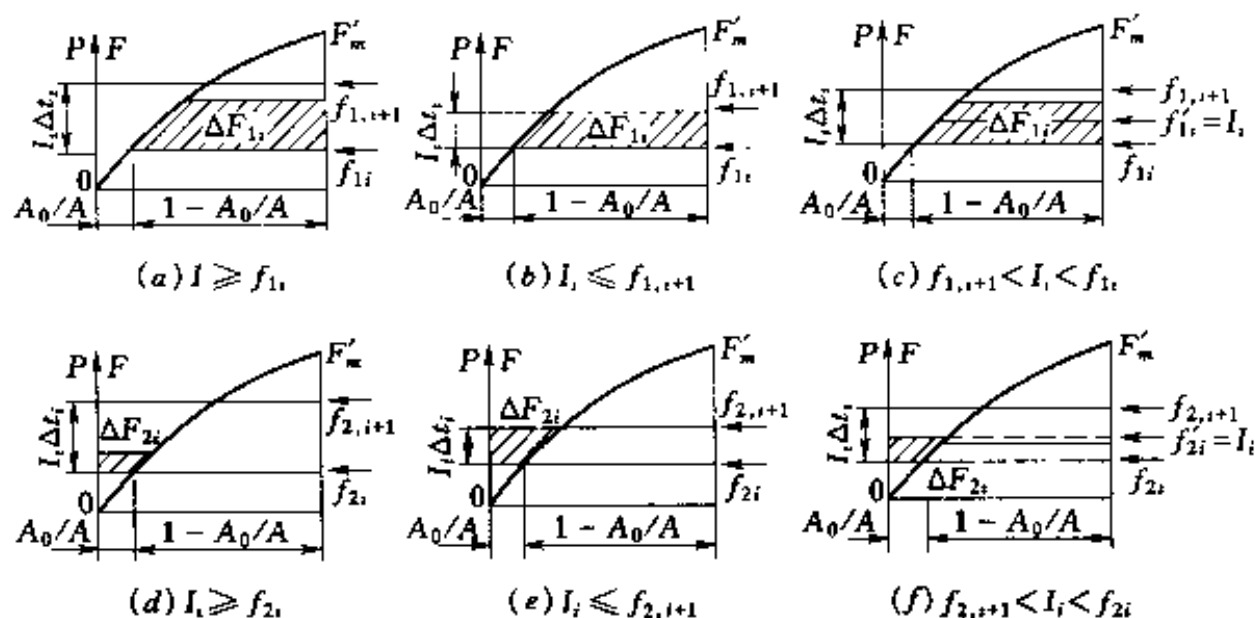


图 2-3 流域时段下渗量计算示意图

如图 2-3, 第  $i$  时段  $\Delta t_i$  内的下渗量  $\Delta F_i$  由两部分组成, 即  $\Delta F_i = \Delta F_{1i} + \Delta F_{2i}$ , 其具体表达式如下

$$\begin{aligned}
 \Delta F_{1i} &= \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} (1 - A_0/A) dF'_1 \\
 &= \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} (1 - F'_1/F'_m)^n dF'_1 \\
 &= F_m \left( 1 - \frac{F'_1}{(n+1)F'_m} \right)^{(n+1)} \Big|_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} \quad (2-8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta F_{2i} &= \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} (A_0/A) dF'_2 \\
 &= \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} [1 - (1 - F'_2/F'_m)^n] dF'_2 \\
 &= \left[ F'_2 + F_m \left( 1 - \frac{F'_2}{(n+1)F'_m} \right)^{(n+1)} \right] \Big|_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} \quad (2-9)
 \end{aligned}$$



在式 (2-8) 和式 (2-9) 中,  $F_m = \frac{F'_m}{n+1}$ , 为流域包气带下渗容量平均值。

下面分两种情况讨论  $\Delta F_i$  的计算。

(一) 当  $F_i < F_m$  时

1.  $\Delta F_{1i}$  的计算

(1)  $I_i \geq f_{1i}$ 。当  $I_i \geq f_{1i}$  时, 即降雨强度大于下渗率, 按下渗规律下渗, 由式 (2-5) 有  $F'_1 = f_0 (1 - e^{-kt}) / k$ , 并且  $F_m = f_0 / k$ , 又因为  $F_m = \int_0^\infty f_1(t) dt = \int_0^\infty f_0 e^{-kt} dt = f_0 / k$ , 代入式 (2-8) 则有

$$\begin{aligned} \Delta F_{1i} &= F_m [1 - (1 - e^{-kt}) / (n+1)]^{(n+1)} \Big|_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} \\ &= F_m \{ [1 - (1 - e^{-kt_i}) / (n+1)]^{(n+1)} \\ &\quad - [1 - (1 - e^{-k(t_i + \Delta t_i)}) / (n+1)]^{(n+1)} \} \quad (2-10) \end{aligned}$$

(2)  $I_i \leq f_{1,i+1}$ 。当  $I_i \leq f_{1,i+1}$  时, 即降雨强度小于下渗率, 按降雨强度下渗, 故  $F'_1 = I_i t$ , 由式 (2-8) 有

$$\Delta F_{1i} = F_m \left\{ \left[ 1 - \frac{I_i t_i}{(n+1)F_m} \right]^{(n+1)} - \left[ 1 - \frac{I_i (t_i + \Delta t_i)}{(n+1)F_m} \right]^{(n+1)} \right\} \quad (2-11)$$

(3)  $f_{1,i+1} < I_i < f_{1,i}$ 。当  $f_{1,i+1} < I_i < f_{1,i}$  时, 即降雨强度在时段初小于下渗率, 在时段末大于下渗率。此时首先应用式 (2-12) 求出  $t'_i$  ( $t_i < t'_i < t_i + \Delta t_i$ ), 当  $t = t'_i$  时, 下渗率等于降雨强度, 然后将区间  $(t_i, t_i + \Delta t_i)$  划分为两个区间, 即  $(t_i, t'_i)$  和  $(t'_i, t_i + \Delta t_i)$ 。在  $(t_i, t'_i)$  区间内, 降雨强度小于下渗率, 按降雨强度下渗, 而在  $(t'_i, t_i + \Delta t_i)$  区间内, 降

雨强度大于下渗率,按下渗规律下渗。对于两区间分别应用式(2-8)求出其下渗量,则时段下渗总量见式(2-13)。

$$t'_i = -\ln(I_i/F_m k)/k \quad (2-12)$$

$$\begin{aligned} \Delta F_{1i} = & F_m \left\{ \left[ 1 - \frac{I_i t_i}{(n+1)F_m} \right]^{(n+1)} - \left[ 1 - \frac{I_i t'_i}{(n+1)F_m} \right]^{(n+1)} \right\} \\ & + F_m \{ [1 - (1 - e^{-kt'_i})/(n+1)]^{(n+1)} \\ & - [1 - (1 - e^{-k(t_i + \Delta t_i)})/(n+1)]^{(n+1)} \} \end{aligned} \quad (2-13)$$

## 2. $\Delta F_{2i}$ 的计算

(1)  $I_i \geq f_{2i}$ 。当  $I_i \geq f_{2i}$  时,即降雨强度大于饱和面积上的下渗率,按重力下渗规律下渗,由式(2-6)  $F'_2 = f_c t - f_c (1 - e^{-kt})/k$ ,代入式(2-9)有

$$\begin{aligned} \Delta F_{2i} = & \left\{ f_c t - f_c (1 - e^{-kt})/k \right. \\ & \left. + F_m \left[ 1 - \frac{k f_c t - f_c (1 - e^{-kt})}{(n+1)F_m k} \right]^{(n+1)} \right\} \Big|_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} \\ = & \left\{ f_c (t_i + \Delta t_i) - f_c [1 - e^{-k(t_i + \Delta t_i)}]/k \right. \\ & \left. + F_m \left[ 1 - \frac{k f_c (t_i + \Delta t_i) - f_c (1 - e^{-k(t_i + \Delta t_i)})}{(n+1)F_m k} \right]^{(n+1)} \right\} \\ & - \left\{ f_c t_i - f_c (1 - e^{-kt_i})/k \right. \\ & \left. + F_m \left[ 1 - \frac{k f_c t_i - f_c (1 - e^{-kt_i})}{(n+1)F_m k} \right]^{(n+1)} \right\} \\ = & f_c \Delta t_i + f_c [e^{-k(t_i + \Delta t_i)} - e^{-kt_i}]/k \\ & + F_m \left[ 1 - \frac{k f_c (t_i + \Delta t_i) - f_c (1 - e^{-k(t_i + \Delta t_i)})}{(n+1)F_m k} \right]^{(n+1)} \end{aligned}$$



$$- F_m \left[ 1 - \frac{k f_c t_i - f_c (1 - e^{-k t_i})}{(n+1) F_m k} \right]^{(n+1)} \quad (2-14)$$

(2)  $I_i \leq f_{2,i+1}$ 。当  $I_i \leq f_{2,i+1}$  时, 即降雨强度小于饱和面积上的重力下渗率, 按降雨强度下渗, 此时  $F'_2 = I_i t$ , 代入式 (2-9) 整理后得

$$\begin{aligned} \Delta F_{2i} = I_i \Delta t_i + F_m \left\{ \left[ 1 - \frac{I_i (t_i + \Delta t_i)}{(n+1) F_m} \right]^{(n+1)} \right. \\ \left. - \left[ 1 - \frac{I_i t_i}{(n+1) F_m} \right]^{(n+1)} \right\} \end{aligned} \quad (2-15)$$

(3)  $f_{2,i+1} < I_i < f_{2i}$ 。当  $f_{2,i+1} < I_i < f_{2i}$  时, 即降雨强度在时段初小于饱和面积上的重力下渗率, 在时段末大于重力下渗率。类似前述讨论方法, 先应用式 (2-16) 计算出  $t'_i$  ( $t_i < t'_i < t_i + \Delta t_i$ ), 然后把区间  $(t_i, t_i + \Delta t_i)$  划分成区间  $(t_i, t'_i)$  和  $(t'_i, t_i + \Delta t_i)$ , 对于两个区间分别应用式 (2-9) 计算出相应的下渗量, 最后求出时段总下渗量, 计算公式见式 (2-17)

$$t'_i = -\ln(1 - I_i/f_c)/k \quad (2-16)$$

$$\begin{aligned} \Delta F_{2i} &= \left\{ F'_2 + F_m \left[ 1 - \frac{F'_2}{(n+1) F_m} \right] \right\}^{(n+1)} \Big|_{t_i}^{t'_i} \\ &\quad + \left\{ F'_2 + F_m \left[ 1 - \frac{F'_2}{(n+1) F_m} \right] \right\}^{(n+1)} \Big|_{t'_i}^{t_i + \Delta t_i} \\ &= \left\{ I_i t + F_m \left[ 1 - \frac{I_i t}{(n+1) F_m} \right] \right\}^{(n+1)} \Big|_{t_i}^{t'_i} \\ &\quad + \left\{ f_c t - f_c (1 - e^{-k t})/k \right. \\ &\quad \left. + F_m \left[ 1 - \frac{f_c t - f_c (1 - e^{-k t})/k}{(n+1) F_m} \right] \right\}^{(n+1)} \Big|_{t'_i}^{t_i + \Delta t_i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= I_i(t'_i - t_i) + F_m \left[ 1 - \frac{I_i t'_i}{(n+1)F_m} \right]^{(n+1)} \\
&\quad - F_m \left[ 1 - \frac{I_i t_i}{(n+1)F_m} \right]^{(n+1)} \\
&\quad + f_c(t_i + \Delta t_i - t'_i) + f_c[e^{-k(t_i + \Delta t_i)} - e^{-kt'_i}]/k \\
&\quad + F_m \left[ 1 - \frac{kf_c(t_i + \Delta t_i) - f_c(1 - e^{-k(t_i + \Delta t_i)})}{(n+1)F_m k} \right]^{(n+1)} \\
&\quad - F_m \left[ 1 - \frac{kf_c t'_i - f_c(1 - e^{-kt'_i})}{(n+1)F_m k} \right]^{(n+1)}
\end{aligned} \tag{2-17}$$

(二) 当  $F_i \geq F_m$  时

当  $F_i \geq F_m$  时, 包气带全部蓄满,  $\Delta F_{1i} = 0$  (因为  $A_0/A = 1.0$ , 代入式 (2-8), 则  $\Delta F_{1i} = 0$ ), 只有重力下渗, 将  $A_0/A = 1.0$  代入式 (2-9) 可得

$$\Delta F_{2i} = F'_2 \Big|_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} \tag{2-18}$$

(1)  $I_i \geq f_{2i}$ 。当  $I_i \geq f_{2i}$  时, 即降雨强度大于下渗率, 有  $F'_2 = f_c t + f_c(1 - e^{-kt})/k$ , 代入式 (2-18) 则有

$$\Delta F_{2i} = f_c \Delta t_i + f_c[e^{-k(t_i + \Delta t_i)} - e^{-kt_i}]/k \tag{2-19}$$

(2)  $I_i \leq f_{2,i+1}$ 。当  $I_i \leq f_{2,i+1}$  时, 即降雨强度小于下渗率, 此时有  $F'_2 = I_i t$ , 代入式 (2-18) 可得

$$\Delta F_{2i} = I_i \Delta t_i \tag{2-20}$$

(3)  $f_{2,i+1} < I_i < f_{2i}$ 。当  $f_{2,i+1} < I_i < f_{2i}$  时, 应用式 (2-16) 求出  $t'_i$ , 类似前述讨论, 将区间  $(t_i, t_i + \Delta t_i)$  划分为  $(t_i, t'_i)$  和  $(t'_i, t_i + \Delta t_i)$  两个区间, 应用式 (2-18) 可得

$$\Delta F_{2i} = I_i(t'_i + t_i) + f_c(t_i + \Delta t_i - t'_i) + f_c[e^{-k(t_i + \Delta t_i)} - e^{-kt'_i}]/k \quad (2-21)$$

当时段下渗量求得后, 则时段产流量 (地面径流量) 可按下式计算

$$\Delta R_i = \Delta p_i - (\Delta F_{1i} + \Delta F_{2i}) \quad (2-22)$$

式中  $\Delta p_i = I_i \Delta t_i$ , 为时段降雨量 (扣除蒸发影响)。

### 三、下渗计算模型特例

本节二中所介绍的下渗计算模型可以看成通用模型, 在北方大部分地区, 由于包气带较厚, 暴雨历时较短, 饱和面积上重力下渗部分有时可忽略不计, 此时所采用的计算模型, 可看成下渗计算模型的特例, 为了便于说明计算过程, 下面采用另一推导方法。

类似前述讨论方法, 第  $i$  时段内的下渗量  $\Delta F_i$  推导如下:

1. 当  $F_i < F_m$  时

(1)  $I_i > f_i$

$$\Delta F_i = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} (1 - A_0/A) dF' = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} (1 - F'/F'_m) dF'$$

因为  $F' = f_0 (1 - e^{-kt}) / k$ ,  $dF' = f_0 e^{-kt} dt$ , 代入上式有

$$\Delta F_i = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} \left[ 1 - \frac{f_0}{kF'_m} (1 - e^{-kt}) \right]^n f_0 e^{-kt} dt$$

令  $x = \frac{f_0}{kF'_m} (1 - e^{-kt})$ ,  $dx = \frac{f_0}{kF'_m} e^{-kt} dt$ , 代入上式则

$$\Delta F_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} (1 - x)^n F'_m dx$$

$$= \frac{F'_m}{n+1} [(1-x_i)^{(n+1)} - (1-x_{i+1})^{(n+1)}]$$

由前知  $F_m = F'_m / (n+1)$ , 因此

$$\Delta F_i = F_m [(1-x_i)^{(n+1)} - (1-x_{i+1})^{(n+1)}] \quad (2-23)$$

式中

$$x_i = \frac{f_0}{kF'_m} (1 - e^{-kt_i})$$

$$x_{i+1} = \frac{f_0}{kF'_m} (1 - e^{-k(t_i + \Delta t_i)})$$

又因为  $F_m = \int_0^\infty f(t)dt = \int_0^\infty f_0 e^{-kt} dt = f_0/k$ , 因此有

$$x_i = \frac{1}{n+1} (1 - e^{-kt_i}) \quad (2-24)$$

$$x_{i+1} = \frac{1}{n+1} (1 - e^{-k(t_i + \Delta t_i)}) \quad (2-25)$$

$$t_i = -\ln(1 - F_i k / f_0) / k = -\ln(1 - F_i / F_m) / k \quad (2-26)$$

(2)  $I_i \leq f_{i+1}$

$$\Delta F_i = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} (1 - A_0/A) dF'$$

因为  $F = I_i t$ ,  $dF = I_i dt$ , 故

$$\Delta F_i = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} (1 - I_i t / F'_m)^n I_i dt$$

令  $x = I_i t / F'_m$ ,  $dx = I_i dt / F'_m$ , 代入上式有

$$\begin{aligned} \Delta F_i &= \int_{x_i}^{x_{i+1}} (1-x)^n F'_m dx \\ &= \frac{F'_m}{n+1} [(1-x_i)^{(n+1)} - (1-x_{i+1})^{(n+1)}] \\ &= F_m [(1-x_i)^{(n+1)} - (1-x_{i+1})^{(n+1)}] \end{aligned} \quad (2-27)$$

$$\text{式中} \quad x_i = I_i t_i / (n+1) F_m \quad (2-28)$$

$$x_{i+1} = I_i (t_i + \Delta t_i) / (n+1) F_m \quad (2-29)$$

$$(3) \quad f_{i+1} < I_i < f_i$$

$$\begin{aligned} \Delta F_i = \Delta F_{1i} + \Delta F_{2i} = F_m [(1 - x_i)^{(n+1)} - (1 - x'_i)^{(n+1)}] \\ + F_m [(1 - x'_i)^{(n+1)} - (1 - x_{i+1})^{(n+1)}] \end{aligned} \quad (2-30)$$

$$\text{式中} \quad x_i = I_i t_i / (n+1) F_m \quad (2-31)$$

$$x'_i = \frac{1}{n+1} (1 - e^{-k t'_i}) \quad (2-32)$$

$$x_{i+1} = \frac{1}{n+1} (1 - e^{-k(t_i + \Delta t_i)}) \quad (2-33)$$

$$t'_i = -\ln(I_i / F_m k) / k \quad (2-34)$$

2. 当  $F_i \geq F_m$  时

此时由于包气带全部蓄满, 下渗量  $F_i = F_m$ ,  $\Delta F_i = 0$ , 时段  $\Delta t_i$  内所形成的地面径流量为

$$\Delta R_i = \Delta P_i - \Delta F_i = I_i \Delta t_i - \Delta F_i \quad (2-35)$$

#### 四、计算步骤说明

以三下渗计算模型特例为例, 简要说明其计算步骤, 对于第  $i$  时段而言, 计算步骤如下:

1) 计算时段初下渗量之和 (即时段初土壤含水量), 即  $F_i = F_{i-1} + \Delta F_{i-1}$ 。

2) 计算时段初所对应的时间坐标  $t$ ,  $t_i = -\ln(1 - F_i / F_m) / k$ 。

3) 假定第  $i$  时段内土壤饱和入渗, 计算时段初和时段末的下渗率, 即  $f_i = f_0 e^{-k t_i}$ ,  $f_{i+1} = f_0 e^{-k(t_i + \Delta t_i)}$ 。

4) 根据第  $i$  时段的降雨强度  $I_i$ , 判断  $I_i$  与  $f_i$ 、 $f_{i+1}$  之间的关系, 进而选用计算公式计算时段下渗量  $\Delta F_i$ 。

5) 进入下一时段。

## 五、下渗模型参数率定

### 1. 基本资料

如前所述, 在本次产流模型的率定中, 选用了 1979~1985 年较大的降雨径流资料和 1986~1992 年的全部降雨径流资料, 共计 41 场。各场降雨的产流量(由库容反推)及相应的  $x$  值见表 2-4。

表 2-4 产流量计算值与实测值对照表

降雨序号	降雨时段数	面平均降雨量(mm)	$x$ 值	实测产流量(万 $m^3$ )	预报产流量(万 $m^3$ )	绝对差值(万 $m^3$ )	折合径流深(mm)	相对差值(%)
1	10	63.2	-0.333	438	277	-162	1.5	
2	66	176.2	-0.333	6697	7070	373		5.6
3	7	85.6	0.625	1264	1252	-13	0.1	-1.0
4	21	119.0	0.125	4500	4962	463		10.3
5	30	209.5	-0.250	12619	12802	183	1.7	1.4
6	21	68.9	0.042	950	1192	242	2.2	
7	24	57.7	0.250	400	385	-15	0.1	-3.9
8	10	28.2	-0.333	115	28	-87	0.8	
9	66	232.5	-0.333	14151	13738	-413		-2.9



续表

降雨 序号	降雨 时段数	面平均 降雨量 (mm)	$x$ 值	实测 产流量 (万 $m^3$ )	预报 产流量 (万 $m^3$ )	绝对差值 (万 $m^3$ )	折合 径流深 (mm)	相对 差值 (%)
10	28	38.0	-0.167	1500	75	-1426	>3.0	>20.0
11	8	40.9	-0.167	100	84	-17	0.2	-16.5
12	18	20.2	-0.333	40	13	-27	0.2	
13	48	46.9	-0.333	20	38	18	0.2	
14	24	28.8	0.250	10	9	-1	0.0	-7.4
15	6	18.9	0.167	10	19	9	0.0	
16	4	13.0	-0.250	10	9	-1	0.0	-14.3
17	14	48.3	-0.083	10	55	45	0.4	
18	6	39.7	0.167	150	290	140	1.3	
19	8	42.4	-0.333	270	237	-33	0.3	-12.2
20	10	38.1	-0.333	450	573	123	1.1	
21	32	89.4	0.500	2233	2091	-142	1.3	-6.4
22	22	32.0	0.000	20	21	1	0.0	2.5
23	10	29.9	-0.167	30	161	131	1.2	0.2
24	16	46.9	0.500	150	150	0	0.0	
25	22	18.8	0.000	2	4	2	0.0	
26	18	27.7	0.583	2	8	6	0.0	
27	33	60.8	0.250	200	137	63	0.6	

续表

降雨 序号	降雨 时段数	面平均 降雨量 (mm)	$x$ 值	实测 产流量 (万 $m^3$ )	预报 产流量 (万 $m^3$ )	绝对差值 (万 $m^3$ )	折合 径流深 (mm)	相对 差值 (%)
28	20	24.8	0.083	10	13	3	0.0	
29	20	34.0	-0.333	10	32	22	0.2	
30	11	67.7	0.250	264	282	18	0.2	6.7
31	7	49.3	-0.292	1070	967	103	1.0	9.5
32	8	27.2	0.333	260	341	81	0.8	
33	9	43.7	0.375	2114	1938	-176	1.6	-8.3
34	69	84.0	0.542	3544	3699	155	1.4	4.4
35	25	61.8	0.292	846	906	60	0.6	7.0
36	6	39.4	-0.292	198	180	-18	0.2	-9.1
37	8	66.7	0.292	382	336	-46	0.4	-12.0
38	8	67.4	-0.333	176	125	449	>3.0	>20.0
39	8	40.0	0.333	250	105	-145	1.4	
40	22	59.4	0.000	217	308	91	0.8	
41	20	134.9	-0.333	2600	4033	1433	>3.0	>20.0

## 2. 模型参数率定说明

(1) 前期影响雨量的计算。对于每场降雨, 根据降雨开始时间确定其相应的  $x$  值, 利用  $Pa$  的计算式, 选用不同的土壤含水量日消退系数  $k$  ( $k=0.80\sim0.98$ , 步长为 0.01) 计算各站(门楼、庙后、大庄头、臧格庄)的前期影响雨量, 并将计算结果存



入数据库,为了与下渗模型中参数  $k$  相区别,下文中日消退系数  $k$  暂记为  $k_1$ 。

(2) 降雨资料。本次选用的降雨资料共计 41 场,根据实测资料,选用计算时段长为 1h,按平均分配转换成定时段降雨资料,并将各站(共 4 个站)的定时段降雨资料输入计算机,建立了相应的数据库。

(3) 径流资料。与降雨资料相配套,根据每次降雨前后门楼水库的库容变化情况,反推该次降雨的产流量及入库流量过程,共计 41 场,并将该过程转换为定时段(时段长为 1h)流量过程,将定时段流量过程输入计算机,建立了相应的数据库。

(4) 模型参数率定过程。输入模型参数初始值  $F_m$ 、 $k$ 、 $n$  和日消退系数  $k_1$ ,打开降雨径流数据库,计算各场降雨的产流量,并与实测产流量比较,统计各场的计算误差,将 41 场计算误差的绝对值累加,得总计算误差,根据总误差的大小调整参数  $m$ 、 $k$ 、 $n$  和  $k_1$ ,直到总误差达到相对较小时所对应的参数即为模型参数的率定值。本次参数的率定结果为  $F_m = 97.5$ ,  $k = 1.2$ ,  $n = 0.22$ ,  $k_1 = 0.91$ ,计算结果见表 2-4。

### 3. 计算结果说明

由表 2-4 可见,在用以率定模型参数的大小 41 场洪水中,第 5、9 两场特大洪水拟合的相当好,第 2、4、21、33 场和第 34 场大中型洪水拟合的也比较满意,除了第 10、38 场和第 41 场之外,其它中小洪水中有部分场次存在一定误差,但在允许误差范围之内,可认为是实测数据的随机误差所造成,该误差均符合水文预报规范要求(预报的相对误差小于 20% 或绝对误差小于 3mm)。而对于第 10、38 场和第 41 场而言,经过对原始资料

的反复分析,初步认为第 10 场可能是暴雨中心漏测;第 41 场的计算产流量明显大于实测产流量,本次在计算实测产流量时,一般是截止到雨停后 3 天左右,对绝大部分场次而言,3 天后入库量已非常小,可不再考虑,而第 41 场洪水在 3 天后入库流量仍相当大(后期没有再发生降雨),可能是造成计算误差的原因之一,第 38 场的计算误差偏大的原因还有待分析。

## 六、产流模型验证

前面对模型参数进行了率定,为了进一步验证该模型及其参数是否适合本流域,我们选用了 1994 年实测降雨径流资料(共计 6 场)对该模型及其参数进行了验证,验证结果见表 2-5。

表 2-5 产流量验证结果表

降雨 序号	降雨 时段数	面平均 降雨量 (mm)	$x$ 值	实测 产流量 (万 $m^3$ )	预报 产流量 (万 $m^3$ )	绝对差值 (万 $m^3$ )	折合 径流深 (mm)	相对 差值 (%)
1	5	35.9	-0.125	24.0	36.1	12.1	0.11	50.3
2	6	72.3	0.083	277.0	599.4	322.4	3.00	116.4
3	26	80.5	-0.333	2362.0	2649.7	287.7	2.66	12.2
4	32	94.1	-0.333	3623.0	3566.9	-56.1	0.52	1.5
5	6	39.8	0.375	1376.0	1207.9	-168.1	1.56	12.2
6	9	77.8	0.083	3984.0	3795.8	-188.2	1.75	4.7



### 第三节 汇流计算的系统分析模型

#### 一、冲激响应函数模型

##### 1. 单输入—单输出系统的冲激响应函数模型

对于单输入—单输出系统, 输入  $u(t)$  和输出  $y(t)$  之间的关系可描述为

$$y(t) = \int_{-\infty}^t h(t-x)u(x-\tau_0)dx \quad (2-36)$$

式中  $h(t-x)$  为连续情况下的冲激响应函数。对于离散系统, 则可用权序列

$$\{h(i)\} \quad i = 1, 2, \dots$$

表示。此时, 输入和输出之间可用下列离散形式描述

$$y(k) = \sum_{i=k-\infty}^k h(k-i)u(i-\tau) \quad (2-37)$$

无穷项求和无疑给计算带来困难, 事实上, 水文系统的记忆长度并不是无限的, 因此, 系统的脉冲响应函数  $h(t)$ , 当  $t$  大于某个数值时它的值已趋向于零。此时, 上式可简化为

$$y(k) = \sum_{i=k-p}^k h(k-i)u(i-\tau) + e(k) \quad (2-38)$$

式中  $p$  称为系统的记忆长度。式 (2-38) 即为单输入—单输出水文系统的冲激响应函数描述。

##### 2. 多输入—单输出系统的冲激响应函数模型

对于具有  $m$  个输入的多输入单输出系统, 系统的输出可表

示为

$$y(k) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=k-\infty}^k h_j(k-i) u_j(i-\tau_j) + e(k)$$

考虑到水文系统的记忆长度有限，上式可简化为

$$y(k) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=k-p_j}^k h_j(k-i) u_j(i-\tau_j) + e(k) \quad (2-39)$$

式中  $p_i$ ——第  $i$  路输入的记忆长度；

$h_i$ ——第  $i$  路的输入的脉冲响应纵标；

$u_i$ ——第  $i$  路输入；

$\tau_i$ ——第  $i$  路输入的滞时参数；

$e(k)$ ——随机误差。

## 二、冲激响应函数模型的最小二乘识别

### 1. 单输入—单输出系统冲激响应函数模型的最小二乘识别

由前可知，单输入—单输出系统可描述为

$$y(k) = \sum_{i=k-p}^k h(k-i) u(i-\tau) + e(k)$$

利用实测数据  $\{y(k), u(k)\}$ ， $k=0, 1, 2, \dots, (p+N)$ ，代入上式，可建立  $N+1$  个方程的方程组，可用矩阵形式表示为

$$Y = UH + V \quad (2-40)$$

式中  $Y = [y(p+\tau) \ y(p+\tau+1) \ \dots \ y(p+N)]^T$

$$H = [h_0 \ h_1 \ \dots \ h_p]^T$$

$$E = [e_p \ e_{p+1} \ \dots \ e_{p+N}]^T$$



$$U = \begin{bmatrix} u(p) & u(p-1) & \cdots & u(0) \\ u(p+1) & u(p) & \cdots & u(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u(p+N-\tau) & u(p+N-\tau-1) & \cdots & u(N-\tau) \end{bmatrix}$$

当  $N \gg P$  时, 利用最小二乘原理, 可求得冲激响应纵标  $H$  的估计式为

$$H = (U^T U)^{-1} U^T Y \quad (2-41)$$

2. 多输入—单输出系统冲激响应函数模型的最小二乘识别

由前可知, 多输入—单输出系统可描述为

$$y(k) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=k-p_j}^k h_j(k-i) u_j(i-\tau_j) + e(k)$$

不失一般性, 先讨论  $p_j = p, \tau_j = \tau$  时的识别问题。此时系统可描述为

$$\begin{aligned} y(k) &= \sum_{j=1}^m \sum_{i=k-p}^k h_j(k-i) u_j(i-\tau) + e(k) \\ &= \sum_{i=k-p}^k h_1(k-i) u_1(i-\tau) \\ &\quad + \sum_{i=k-p}^k h_2(k-i) u_2(i-\tau) \\ &\quad + \cdots + \sum_{i=k-p}^k h_m(k-i) u_m(i-\tau) + e(k) \end{aligned}$$

令

$$H_i = [h_i(0) \ h_i(1) \ \cdots \ h_i(p)]^T$$

$$U_i = \begin{bmatrix} u_i(p) & u_i(p-1) & \cdots & u_i(0) \\ u_i(p+1) & u_i(p) & \cdots & u_i(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_i(p+N-\tau) & u_i(p+N-\tau-1) & \cdots & u_i(N-\tau) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 \text{再令} \quad H &= [H_1^T \ H_2^T \ \cdots \ H_m^T]^T \\
 U &= [U_1 \ U_2 \ \cdots \ U_m] \\
 Y &= [y(p+\tau) \ y(p+\tau+1) \ \cdots \ y(p+N)]^T \\
 E &= [e(p+\tau) \ e(p+\tau+1) \ \cdots \ e(p+N)]^T
 \end{aligned}$$

则上式可写成

$$Y = UH + V \quad (2-42)$$

同样，利用最小二乘原理，可求得  $H$  的估计式为

$$H = (U^T U)^{-1} U^T Y \quad (2-43)$$

$$\text{式中 } U = \begin{bmatrix} u_1(p) & u_1(p-1) & \cdots & u_1(0) \\ u_1(p+1) & u_1(p) & \cdots & u_1(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_1(p+N-\tau) & u_1(p+N-\tau-1) & \cdots & u_1(N-\tau) \\ u_2(p) & u_2(p-1) & \cdots & u_2(0) \\ u_2(p+1) & u_2(p) & \cdots & u_2(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_2(p+N-\tau) & u_2(p+N-\tau-1) & \cdots & u_2(N-\tau) \\ u_m(p) & u_m(p-1) & \cdots & u_m(0) \\ u_m(p+1) & u_m(p) & \cdots & u_m(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_m(p+N-\tau) & u_m(p+N-\tau-1) & \cdots & u_m(N-\tau) \end{bmatrix}$$

### 三、冲击响应函数模型相关识别法简介

以单输入—单输出系统为例，首先再写一下方程 (2-41)：

$$H = \left( \frac{1}{N+1} U^T U \right)^{-1} \left( \frac{1}{N+1} U^T Y \right)$$



$$\text{令} \quad \Phi = \frac{1}{N+1} U^T U \quad \Gamma = \frac{1}{N+1} U^T Y$$

则  $H$  可表示为

$$H = \Phi^{-1} \Gamma \quad (2-44)$$

假定输入输出序列  $\{u(k)\}$  和  $\{y(k)\}$  是平稳各态历经随机过程, 定义实测数据的自相关和互相关函数为

$$\varphi_{uu}(k) = \frac{1}{N+1} \sum_{j=c}^{c+N} u(j) u(j-k)$$

$$\varphi_{uy}(k) = \frac{1}{N+1} \sum_{j=c}^{c+N} u(j-\tau) y(j-k)$$

当  $N$  足够大时, 上式定义的相关函数不随  $c$  而变化, 并且可得到  $\Phi$ ,  $\Gamma$  的表达式为

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_{uu}(0) & \varphi_{uu}(1) & \varphi_{uu}(2) & \cdots & \varphi_{uu}(p) \\ & \varphi_{uu}(0) & \varphi_{uu}(1) & \cdots & \varphi_{uu}(p-1) \\ & & \varphi_{uu}(0) & \cdots & \varphi_{uu}(p-2) \\ & \text{对称} & & & \vdots \\ & & & & \varphi_{uu}(0) \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \varphi_{uy}(\tau) \\ \varphi_{uy}(\tau-1) \\ \vdots \\ \varphi_{uy}(\tau-p) \end{bmatrix}$$

当各阶自相关和互相关函数求得后, 代入式 (2-44) 则可求得  $H$ 。对于多输入多输出系统可类似给出, 此处不再详述。

#### 四、内夹河流域冲激响应函数模型参数的确定

前面已经介绍了模型参数的识别方法, 但在实际应用时也会

遇到困难。例如，资料序列太短，输入序列之间的相依性太强等，都会给参数识别带来麻烦。为此，本次选用了首先推求流域平均参数（因该流域面积小），然后在平均参数的基础上，按经验确定各输入相应的参数，通过反复修改，使计算过程与实测过程拟合较好为止。最后确定各输入相应的滞时参数为：门楼 0、庙后 1、大庄头 1、臧格庄 4，各输入的相应纵坐标值见表 2-6。

### 五、预报过程的验证

应用表 2-6 中给定的响应纵标和前面得到的产流过程，对入库流量过程进行了验证，以第 9 场为例，计算过程和实测过程对照情况见表 2-7。过程线的拟合情况尚可，但计算过程的尾部偏低。

表 2-6 各输入的相应纵坐标值 单位： $\text{m}^3/\text{s}$

时段	门楼	庙后	大庄头	臧格庄
0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2.8	3.4	1.1	5.0
2	14.1	8.8	2.8	14.8
3	24.4	16.1	5.2	27.6
4	28.6	24.1	7.8	41.3
5	30.4	34.4	11.1	59.0
6	29.8	45.9	14.9	78.5
7	27.1	55.1	17.8	92.0



续表

时段	门楼	庙后	大庄头	臧格庄
8	24.3	62.0	20.1	103.1
9	21.7	65.1	21.1	108.2
10	19.9	60.2	19.5	109.7
11	16.9	54.5	17.7	100.1
12	14.3	49.3	16.0	90.0
13	12.3	43.0	13.9	77.4
14	10.5	37.9	12.3	64.0
15	9.2	34.4	11.1	55.6
16	7.8	28.7	9.3	46.0
17	6.4	25.8	8.4	38.0
18	5.4	21.2	6.9	32.0
19	4.6	16.6	5.4	25.6
20	3.8	13.2	4.3	20.6
21	3.1	10.3	3.3	15.7
22	2.6	8.0	2.6	10.9
23	1.9	4.6	1.5	8.3
24	1.5	3.2	1.0	7.4
25	1.2	2.6	0.8	6.4
26	1.0	2.3	0.7	5.5

续表

时段	门楼	庙后	大庄头	臧格庄
27	0.9	2.0	0.7	4.5
28	0.8	1.7	0.6	4.0
29	0.6	1.4	0.5	3.4
30	0.5	1.1	0.4	3.1
31	0.4	0.9	0.3	2.6
32	0.3	0.6	0.2	2.2
33	0.1	0.3	0.1	1.8
34	0.0	0.0	0.0	1.4
35				1.0
36				0.7
37				0.4
38				0.1
39				0.0

表 2-7

计算过程和实测过程比较表

 单位:  $\text{m}^3/\text{s}$ 

时段	计算值	实测值	时段	计算值	实测值
0	0.0	0.0	6	57.6	24.1
1	0.9	2.9	7	96.8	29.2
2	1.5	5.9	8	146.8	50.7
3	3.5	8.8	9	216.8	72.2
4	10.4	13.9	10	293.1	58.3
5	26.7	19.0	11	371.6	44.4



续表

时段	计算值	实测值	时段	计算值	实测值
12	465.3	79.2	32	185.5	177.2
13	571.3	113.9	33	192.3	162.2
14	688.6	308.4	34	208.9	180.8
15	804.7	502.8	35	230.4	163.0
16	908.8	613.9	36	259.4	218.3
17	992.7	904.2	37	301.5	218.5
18	1040.7	1022.3	38	358.0	218.7
19	1053.2	870.8	39	420.3	207.0
20	1031.1	855.5	40	478.3	195.4
21	980.4	793.6	41	532.3	252.5
22	901.3	754.8	42	582.6	309.6
23	807.7	668.7	43	628.6	324.4
24	704.1	518.4	44	676.3	339.1
25	602.2	494.1	45	720.3	340.1
26	509.7	495.7	46	748.6	341.1
27	423.1	402.7	47	767.9	385.4
28	348.6	215.2	48	779.4	429.7
29	283.6	229.3	49	788.9	452.0
30	233.0	215.7	50	806.6	473.8
31	200.0	174.2	51	847.4	490.5

续表

时段	计算值	实测值	时段	计算值	实测值
52	881.8	507.1	64	821.2	895.8
53	911.2	639.2	65	772.7	828.5
54	941.2	700.0	66	718.0	763.5
55	964.2	827.9	67	665.0	683.0
56	981.2	862.6	68	598.2	605.5
57	994.5	930.1	69	521.4	528.9
58	1002.3	971.5	70	452.6	483.3
59	1004.0	1060.4	71	386.9	438.0
60	991.0	1119.1	72	326.7	402.0
61	955.1	1060.2	73	273.9	366.3
62	918.4	1052.2	74	224.2	324.4
63	870.3	1007.7			

注 时段长为 1h。

## 第四节 变动积分流域汇流 计算数学模型

上节介绍了汇流计算的系统分析模型。为了多种模型对比分析,探讨流域汇流的机理,本节介绍另一种模型——变动积分流域汇流计算数学模型。



## 一、问题的引入

自 18 世纪以来,在汇流研究方面取得了许多进展,圣维南方程组的建立为汇流提供了理论基础。L.K. 谢尔曼单位线的问世,从而诞生了汇流理论研究的黑箱分析法。G.T. 麦卡锡 (G.T.Mccarthy) 的马斯京干洪水演算法、C.O. 克拉克 (G.O.Clark) 的汇流计算法、Г.Л. 加里宁与 Л.И. 米留可夫的单位洪水法、O.H. 迈耶 (O.H.Mayer) 的滞后演算法、J.E. 纳什 (J.E.Nash) 瞬时单位线模型、中国马斯京干分段连续流量演算法 (有限差解及解析解) 和分段连续滞后演算模型,等等,在汇流研究中都具有重要的意义。较之其他模型,J.E. 纳什模型和分段连续滞后演算模型在中国应用较为广泛、代表性较强,下面仅对这两个模型作一简单的讨论。

### 1. J.E. 纳什瞬时单位线模型

J.E. 纳什瞬时单位线是线性水文系统的第一个脉冲响应函数,其分析问题的思路对于引进系统分析的方法研究流域汇流具有重要意义。该法的不足之处可归结为以下几点:

1) 集中性调蓄: J.E. 纳什法认为降落在流域上任一点的雨水,在向出口断面汇集过程中经受着相同的调节作用。

2) 集中性输入: 由 J.E. 纳什法的公式推导过程可知,该法假定了流域的输入集中在流域的顶端。

3) 整体式模型: J.E. 纳什法是将流域作为一个整体来研究的。因此,该法较难考虑降雨的空间分布和产流面积变化对流域汇流的影响。

4) 在 J.E. 纳什模型中,仅用调蓄作用来反映水体作为调蓄



场和传播场共同作用的效应。这种用调蓄作用来反映水体的平移作用的方法，在一些情况下（例如山区性河流）是不能达到预想目标的。

## 2. 分段连续滞后演算模型

分段连续滞后演算模型（包括流域分块移滞汇流模型）是单一河段滞后演算法的进一步发展。它将水体作为调蓄场和传播场两种作用分开来考虑，使得概念上更为清晰；在山区性河流的洪水演算中取得了较好的效果。此法的不足之处可归纳为以下三点：

1) 在模型的建立过程中，假定了各河段的调蓄系数和平移参数均相同，使推导出的模型结构不具有通用性。

2) 在模型应用于流域汇流中，模型中参数  $n$  被认为是流域的分块数，仍然是沿用了 J.E. 纳什模型中参数的物理意义。这不但使  $n$  值的意义不明确，（特别是当  $n$  为非自然数时）而且常常使汇流曲线出现多峰型和不能较好地反映降雨的空间变化。（特别是干旱、半干旱地区的中、小流域）汇流曲线出现多峰型的原因，是因为流域的汇流曲线是由各块的汇流曲线线性组合而成，这种组合是跳跃式的组合而非连续式的组合。例如：第一块的汇流参数  $n$  为 1，第二块的汇流参数  $n$  为 2， $\dots$ ，第  $n$  块的汇流参数  $n$  为  $n$ ，而界于 1 与 2、2 与 3、 $\dots$ 、 $n-1$  与  $n$  之间的  $n$  值均未参与这种组合。因而流域的汇流曲线将出现跳跃现象。在干旱地区降雨的空间变化极为复杂，要能较好地反映这种空间变化，就必须将流域分为较多的块数，若每个分块中的  $n$  值均采用相应的自然数  $n$ ，则流域汇流曲线比较平缓，使计算的洪峰流量显著偏低。若想使洪峰流量拟合较好，流域的分块数则必须减



小,因而就不能较好地反映降雨的空间变化。要想较好地反映降雨的空间变化且使计算的洪峰值拟合较好,则各分块的汇流参数 $n$ 不应采用自然数,而应选适当的实数值。

3) 在模型参数的定量中应用了三阶矩值。由于分割基流的人为性,造成高阶矩值变幅很大,使计算的参数值变幅也较大,较难进行参数综合。

## 二、数学模型结构

在我国北方的干旱、半干旱地区,暴雨在时程上分布极不均匀。同一次暴雨,雨强随时间的变化急剧,高强度暴雨常集中在几十分钟内降落,其余时间的雨强不大。暴雨在空间上的变化就更为复杂,同一场暴雨,在几十公里甚至几公里内其雨量和强度往往相差很大。因而,在干旱和半干旱地区的产、汇流计算中,要能够较好地反映降雨的时空变化问题,建立的计算模型应为分散型模型。

### 1. 模型的物理抽象和模型结构的推导

将整个流域按支流或支流的组合划分成若干单元,在每个单元内按等流时线的概念划分成若干小单元。只要求得各单元在流域出口断面的出流过程,则全流域的出流过程即为各单元出流过程的叠加。下面我们先讨论一下某一单元的汇流曲线,然后求出流域的汇流曲线。

流域的出流过程,是净雨受传播场和调蓄场综合作用的结果。对于某一单元,净雨首先经过单元区汇入主河槽,然后经过河网汇流到达流域出口断面。在单元区内的汇流计算,采用等流时线的概念与移滞模型的概念有机结合,而河网汇流阶段只需考

虑后面一个概念即可。根据上述设想，可作出某一单元汇流计算的示意图，见图 2-4。

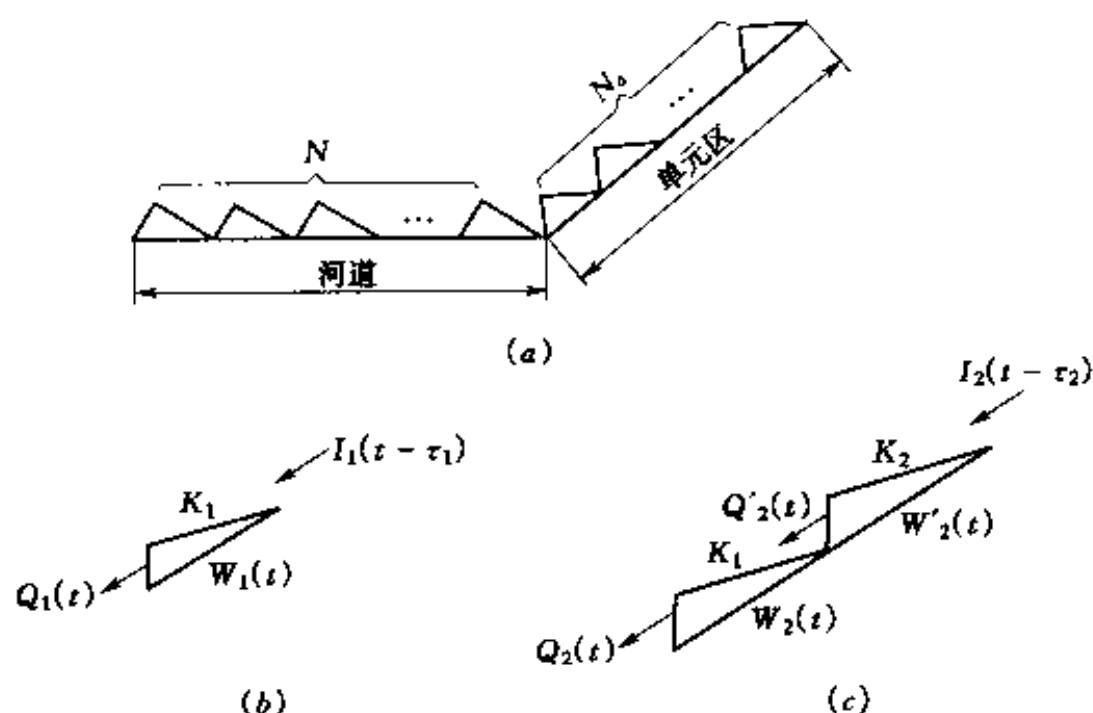


图 2-4 某单元汇流计算示意图

如图 2-4 (b)，对于第一个河段，可建立水量平衡方程和槽蓄方程如下：

$$I_1(t - \tau_1) - Q_1(t) = \frac{dW_1}{dt} \quad (2-45)$$

$$W_1(t) = K_1 Q_1(t) \quad (2-46)$$

联解上述两式，可得

$$Q_1(t) = \frac{1}{1 + K_1 D} I_1(t - \tau_1) \quad (2-47)$$

同理，如图 2-4 (c)，对于第二个河段可求得

$$Q_2(t) = \frac{1}{1 + K_1 D} \frac{1}{1 + K_2 D} I_2(t - \tau_1 - \tau_2) \quad (2-48)$$

对于第  $N + i$  个河段，同理可得



$$\begin{aligned}
 Q_{N+i}(t) &= \prod_{j=1}^{N+i} \frac{1}{1 + K_j D} I_{N+i} \left( t - \sum_{i=1}^{N+i} \tau_i \right) \\
 &= f(D) I_{N+i} \left( t - \sum_{i=1}^{N+i} \tau_i \right) \quad (2-49)
 \end{aligned}$$

式中

$$f(D) = \prod_{j=1}^{N+i} \frac{1}{1 + K_j D}$$

在流域汇流计算中,我们总希望求出汇流曲线。有了汇流曲线就可以进行流域汇流计算。汇流曲线是消去了人流历时影响、可用一般代数方程表示的流域汇流曲线方程。在式(2-49)中,一方面存在人流函数  $I(t)$ , 另一方面存在有微分算子  $D$ , 并非一般代数方程。为了求出流域汇流曲线方程, 先讨论一下式(2-49)中的  $f(D)$ 。

在数学分析中, 当讨论有理真分式时曾经证明过, 对于不可约的有理真分式  $R(x)/P(x)$ , 可以分解为形如  $A_{ks}/(x-\lambda_k)^s$  的最简分式之和, 即当  $\lambda_k (k=1, 2, \dots)$  部分相同时

$$\frac{R(x)}{P(x)} = \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^{n_k} \frac{A_{ks}}{(x-\lambda_k)^s} \quad (2-50)$$

当  $\lambda_k (k=1, 2, \dots)$  互不相同

$$\frac{R(x)}{P(x)} = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{x-\lambda_k} \quad (2-51)$$

式中  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  (或  $\lambda_n$ ) ——  $P(x)=0$  的互不相等的根;

$n_k$  ——特征根  $\lambda_k (k=1, 2, \dots, m)$  的重数;

$A_{ks}, A_k$  ——待定系数。

由以上分析可见, 当  $K_j (j=1, 2, \dots, n)$  为实根时,

$f(D)$ 总可表示成变量为  $D$  的最简分式之和。现在的问题就是如何简便地求出系数  $A_{k_s}$  或  $A_k$  的具体表达式。下面分两种情况进行讨论。

(1)  $P(x)=0$  的  $n$  个根  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  均为单根 (即互不相等)。对式 (2-51) 施行一系列的数学变换, 可得到系数  $A_k$  的表达式为

$$A_k = R(\lambda_k)/P'(\lambda_k) \quad (2-52)$$

由于  $\lambda_k$  是任意指定的一个, 可知上式对  $k=1, 2, \dots, n$  均成立。将式 (2-52) 代入式 (2-51) 可得

$$\frac{R(x)}{P(x)} = \sum_{k=1}^n \frac{R(\lambda_k)}{P'(\lambda_k)} \frac{1}{x - \lambda_k} \quad (2-53)$$

当  $R(x)=1, P(x)=(1+K_1D)(1+K_2D)\dots(1+K_{N+i}D)$  时, 有

$$P'(D) = \sum_{s=1}^{N+i} K_s \prod_{j=1, j \neq s}^{N+i} (1 + K_j D) \quad (2-54)$$

又因  $\lambda_j = -1/K_j$  ( $j=1, 2, \dots, N+i$ ), 将  $\lambda_j$  代入式 (2-54) 则有

$$P'(\lambda_r) = K_r^{-(N+i)+2} \prod_{j=1, j \neq r}^{N+i} (K_r - K_j)$$

所以, 在前述条件下,  $R(D)/P(D)$  的具体表达式为

$$\frac{R(D)}{P(D)} = \sum_{k=1}^{N+i} \frac{K_k^{N+i-1}}{\prod_{j=1, j \neq k}^{N+i} (K_k - K_j)} \frac{1}{(1 + K_k D)} \quad (2-55)$$

将式 (2-56) 代入式 (2-49) 则有



$$Q_{N+i}(t) = \sum_{k=1}^{N+i} \frac{K_k^{N+i-1}}{\prod_{j=1, j \neq k}^{N+i} (K_k - K_j)} \frac{1}{(1 + K_k D)} I_{N+i} \left( t - \sum_{k=1}^{N+i} \tau_k \right) \quad (2-56)$$

上式中, 当  $I_{N+i}(t) \rightarrow \delta(t)$  时, 运用拉氏变换法可求得第  $N+i$  个小单元相应的汇流曲线为

$$U_{N+i}(0, t) = \sum_{k=1}^{N+i} \frac{K_k^{N+i-2}}{\prod_{j=1, j \neq k}^{N+i} (K_k - K_j)} \exp \left[ - \left( t - \sum_{k=1}^{N+i} \tau_k \right) / K_k \right] \quad (2-57)$$

该单元的汇流曲线即为该单元内各小区汇流曲线的加权组合。若用  $\beta_i$  ( $i=1, 2, \dots, N_n$ ) 表示第  $i$  小区的加权系数, 则该单元的汇流曲线为

$$U_n(0, t) = \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{k=1}^{N+i} \frac{\beta_i K_k^{N+i-2}}{\prod_{j=1, j \neq k}^{N+i} (K_k - K_j)} \exp \left[ - \left( t - \sum_{k=1}^{N+i} \tau_k \right) / K_k \right] \quad (2-58)$$

(2)  $P(x) = 0$  的  $n$  个根有部分相等 (或全部相等)。利用数学分析原理, 采用一系列的数学技巧, 对式 (2-50) 进行数学变换可得

$$A_{rs} = \frac{1}{(n_r - s)!} \left\{ \left[ \frac{R(x)}{P(x)} (x - \lambda_r)^{n_r} \right]^{(n_r - s)} \right\} \Big|_{x=\lambda_r} \quad s = 1, 2, \dots, n_r \quad (2-59)$$

将式 (2-59) 代入式 (2-50) 可得:

$$\frac{R(x)}{P(x)} = \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^{n_k} \frac{1}{(n_k - s)!} \left\{ \left[ \frac{R(x)}{P(x)} (x - \lambda_k)^{n_k} \right]^{(n_k - s)} \right\} \Big|_{x=\lambda_k} \frac{1}{(x - \lambda_k)^s} \quad (2-60)$$

令式 (2-60) 中  $R(x) = 1$ , 并代入式 (2-49), 则有

$$Q_{N+i}(t) = \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^{n_k} \frac{1}{(n_k - s)!} \left\{ \left[ \frac{(D - \lambda_k)^{n_k}}{P(D)} \right]^{(n_k - s)} \right\} \Big|_{D=\lambda_k} \times \frac{1}{(D - \lambda_k)^s} I_{N+i} \left( t - \sum_{k=1}^{N+i} \tau_k \right) \quad (2-61)$$

式中, 当  $I_{N+i}(t) \rightarrow \delta(t)$  时, 运用拉氏变换法可求得第  $N+i$  个小单元相应的汇流曲线为

$$U_{N+i}(0, t) = \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^{n_k} \frac{1}{(n_k - s)!} \left\{ \frac{1}{K_k^{n_k}} \left[ \frac{(1 + K_k D)^{n_k}}{P(D)} \right]^{(n_k - s)} \right\} \Big|_{D=-\frac{1}{K_k}} \times \frac{1}{(s-1)!} \left( t - \sum_{k=1}^{N+i} \tau_k \right)^{(s-1)} \exp \left[ -\frac{1}{K_k} \left( t - \sum_{k=1}^{N+i} \tau_k \right) \right] \quad (2-62)$$

类似于 (1) 的讨论, 可求得该单元的汇流曲线为

$$U_n(0, t) = \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^{n_k} \frac{\beta_i}{(n_k - s)!} \left\{ \frac{1}{K_k^{n_k}} \left[ \frac{(1 + K_k D)^{n_k}}{P(D)} \right]^{(n_k - s)} \right\} \Big|_{D=-\frac{1}{K_k}} \times \frac{1}{(s-1)!} \left( t - \sum_{k=1}^{N+i} \tau_k \right)^{(s-1)} \exp \left[ -\frac{1}{K_k} \left( t - \sum_{k=1}^{N+i} \tau_k \right) \right] \quad (2-63)$$

最后, 可得到某一单元 (或第  $n$  个单元) 的汇流曲线方程, 即当各河段的调蓄系数均不相同 ( $K_1 \neq K_2 \neq \dots \neq K_i$ ) 时为

$$U_n(0, t) = \begin{cases} 0 & t < \sum_{k=1}^N \tau_k \\ \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{k=1}^{N+i} \frac{\beta_i K_k^{N+i-2}}{\prod_{j=1, j \neq k}^{N+i} (K_k - K_j)} \exp\left(-\frac{t - \sum_{k=1}^{N+i} \tau_k}{K_k}\right) & t \geq \sum_{k=1}^N \tau_k \end{cases} \quad (2-64)$$

当各河段的调蓄系数部分相同或全部相同 ( $K_i$  中有部分相等或全部相等) 时为

$$U_n(0, t) = \begin{cases} 0 & t < \sum_{k=1}^N \tau_k \\ \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^{n_k} \frac{\beta_i}{(n_k - s)!} \left\{ \frac{1}{K_k^{n_k}} \left[ \frac{(1 + K_k D)^{n_k}}{P(D)} \right]^{(n_k - s)} \right\} \Big|_{D = -\frac{1}{K_k}} & t \geq \sum_{k=1}^N \tau_k \end{cases} \quad (2-65)$$

式中  $W_i(t)$ ——蓄水量;

$Q_i(t)$ ——出流量;

$I_i(t)$ ——第  $i$  河段的人流量;

$t$ ——时间变量;

$U_n(0, t)$ ——第  $n$  个单元的汇流曲线纵标;

$\delta(t)$ ——单位脉冲函数;

$\tau_k$ ——第  $k$  河段的平移历时;

$K_k$ ——第  $k$  河段的调蓄系数;

$D = d/dt$ ——微分算子;

$N$ ——第  $n$  个单元的出口断面与全流域出口断面之间河道的分段数;

$N_n$ ——第  $n$  个单元内等流时线的个数;

$m$ ——特征根的个数;

$n_k$ ——特征根  $\lambda_k$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) 的重数;

其它符号意义同前。

## 2. 本模型与其它模型的关系

对子式 (2-64) 和式 (2-65) 进行适当的简化, 就可得到 O.H. 迈耶的滞后演算模型、C.O. 克拉克模型、J.E. 纳什模型、Г.Л. 加里宁与 Л.И. 米留可夫流域汇流模型、分块移滞流域汇流模型、分段连续滞后演算河道汇流模型等一系列具有代表性的模型。

## 三、变动积分流域汇流数学模型

### 1. 核函数中参数的物理意义

在式 (2-65) 中, 若令  $N = 0$ ,  $K_i = K$ ,  $\tau_i = \tau$  ( $i = 1, 2, \dots, n, \dots, N_n$ ), 且降雨集中在第  $n$  块流域上, 则式 (2-65) 可简化成如下形式

$$U(0, t) = \begin{cases} 0 & t < n\tau \\ \frac{1}{K\Gamma(n)} \left( \frac{t - n\tau}{K} \right)^{n-1} \exp\left(-\frac{t - n\tau}{K}\right) & t \geq n\tau \end{cases} \quad (2-66)$$

式 (2-66) 称为汇流核函数, 简称为核函数。

分析一下式 (2-66), 则不难求得该函数的峰现滞时  $t_p$  和



峰值  $u_m(0, t)$  分别为

$$t_p = n\tau + (n-1)K \quad (2-67)$$

$$U_m(0, t) = \frac{1}{K\Gamma(n)}(n-1)^{n-1}\exp(-n+1) \quad (2-68)$$

借助于式 (2-67)、式 (2-68), 通过理论分析, 可将核函数中参数的物理意义归纳如下:

1) 参数  $K$  是同时反映水体作为传播场和调蓄场两种作用的综合参数。

2) 参数  $\tau$  是反映水体作为传播场的参数。

3) 参数  $n$  与参数  $K$  一样, 属于综合参数。

## 2. 变动积分流域汇流数学模型

由上述 1. 的讨论可知, 核函数中参数  $n$ 、 $K$  均为综合参数。当  $K$  固定,  $n$  值越大则曲线变化越平缓,  $n$  值越小则曲线变化越陡峭, 不同的  $n$  值对应不同的曲线。在流域汇流研究中, 曲线越平缓表示水体受流域的调蓄作用越大, 即相应于流域上游的水体; 曲线越陡峭表示水体受流域的调蓄作用越小, 即相应于流域下游 (靠近流域出口断面) 的水体。曲线不同, 则表示水体受流域的调蓄作用不同。由此概念出发我们不难想像, 当给定某一  $n$  值, 对于某一场特定的降雨而言, 流域内自然存在一条理想的等调蓄曲线, 在该理想的等调蓄曲线上, 水体汇流曲线相应的参数为  $n$ 。不同的等调蓄曲线对应不同的  $n$  值。对于某一个具体的流域、某一场特定的降雨, 应有一个上限  $n$  值, 即距流域出口断面最远点的水体相应的汇流曲线所对应的  $n$  值, 用  $N_2$  表示。同样, 也应有一个下限  $n$  值, 即距流域出口断面最近点的水体相应的汇流曲线所对应的  $n$  值, 用  $N_1$  表示。若流域汇流

曲线是由  $N_1$  为下限、 $N_2$  为上限对核函数的定积分所构成，则此汇流曲线就反映了流域上不同点水体所受到流域的不同调蓄和平移作用。可以进一步设想，在核函数的积分中若加入综合权重函数  $f(x)$ ， $f(x)$  一方面反映流域面积的分布，另一方面反映暴雨的时空变化，则所求得的汇流曲线就综合反映了影响汇流的上述各因素。根据上述设想，可得到积分式汇流曲线的数学表达式为

$$U(0, t) = \frac{\int_{N_1}^{N_2} \frac{f(x)}{K\Gamma(x)} \left( \frac{t - x\tau}{K} \right)^{x-1} \exp\left(-\frac{t - x\tau}{K}\right) dx}{\int_0^{+\infty} \int_{N_1}^{N_2} \frac{f(x)}{K\Gamma(x)} \left( \frac{t - x\tau}{K} \right)^{x-1} \exp\left(-\frac{t - x\tau}{K}\right) dx dt}$$

简化上式，可得

$$U(0, t) = \begin{cases} 0 & x < N_1\tau \\ \int_{N_1}^{N_2} \frac{f(x)}{K\Gamma(x)} \left( \frac{t - x\tau}{K} \right)^{x-1} \exp\left(-\frac{t - x\tau}{K}\right) dx & x \geq N_1\tau \end{cases} \quad (2-69)$$

式中  $f(x)$  为综合权重函数，其表达式为

$$f(x) = \frac{\omega(x)\alpha(x)}{\int_{N_1}^{N_2} \omega(x)\alpha(x) dx} \quad (2-70)$$

式中  $\omega(x)$ ——流域面积分布函数；

$\alpha(x)$ ——降雨量沿程分布函数。

汇流曲线的累积曲线为

$$s(t) = \int_{N_1\tau/K}^{t/K} \int_{N_1}^{N_2} \frac{f(x)}{K\Gamma(x)} \left( \frac{t - x\tau}{K} \right)^{x-1} \exp\left(-\frac{t - x\tau}{K}\right) dx dt \quad (2-71)$$



时段为  $\Delta t$  的汇流曲线为

$$u(\Delta t, t) = \frac{1}{\Delta t} [s(t + \Delta t) - s(t)] \quad (2-72)$$

在式 (2-69) 中,  $f(x)$  为随机函数, 随着流域和降雨特性的不同而变化。它是由  $\alpha(x)$  和  $\omega(x)$  确定的。不同的  $f(x)$  可得到不同的汇流曲线  $u(0, t)$ 。在实际流域中, 水文站 (或雨量站) 在流域内是分散布设的, 也就是说只能得到一些离散点的雨量观测值,  $\alpha(x)$  的连续函数形式无法得到, 只能以阶梯函数的形式给出。这就决定了  $f(x)$  也只能用阶梯函数来表示。因而, 在实际流域中的汇流曲线为

$$U(0, t) = \begin{cases} 0 & t < \Delta x\tau \\ \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{K\Gamma(i\Delta x)} \left( \frac{t - i\Delta x\tau}{K} \right)^{i\Delta x - 1} \exp\left(-\frac{t - i\Delta x\tau}{K}\right) & t \geq \Delta x\tau \end{cases} \quad (2-73)$$

式中,  $\beta_i$  称为第  $i$  个单元的综合权重系数, 其具体表达式为

$$\beta_i = \frac{\omega(i)\alpha(i)}{\sum_{i=1}^n \omega(i)\alpha(i)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-74)$$

其中  $\omega(i)$ ——第  $i$  个单元的而积权;

$\alpha(i)$ ——第  $i$  个单元的雨量权。

由实际工作经验结合理论分析可知, 积分上限  $N_2$  值对于一个特定的流域和某一个特定的雨强来说是比较稳定的, 但对不同的流域或不同的雨强则相应有不同的  $N_2$  值。对于同一流域而

言,不同量级的洪水,相应的  $N_2$  值不同。洪水越大,相应的  $N_2$  值越小,即表示汇流速度快,洪峰流量高;洪水越小,相应的  $N_2$  值越大,即表示汇流速度小,洪峰流量低。 $N_2$  值的这种变化规律,正好可以反映汇流的非线性特性。因此,我们可对不同量级的洪水确定不同的值,通过  $N_2$  值的变化来考虑汇流中的非线性问题。当积分式流域汇流曲线的积分上限  $N_2$  值随洪水的量级不同而发生变化时,则称为变动积分流域汇流曲线,此时相应的汇流模型则称为变动积分流域汇流数学模型。

汇流非线性的修正方法有:①  $N_2 \sim Q_m$  关系线法(其中  $Q_m$  为洪峰流量);②  $N_2 \sim \bar{I}$  关系线法(其中  $\bar{I}$  为暴雨中心区平均雨强);③变动等流时线法。

### 3. 变动积分流域汇流数学模型参数的定量方法

在式(2-73)中共有3个参数: $K$ 、 $\tau$ 和 $N_2$ 。由前述分析可知,对于某一个具体的流域而言, $N_2$ 值的变化是比较稳定的。因此,在初步确定模型参数时,可先选数场具有代表性的降雨径流资料(面分布较为均匀,包括大、中、小不同量级的洪水)来确定 $N_2$ 的初值。在 $N_2$ 值确定后,其它两个参数的定量方法有以下两种:

(1) 矩法 对流域汇流曲线式(2-73)求一阶、二阶原点矩,可解出参数 $K$ 、 $\tau$ 的计算公式

$$K^2 = \frac{M_U^{(2)} - \left( \frac{M_U^{(1)}}{\sum_{i=1}^n i\beta_i} \right)^2 \sum_{i=1}^n i^2\beta_i}{\Delta x \sum_{i=1}^n i^2\beta_i} \quad (2-75)$$



$$\tau = \frac{M_U^{(1)}}{\Delta x \sum_{i=1}^n i\beta_i} - K \quad (2-76)$$

其中  $M_U^{(1)} = M_Q^{(1)} - M_I^{(1)} - \Delta x\tau$

$$M_U^{(2)} = M_Q^{(2)} - M_I^{(2)} - 2(M_Q^{(1)} - M_I^{(1)})(M_I^{(1)} + \Delta x\tau) + (\Delta x\tau)^2$$

联解式 (2-75) 和式 (2-76) 两式, 可求得参数  $K$  和  $\tau$ 。

(2) 矩法与优选法相结合 利用暴雨中心区相应的参数  $n'$  代入核函数式 (2-66) 中, 然后再求一阶原点矩, 可得

$$M_Q^{(1)} - M_I^{(1)} = n'(K + \tau) \quad (2-77)$$

又令  $\tau = \alpha K$ , 代入式 (2-77) 可得

$$K = (M_Q^{(1)} - M_I^{(1)}) / [n'(1 + \alpha)] \quad (2-78)$$

上式中,  $\alpha$  可通过适当的优选来确定。当  $\alpha$  确定后代入式 (2-78) 便可求得参数  $K$  值。

#### 四、变动积分流域汇流数学模型的验证

本文主要应用半干旱地区、资料条件较好的子州径流实验流域的资料, 对该模型进行了验证, 验证结果见表 2-8。由表 2-8 可见变动积分流域汇流数学模型, 从初步的验算结果来看, 应用于干旱、半干旱地区是可行的。对于其它地区而言, 由于问题相对更简单一些, 可望取得更好的应用效果。本节介绍的模型在理论上概括了目前常用的一些汇流计算方法。将水体作为传播场和调蓄场两种作用分开来考虑, 使建立的模型更具有通用性。

表 2-8 预报过程与实测过程对照表

序号	实 测 值				计 算 值				时差 (h)	峰差 (%)
	月	日	时分	$Q_M$	月	日	时分	$Q_M$		
1	7	5	1:12	28.1	7	5	1:06	28.3	0.10	0.1
2	7	14	22:54	23.7	7	14	22:38	18.2	0.26	-23.2
3	8	2	14:59	30.5	8	2	14:54	35.4	0.08	16.2
4	6	26	16:45	24.7	6	26	16:45	21.2	0	-14.2
5	7	17	18:44	47.4	7	17	18:41	42.6	0.05	-10.2
6	8	8	7:42	13.4	8	8	7:39	12.8	0.06	-4.5



### 第三章

## 流域设计暴雨计算方法研究

### 第一节 现方法存在的问题

通常确定设计暴雨的方法是在流域实测面平均雨量序列中，每年选一个一定历时的最大值，根据该最大值序列进行频率计算，求出所需频率的设计暴雨值，以此作为流域整个汛期的设计暴雨值。该法隐含的基本假定是：①随机变量  $x$ （不小于某一量级的雨量）在论域  $U$ （汛期）内任一区间发生的频率相同，即  $x$  在  $U$  内服从均匀分布；②年最大值序列中任一变量（不论发生在汛期何时）均服从同一组参数的分布。

以  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, 12$ ) 表示汛期（北方地区一般为 6~9 月）第  $i$  旬一日或三日最大值序列随机变量（见表 3-1、表 3-2、表 3-3），假定该变量服从皮尔逊Ⅲ型分布，暂以  $P_3$  表示皮尔逊Ⅲ型分布，则  $x_i \sim P_3(\bar{x}_i, C_{vi}, C_{si})$ 。对于旬最大一日或三日序列而言，由于各旬的统计参数不同，因此，各旬最大值序列服从于不同参数的  $P_3$  分布。通过大量分析研究发现，各旬最大值序列的均值差异显著，而变差系数  $C_v$  则相对比较稳定，如表 3-4、表 3-5、表 3-6 所示。若假定  $C_{vi} = C_v$ ,  $C_{si} = \alpha C_{vi} = \alpha C_v$ ,

旬最大一日降水量序列													单位: mm
年份	6月			7月			8月			9月			
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	
1964	12.96	21.93	53.22	64.55	55.72	69.97	36.54	79.80	44.11	41.29	39.92	1.79	
1965	0.36	23.96	10.10	47.36	18.04	132.68	65.96	33.41	3.58	0.01	0.75	0.01	
1966	26.66	4.70	41.52	10.81	35.78	33.06	28.63	7.91	41.30	36.40	1.88	0.03	
1967	13.06	2.38	8.08	23.84	103.30	10.60	48.17	39.74	7.25	28.30	7.15	3.07	
1968	2.48	7.64	15.31	18.17	25.91	0.00	6.15	42.07	0.41	9.97	1.31	0.81	
1969	5.73	3.05	14.36	21.58	31.17	9.23	63.15	21.14	7.96	23.56	16.41	41.91	
1970	6.39	34.18	4.02	9.46	76.40	87.70	16.75	1.32	19.43	22.03	20.19	5.71	
1971	15.71	11.50	55.45	64.90	44.03	23.58	37.39	15.30	31.24	70.80	0.28	53.21	
1972	0.00	13.64	0.08	89.84	7.77	58.37	30.92	33.70	11.95	31.58	1.69	5.59	
1973	16.10	27.33	3.15	1.74	28.87	33.03	15.58	13.06	73.28	26.18	42.23	25.37	
1974	27.80	8.90	0.40	10.60	2.80	40.80	52.00	91.70	52.20	4.90	12.50	26.90	
1975	10.50	5.00	21.50	47.30	18.50	41.30	9.20	98.60	104.40	16.30	8.90	0.30	
1976	27.00	9.50	106.30	32.30	6.60	49.30	33.30	104.10	29.00	45.80	40.40	2.70	



续表

年份	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1977	5.60	0.00	5.80	75.50	14.80	54.30	106.60	35.40	16.90	0.80	0.50	0.00
1978	12.30	11.00	77.90	94.10	12.40	5.50	25.10	110.60	26.40	25.00	14.00	0.10
1979	4.50	8.80	52.90	11.10	40.30	57.10	40.40	47.30	0.60	0.00	23.90	7.20
1980	17.00	7.20	81.20	22.10	4.20	21.00	1.00	9.60	4.70	29.30	0.00	5.40
1981	5.50	6.50	15.60	43.20	26.70	30.40	1.20	85.60	4.10	1.80	8.20	1.00
1982	8.50	35.50	16.50	2.60	16.70	15.30	119.10	14.60	174.20	6.60	0.00	0.00
1983	0.10	0.00	32.40	44.50	18.60	47.30	18.70	4.80	18.10	69.40	17.40	1.10
1984	31.80	35.20	1.40	33.60	29.70	30.40	68.40	31.10	29.40	7.00	3.60	24.90
1985	5.90	8.00	0.10	10.20	17.80	38.90	16.80	99.00	17.50	28.90	11.70	9.10
1986	4.80	12.50	13.50	0.00	39.30	11.80	9.60	28.30	1.90	3.30	0.30	8.10
1987	23.50	10.40	22.50	38.90	6.40	10.90	39.70	42.60	42.40	67.00	0.00	3.90
1988	2.40	12.30	5.10	32.00	38.60	12.90	6.80	18.80	51.80	17.20	11.30	0.00
1989	5.90	8.00	0.20	8.70	24.80	0.40	3.60	24.70	23.60	0.00	1.20	11.90

续表

年份	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1990	17.00	20.00	0.90	67.80	43.80	37.70	52.80	20.80	48.60	28.20	0.00	12.80
1991	16.10	4.10	66.80	3.20	32.50	61.30	5.70	2.70	19.70	40.50	20.70	0.00
1992	14.90	0.00	5.20	0.20	32.70	10.00	59.40	19.20	99.00	47.50	2.00	4.00
1993	20.57	0.77	57.63	0.20	13.83	12.70	13.53	2.24	24.48	0.32	13.32	0.11
1994	0.00	0.00	80.74	16.83	29.01	9.68	56.37	35.21	88.10	10.57	7.40	0.00
1995	36.19	1.50	9.78	0.99	46.44	68.59	62.94	99.43	39.30	9.35	0.00	7.28
1996	0.00	44.89	23.86	59.58	37.95	56.91	17.30	22.90	20.10	0.00	14.73	0.00
1997	3.19	0.00	0.00	12.15	40.33	0.99	20.11	195.38	20.02	0.00	8.54	6.96
1998	16.77	31.34	0.00	44.95	30.45	31.96	15.69	8.69	105.90	7.27	10.61	0.80
1999	3.37	73.33	2.58	18.64	4.93	36.96	18.77	0.00	14.69	22.03	29.96	10.31
2000	0.00	0.00	38.05	0.66	53.79	29.01	11.50	54.51	48.65	0.59	0.00	26.50
2001	0.16	27.59	64.67	22.39	1.02	49.57	76.35	18.56	0.33	12.27	0.61	13.15



表 3-2 旬最大三日降水量序列 (不跨期选样) 单位: mm

年份	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1964	13.73	31.27	53.22	107.40	85.32	114.41	58.34	88.26	68.35	45.29	42.85	1.79
1965	0.36	26.85	10.10	48.26	27.34	279.12	85.50	68.52	4.63	0.01	1.17	0.01
1966	32.47	4.92	51.67	11.38	54.48	37.54	41.37	7.99	41.19	52.97	1.88	0.03
1967	13.09	3.34	8.10	25.50	122.82	10.60	66.22	44.06	8.87	47.70	7.85	3.54
1968	3.51	8.55	28.85	18.17	33.16	0.13	9.90	42.56	0.41	10.42	1.31	0.81
1969	5.73	3.06	21.82	21.58	31.19	13.02	86.38	21.14	11.09	24.95	16.41	47.78
1970	6.48	50.68	7.69	14.79	77.14	175.19	19.77	1.32	30.04	32.43	20.56	5.74
1971	17.26	11.50	63.71	90.96	89.23	33.57	56.36	31.11	34.81	122.88	0.28	56.08
1972	0.00	18.41	0.09	102.67	8.50	59.12	48.26	40.52	25.15	41.47	1.83	5.85
1973	16.10	34.48	4.48	1.74	41.07	33.68	15.72	17.98	108.81	45.57	42.53	32.96
1974	27.80	9.10	0.40	11.10	2.90	83.10	52.00	101.20	52.30	4.90	12.50	27.40
1975	10.70	5.00	21.50	47.30	24.20	42.90	18.50	212.50	148.90	24.80	8.90	0.50
1976	35.80	9.50	108.20	43.10	14.10	53.00	40.60	118.10	32.60	71.20	44.40	5.20

续表

年份	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1977	6.80	0.00	5.80	75.50	18.60	84.80	156.80	40.70	18.30	1.20	0.90	0.00
1978	22.90	13.40	104.90	136.00	13.20	5.50	34.40	120.80	26.40	32.40	14.00	0.10
1979	5.80	18.40	72.60	14.20	40.30	114.10	65.90	47.30	0.60	0.00	23.90	7.20
1980	17.00	11.50	81.80	26.10	5.20	43.40	1.00	12.50	5.70	29.30	0.00	5.40
1981	7.00	6.90	15.60	48.00	33.00	61.90	1.20	85.60	4.60	1.80	8.20	1.20
1982	8.70	62.00	16.50	3.30	18.70	22.40	126.70	21.90	209.60	8.20	0.00	0.00
1983	0.10	0.00	32.40	51.10	18.60	70.30	20.80	4.80	26.40	72.70	17.70	1.90
1984	38.90	36.90	1.40	47.50	30.20	54.00	71.20	31.90	48.70	9.10	4.00	24.90
1985	5.90	8.10	0.10	10.60	19.00	58.60	31.20	221.80	29.30	38.70	14.70	10.00
1986	5.90	17.40	13.50	0.00	52.40	24.20	12.70	50.80	2.00	5.60	0.30	8.10
1987	28.90	10.60	33.90	45.20	6.40	18.40	60.60	42.80	63.80	91.80	0.00	7.30
1988	3.20	14.80	7.60	56.70	47.60	13.00	7.30	27.70	62.60	19.30	11.90	0.00
1989	6.90	8.80	0.30	8.70	24.80	0.40	4.50	24.70	34.00	0.00	2.50	11.90



续表

年份	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1990	29.10	28.70	13.80	69.10	72.30	62.00	62.40	23.60	48.60	43.70	0.00	12.90
1991	16.10	4.10	66.90	4.10	33.90	70.80	6.20	3.10	27.10	69.90	36.60	0.00
1992	19.60	0.30	6.60	0.40	32.70	10.00	59.40	19.20	99.10	59.50	2.40	4.00
1993	30.45	0.88	58.24	0.20	28.02	29.91	15.84	4.99	25.32	0.32	14.98	0.11
1994	0.00	0.00	159.53	22.76	96.61	22.39	143.07	39.28	92.39	20.74	10.88	0.00
1995	37.19	2.73	11.49	0.99	50.61	68.59	89.17	111.42	82.56	9.35	0.00	7.28
1996	0.00	59.26	39.29	59.58	68.56	58.23	20.94	22.90	31.17	0.00	18.12	0.00
1997	6.28	0.00	0.00	12.15	40.33	0.99	38.86	259.25	28.16	0.00	8.54	12.61
1998	20.70	36.74	0.00	58.96	31.51	42.42	21.68	15.74	106.56	7.27	14.01	0.80
1999	3.37	75.31	2.58	34.87	4.93	39.06	28.67	4.96	14.69	22.03	48.13	10.31
2000	0.00	0.00	38.05	0.66	53.79	37.61	11.50	59.00	50.69	0.59	0.00	42.45
2001	0.16	64.68	100.14	48.38	1.02	105.49	84.16	24.90	0.33	12.27	0.61	13.15

旬最大三日降水量序列(跨期选样)													单位: mm
年份	6月			7月			8月			9月			
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	
1964	13.73	32.84	66.09	107.40	85.32	114.41	58.34	88.26	68.35	47.11	42.85	1.79	
1965	0.36	26.85	10.10	28.24	27.34	279.12	85.50	68.52	4.63	0.01	1.17	0.01	
1966	32.46	4.92	51.67	19.65	54.48	37.54	41.37	7.99	46.70	52.97	1.88	0.03	
1967	13.09	3.34	17.56	25.50	122.82	13.44	66.22	66.07	8.87	47.70	10.30	3.54	
1968	3.51	8.55	28.85	18.17	33.16	0.13	9.90	48.16	0.41	10.42	1.31	0.81	
1969	5.73	3.06	21.82	21.58	31.19	13.02	86.38	21.14	11.09	24.95	16.41	47.78	
1970	6.48	50.68	7.69	14.79	77.14	175.19	19.77	1.32	30.04	32.43	24.73	5.74	
1971	17.26	11.50	63.71	90.96	89.23	33.57	56.36	31.11	34.81	122.88	0.28	56.08	
1972	0.00	18.41	0.09	102.67	8.50	59.12	48.26	40.52	25.15	41.47	1.83	5.85	
1973	44.82	44.82	4.48	1.74	41.07	33.68	15.72	17.98	108.81	45.57	42.53	32.96	
1974	27.80	9.10	0.40	11.10	2.90	83.10	52.00	101.20	52.30	4.90	12.50	27.40	
1975	10.70	5.00	21.70	47.30	24.20	42.90	18.50	212.50	157.40	24.80	8.90	0.50	
1976	35.80	12.60	115.80	43.10	14.10	55.00	40.60	118.10	32.60	71.20	44.40	5.20	



续表

年份	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1977	6.80	0.00	5.80	75.50	18.60	84.80	156.80	40.70	18.30	1.20	0.90	0.00
1978	22.90	13.40	104.90	151.00	13.20	6.60	34.40	120.80	49.60	32.40	14.00	0.10
1979	5.80	18.40	72.60	14.20	40.30	137.30	65.90	47.30	0.60	0.00	31.10	7.20
1980	17.00	11.50	81.80	26.10	5.20	43.40	1.00	13.00	5.70	29.30	0.00	5.40
1981	7.40	6.90	15.60	48.00	33.00	61.90	1.20	85.60	4.60	1.80	8.20	1.20
1982	8.70	62.00	16.50	3.30	18.70	22.40	126.70	21.90	209.60	8.20	0.00	0.00
1983	0.10	0.00	32.40	51.10	18.60	70.30	20.80	4.80	26.40	72.70	19.80	1.90
1984	38.90	36.90	1.40	47.50	30.20	54.00	71.20	31.90	48.70	9.10	4.00	24.90
1985	5.90	8.10	0.10	10.60	25.30	58.60	35.30	221.80	29.30	38.70	14.70	10.00
1986	5.90	17.40	13.50	0.00	52.40	24.20	12.70	50.80	2.00	5.60	0.30	8.10
1987	28.90	10.60	33.90	45.20	6.40	18.40	60.60	42.80	63.80	91.80	0.00	7.30
1988	3.20	14.80	7.60	56.70	47.60	21.20	7.30	27.70	62.60	19.30	11.90	0.00
1989	6.90	8.80	0.30	8.70	24.80	0.40	4.50	28.30	34.00	0.00	2.50	11.90

续表

年份	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1990	29.10	28.70	13.80	69.10	72.30	62.00	62.40	23.60	48.60	43.70	0.00	12.90
1991	20.20	4.10	66.90	4.10	34.50	70.80	6.20	3.10	27.10	69.90	36.60	0.00
1992	19.60	0.30	6.60	0.40	40.50	10.00	59.40	21.80	146.60	59.50	2.40	4.00
1993	30.45	0.88	58.24	0.20	28.02	29.91	15.84	4.99	25.32	0.32	14.98	0.11
1994	0.00	0.00	159.53	22.76	96.61	22.39	143.07	39.28	92.39	20.74	10.88	0.00
1995	37.19	2.73	11.49	0.99	50.61	70.57	89.17	111.42	82.56	9.35	0.00	7.28
1996	0.00	59.26	39.29	59.58	68.56	58.23	20.94	22.90	31.17	0.00	18.12	0.00
1997	6.28	0.00	0.00	12.15	40.33	0.99	38.86	259.25	28.16	0.00	8.54	12.61
1998	20.70	36.74	0.00	58.96	31.51	42.42	21.68	15.74	106.56	7.27	14.01	0.80
1999	3.37	75.31	2.58	34.87	4.93	39.06	32.99	4.96	14.69	22.03	48.13	10.31
2000	0.00	0.00	38.05	0.66	54.45	37.61	13.78	59.00	50.69	0.59	0.00	42.45
2001	0.16	64.68	100.14	48.38	1.02	105.49	122.00	24.90	0.33	12.27	0.61	13.15

表 3-4 旬最大一日降水量序列统计参数

参数	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
$\bar{x}$	11.07	14.02	26.55	29.12	29.26	35.03	34.51	42.47	35.96	20.84	10.36	8.47
S	9.93	15.60	29.25	26.39	20.75	27.41	28.55	41.93	37.10	20.24	11.95	12.28
$C_v$	0.90	1.11	1.10	0.91	0.71	0.78	0.83	0.99	1.03	0.97	1.15	1.45

表 3-5 旬最大三日降水量序列统计参数 (不跨期选样)

参数	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
$\bar{x}$	13.26	18.37	33.23	36.29	38.26	54.05	46.71	55.71	44.89	28.43	11.97	9.72
S	11.99	20.57	38.20	33.85	28.60	52.72	38.70	61.64	44.56	29.42	14.05	14.07
$C_v$	0.90	1.12	1.15	0.93	0.75	0.98	0.83	1.11	0.99	1.03	1.17	1.45

表 3-6 旬最大三日降水量序列统计参数 (跨期选样)

参数	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
$\bar{x}$	14.14	18.77	34.03	36.37	38.66	55.08	47.99	56.61	47.12	28.48	12.39	9.72
S	13.06	20.86	38.71	34.95	28.50	53.33	40.01	61.51	47.14	29.45	14.35	14.07
$C_v$	0.92	1.11	1.14	0.96	0.74	0.97	0.83	1.09	1.00	1.03	1.16	1.45

( $i=1, 2, \dots, 12$ ),  $\alpha$  为某一常数, 则  $x_i \sim P_3(\bar{x}_i, C_v)$ 。由此可见, 各旬一日或三日最大值序列只有当各旬的均值相等时, 才能服从于相应的某一组参数的  $P_3$  分布。由表 3-4、表 3-5、表 3-6 可见, 旬均值  $\bar{x}_i$  的差异是显著的, 因此, 通常在设计暴雨计算时的隐含假定是不成立的。为了合理地确定旬设计暴雨值, 需对实测数据进行处理和对设计暴雨计算方法进行研究。

## 第二节 实测数据的处理

为了消除旬均值、旬均方差差异的影响, 对基本数据提出如下几种处理方法。

(1) 将表 3-1、表 3-2、表 3-3 中各旬 (或第  $i$  区间, 以下同) 的实测最大值序列减去相应的旬均值, 计算结果见表 3-7、表 3-8、表 3-9。用  $X'_i$  表示表 3-7、表 3-8、表 3-9 中第  $i$  旬一日或三日最大值序列随机变量, 由于已消除了序列均值的影响, 可认为表 3-7、表 3-8、表 3-9 中任一旬一日或三日最大值序列随机变量均服从于其相应的某一组参数的  $P_3$  分布。

(2) 将表 3-1、表 3-2、表 3-3 中各旬的实测最大值序列, 分别除以相应的旬均值, 计算结果见表 3-10、表 3-11、表 3-12。表 3-10、表 3-11、表 3-12 中, 各旬一日或三日最大值序列随机变量除以各旬相应的均值后, 序列的统计参数  $C_v$  和  $C_s$  不变, 而序列的均值均变为 1.0, 即消除了原始序列均值对分布的影响, 若用  $K_i$  表示表 3-10、表 3-11、表 3-12 中任一旬一日或三日最大值模比系数序列随机变量, 则  $K_i \sim P_3(1.0, C_v)$ , 即各旬随机变量均服从于其相应的某一组参数的

表 3-7 减去旬均值后的旬最大一日降水量序列

年份	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1964	1.89	7.92	26.67	35.43	26.46	34.94	2.04	37.33	8.15	20.44	29.56	-6.68
1965	-10.71	9.94	-16.45	18.24	-11.22	97.65	31.45	-9.06	-32.39	-20.83	-9.61	-8.47
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
1999	-7.70	59.31	-23.97	-10.48	-24.33	1.93	-15.74	-42.47	-21.27	1.19	19.60	1.84
2000	-11.07	-14.02	11.50	-28.46	24.53	-6.02	-23.01	12.04	12.69	-20.25	-10.36	18.03
2001	-10.91	13.57	38.12	-6.73	-28.24	14.54	41.84	-23.91	-35.63	-8.57	-9.75	4.68

表 3-8 减去旬均值后的旬最大三日降水量序列 (不跨期选样)

年份	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1964	0.47	12.90	19.98	71.11	47.07	60.36	11.62	32.55	23.46	16.86	30.88	-7.93
1965	-12.90	8.47	-23.13	11.97	-10.92	225.07	38.78	12.81	-40.26	-28.42	-10.80	-9.71
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
1999	-9.89	56.94	-30.65	-1.42	-33.33	-14.99	-18.04	-50.75	-30.20	-6.40	36.16	0.59
2000	-13.26	-18.37	4.82	-35.63	15.53	-16.44	-35.21	3.29	5.80	-27.84	-11.97	32.73
2001	-13.10	46.31	66.91	12.09	-37.24	51.44	37.45	-30.81	-44.56	-16.16	-11.36	3.43

表 3-9 减去旬均值后的旬最大三日降水量序列 (跨期选样)

年份	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1964	-0.40	14.07	32.07	71.02	46.66	59.32	10.35	31.65	21.23	18.63	30.46	-7.93
1965	-13.77	8.08	-23.93	-8.14	-11.32	224.04	37.51	11.91	-42.49	-28.47	-11.21	-9.71
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
1999	-10.77	56.54	-31.45	-1.50	-33.73	-16.02	-15.00	-51.65	-32.43	-6.45	35.74	0.59
2000	-14.14	-18.77	4.02	-35.71	15.79	-17.47	-34.21	2.39	3.57	-27.89	-12.39	32.73
2001	-13.98	45.91	66.11	12.01	-37.64	50.41	74.01	-31.71	-46.79	-16.21	-11.78	3.43

表 3-10 除以旬均值后的旬最大一日降水量模比系数序列

年份	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1964	1.17	1.56	2.00	2.22	1.90	2.00	1.06	1.88	1.23	1.98	3.85	0.21
1965	0.03	1.71	0.38	1.63	0.62	3.79	1.91	0.79	0.10	0.00	0.07	0.00
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
1999	0.30	5.23	0.10	0.64	0.17	1.06	0.54	0.00	0.41	1.06	2.89	1.22
2000	0.00	0.00	1.43	0.02	1.84	0.83	0.33	1.28	1.35	0.03	0.00	3.13
2001	0.01	1.97	2.44	0.77	0.03	1.42	2.21	0.44	0.01	0.59	0.06	1.55



表 3-11 除以均值后的旬最大三日降水量模比系数序列 (不跨期选样)

年份	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1964	1.04	1.70	1.60	2.96	2.23	2.12	1.25	1.58	1.52	1.59	3.58	0.18
1965	0.03	1.46	0.30	1.33	0.71	5.16	1.83	1.23	0.10	0.00	0.10	0.00
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
1999	0.25	4.10	0.08	0.96	0.13	0.72	0.61	0.09	0.33	0.77	4.02	1.06
2000	0.00	0.00	1.14	0.02	1.41	0.70	0.25	1.06	1.13	0.02	0.00	4.37
2001	0.01	3.52	3.01	1.33	0.03	1.95	1.80	0.45	0.01	0.43	0.05	1.35

表 3-12 除以旬均值后的旬最大三日降水量模比系数序列 (跨期选样)

年份	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1964	0.97	1.75	1.94	2.95	2.21	2.08	1.22	1.56	1.45	1.65	3.46	0.18
1965	0.03	1.43	0.30	0.78	0.71	5.07	1.78	1.21	0.10	0.00	0.09	0.00
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
1999	0.24	4.01	0.08	0.96	0.13	0.71	0.69	0.09	0.31	0.77	3.89	1.06
2000	0.00	0.00	1.12	0.02	1.41	0.68	0.29	1.04	1.08	0.02	0.00	4.37
2001	0.01	3.45	2.94	1.33	0.03	1.92	2.54	0.44	0.01	0.43	0.05	1.35

表 3-13 标准化后的旬最大一日降水量序列

年份	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1964	0.19	0.51	0.91	1.34	1.27	1.27	0.07	0.89	0.22	1.01	2.47	-0.54
1965	-1.08	0.64	-0.56	0.69	-0.54	3.56	1.10	-0.22	-0.87	-1.03	-0.80	-0.69
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1999	-0.78	3.80	-0.82	-0.40	-1.17	0.07	-0.55	-1.01	-0.57	0.06	1.64	0.15
2000	-1.11	-0.90	0.39	-1.08	1.18	-0.22	-0.81	0.29	0.34	-1.00	-0.87	1.47
2001	-1.10	0.87	1.30	-0.26	-1.36	0.53	1.47	-0.57	-0.96	-0.42	-0.82	0.38

表 3-14 标准化后的旬最大三日降水量序列 (不跨期选择)

年份	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1964	0.04	0.63	0.52	2.10	1.65	1.14	0.30	0.53	0.53	0.57	2.20	-0.56
1965	-1.08	0.41	-0.61	0.35	-0.38	4.27	1.00	0.21	-0.90	-0.97	-0.77	-0.69



续表

年份	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
1999	-0.83	2.77	-0.80	-0.04	-1.17	-0.28	-0.47	-0.82	-0.68	-0.22	2.57	0.04
2000	-1.11	-0.89	0.13	-1.05	0.54	-0.31	-0.91	0.05	0.13	-0.95	-0.85	2.33
2001	-1.09	2.25	1.75	0.36	-1.30	0.98	0.97	-0.50	-1.00	-0.55	-0.81	0.24

表 3-15 标准化后的旬最大三日降水量序列 (跨期选样)

年份	6月			7月			8月			9月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1964	-0.03	0.67	0.83	2.03	1.64	1.11	0.26	0.51	0.45	0.63	2.12	-0.56
1965	-1.05	0.39	-0.62	-0.23	-0.40	4.20	0.94	0.19	-0.90	-0.97	-0.78	-0.69
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
1999	-0.82	2.71	-0.81	-0.04	-1.18	-0.30	-0.37	-0.84	-0.69	-0.22	2.49	0.04
2000	-1.08	-0.90	0.10	-1.02	0.55	-0.33	-0.86	0.04	0.08	-0.95	-0.86	2.33
2001	-1.07	2.20	1.71	0.34	-1.32	0.95	1.85	-0.52	-0.99	-0.55	-0.82	0.24

$P_3$  分布。

(3) 将表 3-1、表 3-2、表 3-3 中各旬的实测最大值序列，分别减去相应的旬均值后，再除以相应旬的均方差。变换后的序列见表 3-13、表 3-14、表 3-15。在表 3-13、表 3-14、表 3-15 中，各序列既消除了旬均值差异的影响，也消除了旬均方差差异的影响。

北方大部分地区汛期一般为 6 月初到 9 月末，但主汛期一般都在 7、8 月份内，同一量级的暴雨在主汛期发生的概率远远大于汛期中其它时期发生的概率。随着季节的变化，降雨从 6 月初开始逐渐由小变大，到 7、8 月份中某一时期达到最大值，之后又逐渐减小。基于季节变化的物理成因，汛期中不同时期应有不同的设计暴雨，越靠近主汛期其值越大，反之则小。为此提出旬或区间设计暴雨计算方法。

### 第三节 设计暴雨计算方法

针对目前年设计暴雨计算方法存在的不足，同时为汛限水位研究奠定基础，本次提出四种设计暴雨计算方法，简介如下。

方法 1：对于各区间（本次采用旬，以下同）一日或三日最大值序列，分别计算各序列的统计参数，再将各序列分别减去各自序列的均值，得到消除均值影响的最大值序列，对于消除均值影响的最大值序列，用  $X'_i$  表示第  $i$  区间一日或三日最大值序列随机变量，由于已消除了序列均值的影响，可认为任一区间一日或三日最大值序列随机变量均服从于其相应的某一组参数的  $P_3$  分布，每年选一个最大值，则可得到年一日或三日降雨最大值序



列(消除区间均值影响),利用配线法可求得不同频率的设计暴雨值,该值加上各区间的均值,即可求得各区间不同频率一日或三日设计暴雨值。计算结果见表3-16、表3-20、表3-24。

方法2:对于各区间一日或三日最大值序列分别除以各自序列均值,则可得到模比系数序列。模比系数序列保持了原始序列的统计参数  $C_v$  和  $C_s$ ,而序列均值均变为1.0,即消除了原始序列均值对分布的影响。若用  $K_i$  表示任一区间一日或三日降雨量最大值模比系数序列随机变量,则  $K_i \sim P_3(1.0, C_v)$ ,即各区间随机变量均服从于其相应的某一组参数的  $P_3$  分布,每年选一个最大值,则可得到年一日或三日降雨模比系数最大值序列。利用配线法可求得不同频率的对应值,不同频率的  $K_i$  值乘以各区间的均值则可求得各区间不同频率一日或三日设计暴雨值。计算结果见表3-17、表3-21、表3-25。

方法3:对于各区间一日或三日最大值序列,分别减去各自序列的均值并除以各自序列的均方差,则可得各区间一日或三日最大值标准化序列。此标准化序列是均值为0,方差为1的新序列,它消除了原始序列均值和均方差差异对分布的影响。若用  $Z_i$  表示任一区间一日或三日降雨量最大值标准化序列随机变量,则  $Z_i$  均服从于其相应的某一组参数的  $P_3$  分布,每年选一个最大值,则可得到年一日或三日降雨标准化最大值序列。利用配线法可求得不同频率的对应值,不同频率的  $Y_p$  (含义见下述公式中)值乘以各区间的均方差并加上各区间的均值,则可求得各区间不同频率一日或三日设计暴雨值。计算结果见表3-18、表3-22、表3-26。

方法4:同方法1,当利用配线法求得不同频率的设计暴雨

表 3-16 各旬一日设计暴雨计算结果 (方法 1) 单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	343.83	346.78	359.31	361.88	362.02	367.79	367.27	375.23	368.72	353.6	343.12	341.23
0.1	269.91	272.85	285.38	287.95	288.09	293.86	293.34	301.3	294.79	279.67	269.19	267.31
1	194.39	197.33	209.86	212.43	212.57	218.34	217.82	225.78	219.28	204.16	193.67	191.79
2	170.94	173.88	186.41	188.98	189.12	194.89	194.37	202.33	195.83	180.71	170.22	168.34
5	139.54	142.48	155.01	157.58	157.72	163.49	162.97	170.93	164.43	149.31	138.82	136.94
10	114.89	117.84	130.37	132.94	133.08	138.85	138.33	146.29	139.78	124.66	114.18	112.29
20	89.46	92.4	104.93	107.5	107.64	113.41	112.89	120.85	114.34	99.22	88.74	86.86



表 3-17 各旬一日设计暴雨计算结果 (方法 2)

单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	94.49	119.6	226.52	248.46	249.68	298.91	294.42	362.38	306.85	177.84	88.37	72.3
0.1	82.68	104.65	198.2	217.41	218.47	261.54	257.62	317.08	268.5	155.61	77.33	63.27
1	69.22	87.61	165.94	182.01	182.9	218.97	215.68	265.46	224.79	130.28	64.74	52.97
2	64.68	81.88	155.07	170.1	170.93	204.63	201.56	248.08	210.07	121.75	60.5	49.5
5	58.09	73.53	139.27	152.76	153.51	183.78	181.02	222.8	188.66	109.34	54.34	44.45
10	52.32	66.23	125.44	137.59	138.27	165.53	163.04	200.68	169.93	98.48	48.94	40.04
20	45.6	57.71	109.31	119.9	120.48	144.24	142.07	174.87	148.07	85.82	42.65	34.89

表 3-18 各旬一日设计暴雨计算结果 (方法 3) 单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	80.09	122.42	229.80	212.48	173.48	225.52	232.93	333.87	293.78	161.47	93.42	93.83
0.1	69.78	106.23	199.44	185.10	151.94	197.08	203.30	290.35	255.28	140.47	81.01	81.08
1	58.36	88.29	165.82	154.76	128.08	165.56	170.47	242.14	212.62	117.20	67.27	66.96
2	54.62	82.42	154.80	144.83	120.27	155.24	159.72	226.36	198.65	109.58	62.77	62.34
5	49.17	73.85	138.74	130.33	108.87	140.18	144.03	203.32	178.27	98.46	56.21	55.59
10	44.62	66.71	125.34	118.25	99.37	127.63	130.96	184.12	161.28	89.20	50.73	49.96
20	39.47	58.61	110.17	104.56	88.60	113.40	116.14	162.36	142.03	78.70	44.53	43.59



表 3-19 各旬一日设计暴雨计算结果 (方法 4) 单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	89.88	137.8	258.64	238.5	193.95	252.56	261.09	375.23	330.37	181.43	105.21	105.95
0.1	72.38	110.3	207.08	191.99	157.36	204.23	210.75	301.3	264.96	145.75	84.14	84.29
1	54.49	82.21	154.41	144.47	119.99	154.87	159.33	225.78	198.15	109.31	62.61	62.17
2	48.94	73.48	138.05	129.71	108.38	139.54	143.36	202.33	177.4	97.99	55.93	55.3
5	41.5	61.8	116.15	109.95	92.84	119.01	121.98	170.93	149.62	82.84	46.97	46.1
10	35.66	52.64	98.96	94.45	80.64	102.9	105.2	146.29	127.82	70.94	39.95	38.88
20	29.64	43.17	81.22	78.44	68.05	86.27	87.88	120.85	105.31	58.67	32.7	31.43

表 3-20 各旬三日设计暴雨值计算结果 (不跨期选样, 方法 1) 单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	528.13	533.24	548.1	551.15	553.12	568.91	561.58	570.57	559.75	543.29	526.83	524.58
0.1	410.43	415.54	430.4	433.46	435.42	451.22	443.88	452.87	442.06	425.6	409.14	406.88
1	290.3	295.41	310.27	313.33	315.3	331.09	323.76	332.75	321.93	305.47	289.01	286.76
2	253.3	258.41	273.27	276.32	278.29	294.08	286.75	295.74	284.92	268.46	252	249.75
5	203.55	208.66	223.52	226.58	228.54	244.33	237	245.99	235.18	218.72	202.26	200
10	165.33	170.44	185.3	188.35	190.32	206.11	198.78	207.77	196.95	180.49	164.03	161.78
20	125.89	131	145.86	148.92	150.89	166.68	159.34	168.34	157.52	141.06	124.6	122.35



表 3-21 各旬三日设计暴雨值计算结果 (不跨期选样, 方法 2) 单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	115.58	160.12	289.63	316.26	333.40	471.04	407.11	485.50	391.22	247.77	104.31	84.70
0.1	101.14	140.10	253.42	276.73	291.73	412.16	356.22	424.81	342.32	216.80	91.28	74.11
1	84.67	117.30	212.17	231.68	244.24	345.07	298.23	355.65	286.59	181.51	76.42	62.05
2	79.13	109.62	198.28	216.51	228.25	322.47	278.70	332.37	267.83	169.62	71.41	57.98
5	71.06	98.44	178.07	194.45	204.98	289.61	250.30	298.50	240.53	152.34	64.14	52.07
10	64.01	88.67	160.39	175.14	184.63	260.85	225.45	268.86	216.65	137.21	57.77	46.90
20	55.78	77.27	139.76	152.62	160.89	227.3	196.45	234.28	188.79	119.57	50.34	40.87

表 3-22 各旬三日设计暴雨值计算结果 (不跨期选样, 方法 3) 单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	95.81	160.04	296.25	269.39	235.19	417.08	313.22	480.18	351.75	231.01	108.70	106.64
0.1	83.48	138.89	256.97	234.58	205.78	362.86	273.42	416.79	305.93	200.76	94.26	92.16
1	69.82	115.45	213.46	196.01	173.20	302.80	229.33	346.56	255.16	167.24	78.25	76.13
2	65.35	107.77	199.21	183.38	162.53	283.13	214.89	323.57	238.53	156.27	73.01	70.88
5	58.83	96.57	178.41	164.95	146.96	254.43	193.82	290.01	214.27	140.25	65.37	63.21
10	53.39	87.24	161.08	149.60	133.98	230.51	176.26	262.04	194.05	126.90	58.99	56.83
20	47.22	76.66	141.44	132.19	119.28	203.41	156.36	230.34	171.14	111.78	51.77	49.59



表 3-23 各旬三日设计暴雨值计算结果 (不跨期选样, 方法 4) 单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	113.39	190.21	352.26	319.02	277.12	494.38	369.97	570.57	417.1	274.15	129.3	127.27
0.1	90.5	150.93	279.33	254.39	222.52	393.72	296.07	452.87	332.01	217.98	102.48	100.4
1	67.14	110.84	204.9	188.43	166.79	290.99	220.65	332.75	245.17	160.65	75.11	72.97
2	59.94	98.49	181.97	168.1	149.62	259.34	197.42	295.74	218.42	142.99	66.67	64.52
5	50.27	81.88	151.14	140.78	126.54	216.79	166.18	245.99	182.45	119.24	55.33	53.16
10	42.83	69.13	127.46	119.79	108.81	184.1	142.19	207.77	154.82	101	46.62	44.44
20	35.17	55.96	103.02	98.14	90.51	150.37	117.43	168.34	126.31	82.18	37.64	35.43



表 3-24 各旬三日设计暴雨值计算结果 (跨期选择, 方法 1) 单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	532.14	536.77	552.03	554.38	556.66	573.09	565.99	574.61	565.12	546.48	530.39	527.72
0.1	414.12	418.75	434.01	436.36	438.64	455.07	447.97	456.59	447.1	428.46	412.37	409.7
1	293.66	298.3	313.55	315.9	318.19	334.61	327.52	336.14	326.65	308.01	291.92	289.25
2	256.55	261.19	276.44	278.79	281.08	297.5	290.41	299.03	289.54	270.9	254.81	252.14
5	206.67	211.3	226.56	228.91	231.19	247.62	240.52	249.14	239.65	221.01	204.92	202.25
10	168.34	172.97	188.23	190.58	192.87	209.29	202.2	210.82	201.33	182.69	166.6	163.93
20	128.8	133.43	148.69	151.04	153.32	169.75	162.65	171.27	161.78	143.14	127.05	124.38



单位: mm

表 3-25 各旬三日设计暴雨值计算结果 (跨期选择, 方法 2)

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	122.28	162.34	294.32	314.64	334.40	476.47	415.11	489.67	407.57	246.33	107.16	84.06
0.1	106.99	142.04	257.53	275.31	292.60	416.91	363.22	428.46	356.63	215.54	93.76	73.55
1	89.58	118.92	215.60	230.49	244.97	349.04	304.09	358.71	298.57	180.45	78.50	61.58
2	83.71	111.13	201.49	215.40	228.93	326.19	284.18	335.23	279.02	168.64	73.36	57.55
5	75.18	99.81	180.95	193.45	205.60	292.94	255.22	301.06	250.59	151.45	65.88	51.68
10	67.72	89.90	162.99	174.24	185.19	263.86	229.88	271.17	225.71	136.41	59.34	46.55
20	59.01	78.34	142.03	151.83	161.37	229.92	200.32	236.30	196.68	118.87	51.71	40.57



表 3-26 各旬三日设计暴雨值计算结果 (跨期选样, 方法 3) 单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	97.65	152.14	281.58	259.87	220.89	396.13	303.84	449.97	348.56	216.81	104.18	99.73
0.1	86.40	134.16	248.21	229.75	196.33	350.16	269.36	396.94	307.93	191.42	91.80	87.59
1	73.57	113.68	210.19	195.42	168.33	297.77	230.06	336.52	261.62	162.49	77.71	73.77
2	69.25	106.78	197.38	183.86	158.91	280.13	216.82	316.18	246.03	152.75	72.96	69.11
5	62.96	96.74	178.76	167.04	145.20	254.48	197.57	286.58	223.35	138.58	66.05	62.34
10	57.47	87.96	162.46	152.33	133.20	232.02	180.73	260.69	203.51	126.18	60.01	56.42
20	51.05	77.72	143.45	135.16	119.21	205.83	161.08	230.48	180.36	111.72	52.96	49.50



表 3-27 各旬三日设计暴雨值计算结果 (跨期选样, 方法 4) 单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	124.12	194.4	360.03	330.7	278.64	504.21	384.92	574.61	444.08	276.48	133.26	128.25
0.1	99.06	154.39	285.75	263.64	223.96	401.88	308.15	456.59	353.64	219.98	105.72	101.24
1	73.49	113.55	209.95	195.2	168.16	297.44	229.81	336.14	261.33	162.31	77.62	73.68
2	65.61	100.96	186.59	174.11	150.97	265.27	205.67	299.03	232.89	144.54	68.96	65.19
5	55.02	84.05	155.2	145.77	127.86	222.02	173.22	249.14	194.66	120.66	57.32	53.77
10	46.88	71.05	131.07	123.99	110.1	188.79	148.29	210.82	165.29	102.31	48.37	45
20	38.48	57.65	106.19	101.53	91.78	154.5	122.57	171.27	134.99	83.38	39.14	35.96

值后，让该值与最湿润时期或主汛期相对应，即与均方差最大的区间相对应，根据均方差与设计暴雨值成比例的关系，可求得其它各区间的相应值，再加上各区间的均值，即可求得各区间不同频率一日或三日设计暴雨值。计算结果见表 3-19、表 3-23、表 3-27。

对上述四种方法可用下面公式描述，设：

$x_{ij}$  表示第  $i$  旬（或第  $i$  区间，以下同）最大一日或三日降水量序列第  $j$  个取值；

$\bar{x}_i$ ， $s_i$  分别表示第  $i$  旬最大一日或三日降水量序列的均值与均方差；

$x'_{ij}$  表示第  $i$  旬变换化后的最大一日或三日降水量序列第  $j$  个取值。

上述表达式中， $i=1, 2, \dots, 12$ ； $j=1, 2, \dots, n$ ，其中  $n$  为实测资料的年数。

则在上述四种方法中， $x'_{ij}$  的表达式分别为

$$\text{方法 1、4} \quad x'_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_i$$

$$\text{方法 2} \quad x'_{ij} = \frac{x_{ij}}{\bar{x}_i}$$

$$\text{方法 3} \quad x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{S_i}$$

若用  $Y_p$  表示变换后的年最大一日或三日序列频率为  $P$  时的取值，则四种方法推求的各旬不同频率的设计暴雨值可用下式分别计算

$$\text{方法 1} \quad X_{ip} = Y_p + \bar{x}_i$$



$$\text{方法 2} \quad X_{ip} = Y_p \bar{x}_i$$

$$\text{方法 3} \quad X_{ip} = Y_p S_i + \bar{x}_i$$

$$\text{方法 4} \quad S_m = \max\{S_1, S_2, \dots, S_{12}\}$$

$$X_{ip} = Y_p \frac{S_i}{S_m} + \bar{x}_i$$

式中  $X_{ip}$ ——第  $i$  旬频率为  $P$  时的一日或三日设计暴雨值。 $i = 1, 2, \dots, 12$ ,  $P = 0.01\%, 0.1\%, 1\%, 2\%, 5\%, 10\%, 20\%$  等。

#### 第四节 旬设计暴雨计算方法分析、 结果选用及其修正

##### 一、方法分析和结果选用

以上四种方法各有其优缺点。方法 1 计算简单，能够消除旬均值的影响，但无法考虑旬均方差差异的影响，计算结果除主汛期外其它旬明显偏大。方法 2 与方法 3 计算过程相对复杂一些，可以较好地同时消除旬均值与旬均方差差异的影响，但由于实测序列通常较短，年最大值序列中的前几位可能来自于前汛期或后汛期，造成适线结果有可能偏大。方法 4 同时具有上述三种方法的优点，计算结果能够较好地代表实际情况，推荐采用。

旬最大一日降水量序列计算结果见表 3-16、表 3-17、表 3-18、表 3-19；旬最大三日降水量序列（不跨期选样）计算结果见表 3-20、表 3-21、表 3-22、表 3-23；旬最大三日降水

量序列（跨期选样）计算结果见表 3-24、表 3-25、表 3-26、表 3-27。经综合分析和全面比较，最后确定一日和三日设计暴雨值见表 3-19 和表 3-27。

## 二、年设计暴雨的确定

在 1964~2001 年间，每年选一个一日面雨量（指面平均雨量，下同）的最大值，组成年最大一日实测降水量序列；每年选一个三日面雨量的最大值，组成年最大三日实测降水量序列。门楼水库控制面积内年最大一日实测降水量序列和年最大三日实测降水量序列，分别见表 3-28 和表 3-30，相应的序列统计参数分别见表 3-29 和表 3-31。

表 3-28                      年最大一日实测降水量序列                      单位：mm

年份	降水量	年份	降水量	年份	降水量	年份	降水量	年份	降水量
1964	79.8	1972	89.8	1980	81.2	1988	51.8	1996	59.6
1965	132.7	1973	73.3	1981	85.6	1989	24.8	1997	195.4
1966	41.5	1974	91.7	1982	174.2	1990	67.8	1998	105.9
1967	103.3	1975	104.4	1983	69.4	1991	66.8	1999	73.3
1968	42.1	1976	106.3	1984	68.4	1992	99.0	2000	54.5
1969	63.3	1977	106.6	1985	99.0	1993	57.6	2001	76.3
1970	87.7	1978	110.6	1986	39.3	1994	88.1		
1971	70.8	1979	57.1	1987	67.0	1995	99.4		

表 3-29 年最大一日实测降水量序列的统计参数

均值 $\bar{x}$ (mm)	均方差 $S$	离差系数 $C_v$	偏态系数 $C_s$
83.3000	33.6532	0.4040	1.1232

表 3-30 年最大三日实测降水量序列 单位: mm

年份	降水量	年份	降水量	年份	降水量	年份	降水量	年份	降水量
1964	114.4	1972	102.7	1980	82.4	1988	62.6	1996	107.7
1965	279.1	1973	108.8	1981	85.6	1989	34.0	1997	259.3
1966	54.5	1974	101.3	1982	209.6	1990	72.4	1998	106.6
1967	122.8	1975	212.4	1983	72.7	1991	70.9	1999	75.3
1968	48.2	1976	118.1	1984	71.2	1992	158.5	2000	59.0
1969	86.4	1977	156.8	1985	221.8	1993	58.2	2001	122.0
1970	175.2	1978	151.0	1986	52.4	1994	159.5		
1971	122.9	1979	137.0	1987	91.8	1995	111.4		

表 3-31 年最大三日实测降水量序列的统计参数

均值 $\bar{x}$ (mm)	均方差 $S$	离差系数 $C_v$	偏态系数 $C_s$
116.7500	59.1001	0.506	1.6009

经验配线法是在经验频率点据和频率曲线线型确定之后，通过调整参数使理论曲线与经验频率点据配合地较好，此时的参数就是所求曲线线型的参数，从而根据该曲线推求不同频率的设计暴雨。据年最大一或三日降水量实测序列，利用配线法可得不同频率的设计暴雨值，结果见表 3-32。

表 3-32 年最大一、三日不同频率设计暴雨（配线法） 单位：mm

频率 $P$ (%)	0.01	0.1	1	2	5	10	20
一日设计暴雨	409.90	321.54	232.31	205.45	168.63	140.48	111.89
三日设计暴雨	603.21	474.11	342.35	301.75	247.18	205.26	162.00

### 三、旬设计暴雨结果的修正

根据设计暴雨理论，旬设计暴雨应小于同频率的年设计暴雨。比较表 3-19、表 3-27 和表 3-32，频率为 0.01%、0.1%、1%、2% 时，旬设计暴雨和同频率的年设计暴雨符合这一规律；频率为 5%、10%、20% 时，8 月中旬设计暴雨大于同频率的年设计暴雨，这是不合理的，应予以修正。修正时以年设计暴雨为准，并保持千年一遇 8 月中旬设计暴雨不变，按比例对表 3-19、表 3-27 中的旬设计暴雨进行修正，修正后旬设计暴雨见表 3-33、表 3-34。

根据表 3-33 和表 3-34 中的设计暴雨，采用第二章介绍的模型，可推求出相应的设计洪水，进而根据各旬的设计洪水确定各旬的汛限水位。



表 3-33 修正后各旬一日设计暴雨值计算结果 (方法 4) 单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	92.01	141.06	264.76	244.14	198.54	258.53	267.26	384.10	338.18	185.71	107.70	108.45
0.1	72.38	110.30	207.08	191.99	157.36	204.23	210.75	301.30	264.96	145.75	84.14	84.29
1	52.54	79.26	148.87	139.29	115.69	149.31	153.62	217.69	191.04	105.39	60.36	59.94
2	46.56	69.92	131.35	123.42	103.12	132.77	136.41	192.52	168.80	93.24	53.21	52.62
5	38.36	57.13	107.37	101.64	85.83	110.02	112.76	158.02	138.31	76.58	43.43	42.62
10	32.09	47.36	89.05	84.99	72.57	92.59	94.66	131.64	115.02	63.84	35.95	34.99
20	25.71	37.46	70.46	68.05	59.04	74.85	76.24	104.85	91.36	50.90	28.37	27.27

表 3-34 修正后各旬三日设计暴雨值计算结果 (跨期选择, 方法 4) 单位: mm

P (%)	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
0.01	125.48	196.54	363.98	334.33	281.70	509.74	389.15	580.92	448.95	279.52	134.73	129.66
0.1	99.06	154.39	285.75	263.64	223.96	401.88	308.15	456.59	353.64	219.98	105.72	101.24
1	72.08	111.37	205.92	191.46	164.94	291.75	225.40	329.70	256.32	159.20	76.13	72.27
2	63.76	98.12	181.33	169.21	146.71	257.79	199.87	290.60	226.33	140.47	67.01	63.35
5	52.56	80.31	148.28	139.28	122.16	212.13	165.51	238.05	185.99	115.28	54.76	51.38
10	43.96	66.62	122.90	116.26	103.24	177.02	139.05	197.68	154.99	95.93	45.36	42.20
20	35.05	52.51	96.73	92.48	83.60	140.74	111.65	156.01	122.96	75.95	35.66	32.75



## 第五节 月设计暴雨计算及其结果分析

### 一、月设计暴雨计算

将汛期 6~9 月按月为单位（还可采用其它形式划分）划分为 4 个区间，在 1964~2001 年间，每个区间每年选一个一日面雨量最大值组成 4 个序列，即月最大一日实测降水量序列；每个区间每年选一个三日面雨量最大值组成 4 个序列（分跨期选样和不跨期选样两种情况），即月最大三日实测降水量序列。门楼水库控制面积内月最大一日实测降水量序列和月最大三日实测降水量序列（分跨期选样和不跨期选样两种情况）分别见表 3-35、表 3-37、表 3-39，相应的各序列统计参数分别见表 3-36、表 3-38、表 3-40。

应用第四种方法，根据月最大一日或三日降水量实测序列，利用配线法可得不同频率的设计暴雨值，结果见表 3-41、表 3-42、表 3-43。

表 3-35

月最大一日实测降水量序列

单位: mm

年份 \ 月份	6	7	8	9
1964	53.2	70.0	79.8	41.3
1965	24.0	132.7	66.0	0.8
1966	41.5	35.8	41.3	36.4
1967	13.1	103.3	48.2	28.3

续表

年份 \ 月份	6	7	8	9
1968	15.3	25.9	42.1	10.0
1969	14.4	31.2	63.3	41.9
1970	34.2	87.7	19.4	22.0
1971	55.5	64.9	37.4	70.8
1972	13.6	89.8	33.7	31.6
1973	27.3	33.0	73.3	42.2
1974	27.8	40.8	91.7	26.9
1975	21.5	47.3	104.4	16.3
1976	106.3	49.3	104.1	45.8
1977	5.8	75.5	106.6	0.8
1978	77.9	94.1	110.6	25.0
1979	52.9	57.1	47.3	23.9
1980	81.2	22.1	9.6	29.3
1981	15.6	43.2	85.6	8.2
1982	35.5	16.7	174.2	6.6
1983	32.4	47.3	18.7	69.4
1984	35.2	33.6	68.4	24.9
1985	8.0	38.9	99.0	28.9
1986	13.5	39.3	28.3	8.1

续表

年份 \ 月份	6	7	8	9
1987	23.5	38.9	42.6	67.0
1988	12.3	38.6	51.8	17.2
1989	8.0	24.8	24.7	11.9
1990	20.0	67.8	52.8	28.2
1991	66.8	61.3	19.7	40.5
1992	14.9	32.7	99.0	47.5
1993	57.6	13.8	24.5	13.3
1994	80.7	67.6	88.1	10.6
1995	36.2	68.6	99.4	9.4
1996	44.9	59.6	22.9	14.7
1997	3.2	40.3	195.4	8.5
1998	31.3	45.0	105.9	10.6
1999	73.3	37.0	18.8	30.0
2000	38.0	53.8	54.5	26.5
2001	64.7	49.6	76.3	13.1

表 3-36 月最大一日实测降水量序列的统计参数

参数 \ 月份	6	7	8	9
$\bar{x}$	36.3447	52.0763	66.5632	26.0105
S	25.3594	25.3340	41.9838	18.0208
$C_v$	0.6978	0.4865	0.6307	0.6931

表 3-37 月最大三日实测降水最列 (不跨期选样) 单位: mm

年份 \ 月份	6	7	8	9
1964	53.2	114.4	88.3	45.3
1965	26.8	279.1	85.5	1.2
1966	51.7	54.5	46.7	53.0
1967	13.1	122.8	66.2	47.7
1968	28.8	33.2	48.2	10.4
1969	21.8	31.2	86.4	47.8
1970	50.7	175.2	30.0	32.4
1971	63.7	91.0	56.4	122.9
1972	18.4	102.7	48.3	41.5
1973	44.8	41.1	108.8	45.6
1974	27.8	83.1	101.3	27.5
1975	21.5	47.3	212.4	24.9
1976	108.2	53.0	118.1	71.2
1977	6.8	84.9	156.8	1.2
1978	105.0	136.0	120.8	32.5
1979	72.6	114.2	65.9	31.0
1980	81.8	43.4	13.0	29.3
1981	22.5	61.9	85.6	8.2
1982	61.9	22.4	209.6	8.3



续表

年份 \ 月份	6	7	8	9
1983	32.5	70.3	26.4	72.7
1984	38.9	54.0	71.2	24.9
1985	8.1	58.5	221.8	38.6
1986	17.3	52.4	50.8	8.1
1987	33.9	45.2	63.9	91.8
1988	14.8	56.7	62.6	19.2
1989	8.8	24.8	34	12.0
1990	29.1	72.4	62.5	43.7
1991	67.0	70.9	27.1	69.9
1992	19.6	40.5	99.1	59.5
1993	58.2	29.9	25.3	15.0
1994	159.5	96.6	143.1	20.7
1995	37.2	68.6	111.4	9.4
1996	59.3	68.6	31.2	18.1
1997	6.3	41.3	259.3	12.6
1998	36.7	59.0	106.6	14.0
1999	75.3	39.1	33.0	48.1
2000	38.0	54.5	59.0	42.5
2001	100.1	105.5	84.2	13.1

表 3-38 月最大三日实测降水量序列 (不跨期选样) 的统计参数

参数 \ 月份	6	7	8	9
$\bar{x}$	45.3079	73.6895	87.3895	34.6263
S	33.4207	47.9733	59.2071	26.4252
$C_v$	0.7376	0.6510	0.6775	0.7632

表 3-39 月最大三日实测降水量序列 (跨期选样) 单位: mm

年份 \ 月份	6	7	8	9
1964	66.1	114.4	88.3	47.1
1965	26.8	279.1	85.5	1.2
1966	51.7	54.5	46.7	53.0
1967	17.6	122.8	66.2	47.7
1968	28.8	33.2	48.2	10.4
1969	21.8	31.2	86.4	47.8
1970	50.7	175.2	30.0	32.4
1971	63.7	91.0	56.4	122.9
1972	18.4	102.7	48.3	41.5
1973	44.8	41.1	108.8	45.6
1974	27.8	83.1	101.3	27.5
1975	21.7	47.3	212.4	69.3
1976	115.8	53.0	118.1	71.2



续表

年份 \ 月份	6	7	8	9
1977	6.8	84.9	156.8	1.2
1978	105.0	151.0	120.8	49.6
1979	72.6	137.3	120.7	31.0
1980	82.4	43.4	13.0	29.3
1981	37.0	61.9	85.6	8.2
1982	61.9	22.4	209.6	8.3
1983	32.5	70.3	26.4	72.7
1984	38.9	54.0	71.2	24.9
1985	8.1	58.5	221.8	38.6
1986	17.3	52.4	50.8	8.1
1987	33.9	45.2	63.9	91.8
1988	17.5	56.7	62.6	19.2
1989	8.8	24.8	34.0	12.0
1990	29.1	72.4	62.5	43.7
1991	67.0	70.9	27.1	69.9
1992	19.6	40.5	158.5	158.5
1993	58.2	58.2	28.2	15.0
1994	159.5	96.6	143.1	20.7
1995	37.2	70.1	111.4	9.4

续表

年份 \ 月份	6	7	8	9
1996	83.5	83.5	31.2	18.1
1997	6.3	41.3	259.3	12.6
1998	36.7	59.0	106.6	14.0
1999	75.3	39.1	33.0	48.1
2000	38.0	54.5	59.0	42.5
2001	100.1	122.0	122.0	13.1

表 3-40 月最大三日实测降水量序列 (跨期选样) 的统计参数

参数 \ 月份	6	7	8	9
$\bar{x}$	47.0763	76.3026	91.4658	38.8974
$S$	34.0948	49.0711	60.5102	33.3849
$C_v$	0.7242	0.6431	0.6616	0.8583

表 3-41 各月一日设计暴雨值 (方法 4) 单位: mm

P (%) \ 月份	6	7	8	9
0.01	223.24	238.79	375.98	158.82
0.1	178.72	194.31	302.27	127.18
1	133.28	148.91	227.04	94.89
2	119.28	134.92	203.86	84.94
5	100.46	116.12	172.7	71.57
10	86.0	101.68	148.76	61.29
20	71.08	86.77	124.07	50.69

表 3-42 各月三日设计暴雨值 (不跨期选样, 方法 4) 单位: mm

月份 P (%)	6	7	8	9
0.01	328.26	479.86	588.67	258.36
0.1	258.8	380.14	465.6	203.43
1	188.65	279.44	341.32	147.96
2	167.53	249.14	303.92	131.27
5	138.59	207.59	252.64	108.38
10	116.45	175.81	213.43	90.88
20	93.98	143.55	173.61	73.11

表 3-43 各月三日设计暴雨值 (跨期选样, 方法 4) 单位: mm

月份 P (%)	6	7	8	9
0.01	321.05	470.62	577.7	307.17
0.1	256.21	377.3	462.63	243.68
1	189.98	281.97	345.08	178.82
2	169.41	252.37	308.58	158.68
5	141.87	212.73	259.7	131.72
10	120.26	181.63	221.34	110.55
20	97.95	149.52	181.75	88.71

## 二、计算结果分析

比较表 3-42 和表 3-43 中的计算结果, 可以看出总体上是

合理的。由于不跨期和跨期序列的均值分别为 46.4 和 47.9, 后者较前者大一些, 故表 3-43 中不同月份相应频率的设计暴雨值比表 3-42 中相应值也大一些。但对 9 月份而言, 二者相差较大, 究其原因是二者的均方差差异明显, 前者为 26.4252, 而后者为 33.3849。进一步分析发现, 跨期序列的均方差较大的主要原因是个别点据的影响。在不跨期序列中, 1992 年 9 月份的值为 59.5, 而在跨期序列中其值变为 158.5。若仍采用 59.5 计算统计参数, 则跨期序列均方差变为 27.0636, 与不跨期序列的均方差接近。因此, 经综合考虑建议在实用中采用表 3-42 的计算结果。经综合分析和全面比较, 最后确定月最大一日和月最大三日设计暴雨值见表 3-41 和表 3-42。

### 三、月设计暴雨结果的修正

根据设计暴雨理论, 月设计暴雨应小于同频率的年设计暴雨。比较表 3-41、表 3-42 和表 3-32, 频率为 0.01%、0.1%、1%、2% 时, 月设计暴雨和同频率的年设计暴雨符合这一规律; 频率为 5%、10%、20% 时, 8 月份的设计暴雨大于同频率的年设计暴雨, 这是不合理的, 应予以修正。修正时以年设计暴雨为准, 并保持千年一遇 8 月设计暴雨不变, 按比例对表 3-41、表 3-42 中的月设计暴雨进行修正, 修正后月设计暴雨见表 3-44、表 3-45。

根据表 3-44 和表 3-45 中的设计暴雨, 经产汇流计算, 可推求出相应的设计洪水, 进而根据各月的设计洪水确定各月的汛限水位。

表 3-44 修正后各月一日设计暴雨值 (方法 4) 单位: mm

月份 P (%)	6	7	8	9
0.01	228.8	244.73	385.34	162.77
0.1	178.72	194.31	302.27	127.18
1	128.2	143.24	218.39	91.28
2	113.0	127.83	193.14	80.47
5	92.21	106.59	158.52	65.69
10	76.34	90.26	132.06	54.41
20	60.26	73.57	105.18	42.98

表 3-45 修正后各月三日设计暴雨值 (不跨期选样, 方法 4)

单位: mm

月份 P (%)	6	7	8	9
0.01	330.34	482.88	592.38	259.99
0.1	258.8	380.14	465.6	203.43
1	185.82	275.25	336.2	145.74
2	163.35	242.92	296.33	127.99
5	133.16	199.45	242.74	104.13
10	109.99	166.05	201.58	85.83
20	86.12	131.55	159.09	66.99



## 第四章

# 汛限水位研究与确定

## 第一节 旬设计洪水的确定

通过对洪水计算成果的复核，确定的门楼水库设计洪水过程线见表 4-1。

表 4-1 门楼水库设计洪水过程线 单位:  $\text{m}^3/\text{s}$

时段 \ P(%)	0.01×1.06	0.01	0.05×1.06	0.05	0.1×1.06	0.10	1	2	5
1	269	254	226	213	205	193	132	114	89
2	336	317	283	267	256	242	165	142	111
3	404	381	339	320	307	290	199	171	134
4	493	465	414	391	376	355	243	208	163
5	673	635	565	533	546	515	331	284	223
6	1079	1018	801	756	829	782	448	378	287
7	1536	1449	1439	1358	1114	1051	643	526	525
8	3130	2953	2502	2360	2247	2120	1309	1071	768
9	5289	4990	4230	3991	3799	3584	2212	1709	1298
10	6530	6160	5326	5025	4722	4455	2724	2119	1643
11	8491	8010	6682	6304	5877	5544	3406	2816	1959

续表

$P(\%)$ 时段	$0.01 \times 1.06$	0.01	$0.05 \times 1.06$	0.05	$0.1 \times 1.06$	0.10	1	2	5
12	11475	10825	8967	8459	8071	7614	4524	3657	2532
13	8713	8220	7202	6794	6319	5961	3631	2951	2114
14	7762	7323	6287	5931	5581	5265	3156	2578	1825
15	7252	6842	5880	5547	5132	4842	2903	2358	1663
16	6918	6526	5494	5183	4915	4637	2668	2154	1555
17	6624	6249	5249	4952	4722	4455	2569	2071	1464
18	5816	5487	4608	4347	4140	3906	2366	1922	1367
19	5136	4845	4076	3845	3660	3453	2090	1696	1206
20	4572	4313	3635	3429	3261	3076	1864	1510	1073
21	3959	3735	3152	2974	2826	2666	1615	1304	926
22	3441	3246	2742	2587	2456	2317	1403	1131	802
23	2984	2815	2381	2246	2129	2008	1217	978	693
24	2655	2505	2120	2000	1893	1786	1083	869	646
25	2349	2216	1875	1769	1671	1576	958	808	590
26	2117	1997	1690	1594	1502	1417	926	783	549
27	1907	1799	1522	1436	1463	1380	894	749	503
28	1804	1702	1481	1397	1404	1325	873	716	443
29	1722	1625	1433	1352	1332	1257	848	681	438
30	1664	1570	1388	1309	1291	1218	783	665	426
31	1628	1536	1347	1271	1230	1160	761	650	420
32	1582	1492	1308	1234	1172	1106	737	624	412
33	1508	1423	1212	1143	1088	1026	684	581	426
34	1374	1296	1136	1072	1021	963	643	547	412
35	1327	1252	1101	1039	990	934	625	532	401

续表

时段 \ P(%)	0.01×1.06	0.01	0.05×1.06	0.05	0.1×1.06	0.10	1	2	5
36	1259	1188	1047	988	942	889	596	508	383
37	1233	1163	1027	969	925	873	587	501	379
38	1198	1130	1000	943	901	850	573	490	372
39	1176	1109	982	926	885	835	565	483	367
40	1141	1076	953	899	859	810	550	471	358
41	1116	1053	932	879	841	793	540	462	352
42	1087	1025	909	858	820	774	528	452	345
43	1065	1005	890	840	804	758	518	444	339
44	1039	980	869	820	785	741	507	434	332
45	1013	956	848	800	767	724	496	425	325
46	989	933	828	781	750	708	485	415	318
47	974	919	816	770	740	698	479	410	315
48	951	897	798	753	724	683	468	401	309
49	924	872	777	733	705	665	456	390	302
50	903	852	760	717	689	650	446	382	296
51	877	827	739	697	670	632	434	371	289
52	857	808	722	681	655	618	424	363	283
53	833	786	702	662	637	601	412	353	276
54	814	768	686	647	622	587	403	345	270
55	791	746	666	628	604	570	391	335	263
56	772	728	651	614	590	557	382	327	258
57	749	707	631	595	572	540	371	318	251
58	731	690	616	581	558	526	361	310	245
59	709	669	597	563	541	510	350	301	238



续表

时段 \ P(%)	0.01×1.06	0.01	0.05×1.06	0.05	0.1×1.06	0.10	1	2	5
60	691	652	581	548	527	497	341	294	233
61	668	630	563	531	510	481	330	285	226
62	651	614	548	517	497	469	322	278	220
63	628	592	529	499	480	453	311	270	213
64	611	576	514	485	466	440	302	263	208
65	589	556	496	468	450	425	292	254	201
66	572	540	481	454	436	411	284	247	195
67	550	519	463	437	420	396	274	238	188
68	524	494	441	416	400	377	262	227	180
69	498	470	419	395	380	358	250	217	171
70	472	445	397	375	360	340	237	206	163
71	446	421	376	355	341	322	225	195	155
72	421	397	354	334	321	303	213	185	146
73	395	373	332	313	301	284	200	174	138

在第三章中已确定出了该流域的旬设计暴雨成果,见表 3-34。从有利于工程安全的角度出发,让表 4-1 中的设计洪水成果与 8 月中旬(设计暴雨最大旬)的设计暴雨相对应,按设计洪水与设计暴雨成比例的关系,确定其它各旬的设计洪水(也可利用第二章介绍的方法推求)。百年一遇、千年一遇和万年一遇各旬的设计洪水成果见表 4-2、表 4-3、表 4-4 和表 4-5。

在表 4-1 中,考虑到历史调查洪水的影响,对千年一遇、2000 年一遇和万年一遇的洪水采用了 1.06 的放大系数,其目的是为了偏于安全。

表 4-2

百年一遇旬设计洪水过程线

单位:  $\text{m}^3/\text{s}$ 

时段	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1	29	45	82	77	66	117	90	132	103	64	30	29
2	36	56	103	96	83	146	113	165	128	80	38	36
3	44	67	124	116	100	176	136	199	155	96	46	44
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11	745	1151	2127	1978	1704	3014	2329	3406	2648	1645	786	747
12	989	1528	2826	2627	2263	4003	3093	4524	3517	2184	1045	992
13	794	1227	2268	2109	1816	3213	2482	3631	2823	1753	838	796
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
73	44	68	125	116	100	177	137	200	155	97	46	44

表 4-3

千年一遇旬设计洪水过程线

单位:  $\text{m}^3/\text{s}$ 

时段	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1	42	65	121	112	95	170	131	193	150	93	45	43
2	52	82	151	139	118	213	163	242	187	116	56	54
3	63	98	181	167	142	255	195	290	224	140	67	64
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11	1203	1875	3470	3201	2720	4880	3742	5544	4294	2671	1284	1229
12	1652	2575	4765	4396	3735	6702	5139	7614	5897	3668	1763	1688
13	1293	2016	3731	3442	2924	5247	4023	5961	4617	2872	1380	1322
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
73	62	96	178	164	139	250	192	284	220	137	66	63

表 4-4 万年一遇旬设计洪水过程线 单位:  $\text{m}^3/\text{s}$ 

时段	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1	55	86	159	146	123	223	170	254	196	122	59	57
2	68	107	199	182	154	278	212	317	245	153	74	71
3	82	129	239	219	185	334	255	381	295	183	88	85
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11	1730	2710	5019	4610	3884	7029	5366	8010	6191	3854	1858	1788
12	2338	3662	6783	6230	5249	9499	7252	10825	8366	5209	2511	2416
13	1776	2781	5150	4731	3986	7213	5506	8220	6353	3955	1906	1835
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
73	80	126	233	214	181	327	250	373	288	179	86	83

表 4-5 万年一遇旬设计洪水过程线 (放大 1.06 倍) 单位:  $\text{m}^3/\text{s}$ 

时段	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1	58	91	169	155	130	236	180	269	208	129	62	60
2	73	114	211	193	163	295	225	336	260	162	78	75
3	87	137	253	233	196	355	271	404	312	194	94	90
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11	1834	2873	5320	4887	4117	7451	5688	8491	6562	4086	1969	1895
12	2479	3882	7190	6604	5564	10069	7687	11475	8868	5521	2661	2561
13	1882	2948	5459	5015	4225	7646	5837	8713	6734	4192	2021	1945
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
73	85	134	247	227	192	347	265	395	305	190	92	88

## 第二节 月设计洪水的确定

月设计暴雨成果见表 3-45, 让表 4-1 中的设计洪水成果与 8 月 (设计暴雨最大月) 的设计暴雨相对应, 按设计洪水与设计暴雨成比例的关系, 确定其它各月的设计洪水, 结果见表 4-6、表 4-7 和表 4-8。

表 4-6 百年一遇月设计洪水过程线 单位:  $\text{m}^3/\text{s}$

时段	6 月	7 月	8 月	9 月
1	73	108	132	57
2	91	135	165	72
3	110	163	199	86
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11	1883	2789	3406	1476
12	2500	3704	4524	1961
13	2007	2973	3631	1574
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
73	111	164	200	111

表 4-7 万年一遇月设计洪水过程线 单位:  $\text{m}^3/\text{s}$

时段	6 月	7 月	8 月	9 月
1	142	207	254	111
2	177	258	317	139
3	213	311	381	167
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮



续表

时段	6月	7月	8月	9月
11	4467	6530	8010	3516
12	6037	8824	10825	4751
13	4584	6700	8220	3608
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
73	208	304	373	164

表 4-8 万年一遇月设计洪水过程线 (放大 1.06 倍) 单位:  $\text{m}^3/\text{s}$ 

时段	6月	7月	8月	9月
1	150	219	269	118
2	187	274	336	147
3	225	329	404	177
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11	4735	6922	8491	3727
12	6399	9354	11475	5036
13	4859	7102	8713	3824
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
73	220	322	395	173

### 第三节 峰量综合控制法研究



当水库承担有下游防洪任务时, 希望能够在保证大坝安全的前提下, 尽量保证下游安全。即当来水不超过下游防洪标准时, 应保证下游的防洪安全; 当来水超过下游防洪标准后, 在大坝设计、校核标准范围内, 应当保证大坝的安全。根据上述希望

要求,在防洪调度中十分重要的一点就是要判断在什么情况下应当保下游,在什么情况下应当保大坝。在洪水发生过程中,事先并不能知道这次洪水是否超过了某种标准,而需要根据某项指标来做出判断,这种指标就是判断条件。

目前常用的判断指标有库水位、入库流量、一定时段的降雨量、峰前蓄水量等。

以上判断指标均有其相应的适应条件与优缺点。结合门楼水库的实际情况,在总结现行方法的基础上,从结合安全(水库大坝本身和下游防洪对象)与兴利两个方面考虑,注重实用性与便于操作,特提出如下判定指标,即“峰量综合控制法”。现介绍如下。

### 一、不同频率洪水峰量分析

根据表 4-1 中的设计洪水过程线,可计算出不同频率洪水峰前洪量并查出相应的洪峰流量见表 4-9。

表 4-9 不同频率洪水峰前洪量和洪峰流量

频率 $P$ (%)	5	2	1	0.1	$0.1 \times 1.06$	0.01	$0.01 \times 1.06$
洪峰流量 $Q_m(p)$ ( $m^3/s$ )	2532	3657	4524	7614	8071	10825	11475
峰前洪量 $W_m(p)$ (万 $m^3$ )	3048	4092	5067	8257	8753	11536	12228

### 二、峰量综合控制法判定指标

峰量综合控制法判定指标一方面要考虑洪峰的作用,另一方



面也要考虑涨洪段洪水过程的影响，故提出判定指标如下

$$Y(t) = \alpha_1 \frac{Q(t)}{Q_m(p)} + \alpha_2 \frac{W(t)}{W_m(p)} \quad (4-1)$$

式中  $Y(t)$  ——综合判定指标；

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  ——洪峰与洪量的影响权重， $\alpha_1 + \alpha_2 = 1.0$ ；

$Q(t)$  —— $t$  时刻的实测（或预报）流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$W(t)$  —— $t$  时刻之前本次洪水的实测（或预报）洪量，  
万  $\text{m}^3$ ；

$Q_m(p)$  ——频率为  $P$  的设计洪水过程对应的洪峰流量，  
 $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$W_m(p)$  ——频率为  $P$  的设计洪水过程对应的峰前洪水总  
量，万  $\text{m}^3$ 。

在洪峰与洪量影响系数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的确定时，应当考虑具体水库的实际情况。 $\alpha_1$  反映洪峰对水库调度的影响，当水库的防洪库容相对较小时， $\alpha_1$  值应大一些；反之， $\alpha_1$  应小一些。 $\alpha_2$  反映洪量对水库调度的影响，当水库的防洪库容相对较小时， $\alpha_2$  的值应小一些；反之，应大一些。根据门楼水库的实际情况， $\alpha_1$  可采用  $0.45 \sim 0.55$ ， $\alpha_2$  可采用  $0.55 \sim 0.45$ 。据此，可给出门楼水库的判定指标见表 4-10。

表 4-10

综合判定指标值

$P(\%)$	5	2	1	0.1	$0.1 \times 1.06$	0.05	0.01	$0.01 \times 1.06$
$Y(t)$	0.5806	0.8080	1.0	1.6564	1.7557	1.8495	2.3348	2.4749

注 表中的数据是以百年一遇为标准而给出的，也可选用其它标准。

将有关数据代入式 (4-1), 可得到以百年一遇为基准的门楼水库峰量综合控制法的判定指标计算公式为

$$Y(t) = 1.1052 \times 10^{-4} Q(t) + 9.868 \times 10^{-5} W(t) \quad (4-2)$$

上式中的符号意义同前。

在实用时, 根据设计洪水过程 (确定汛限水位时) 或实际来水过程 (实时调度时) 由式 (4-2) 连续计算  $Y(t)$  值, 根据  $Y(t)$  值的变化情况做出相应的泄洪或调度决策。

## 第四节 汛限水位过程线的分析计算

### 一、调洪决策的确定

结合门楼水库的工程情况及下游河道的实际情况和河道治理规划, 调洪决策从近期和远期考虑, 可采用以下四种方案。

方案 1: 具体内容是当门楼水库上游流域发生小于百年一遇洪水时, 力争保证下游河道、大桥和烟台市福山区的安全。结合本章第三节的调洪计算方法, 该方案的调洪决策为: 当  $Y(t) < 0.5806$  时 (对应洪水小于 20 年一遇), 允许下泄流量不大于  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 当  $0.5806 \leq Y(t) < 0.8080$  时 (对应洪水不小于 20 年一遇, 小于 50 年一遇), 允许下泄流量不大于  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 当  $0.8080 \leq Y(t) < 1.0$  时 (对应洪水不小于 50 年一遇, 小于百年一遇), 允许下泄流量不大于  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 当  $Y(t) \geq 1.0$  时 (对应洪水不小于百年一遇), 则不再限泄。

方案 2: 具体内容是当门楼水库上游流域发生不大于 50 年一遇洪水时, 保证下游河道、大桥和烟台市福山区的安全。同



理, 该方案的调洪决策为: 当  $Y(t) \leq 0.5806$  时 (对应洪水不大于 20 年一遇), 允许下泄流量不大于  $800\text{m}^3/\text{s}$ ; 当  $0.5806 < Y(t) \leq 0.8080$  时 (对应洪水大于 20 年一遇, 不大于 50 年一遇), 允许下泄流量不大于  $1500\text{m}^3/\text{s}$ ; 当  $Y(t) > 0.8080$  时 (对应洪水大于 50 年一遇), 则不再限泄。

方案 3: 根据烟台市河道治理规划, 门楼水库下游河道、福山大桥的安全防洪标准为 50 年一遇, 相应门楼水库的允许最大下泄流量为  $3585\text{m}^3/\text{s}$ 。方案的具体内容是当门楼水库上游流域发生等于 50 年一遇洪水时, 保证水库本身、下游防护对象的安全; 当发生不小于 50 年一遇洪水时, 则只保证水库本身的安全。该方案的调洪决策为: 当  $Y(t) \leq 0.8080$  (对应洪水不大于 50 年一遇), 允许下泄流量不大于  $3585\text{m}^3/\text{s}$ ; 当  $Y(t) > 0.8080$  时 (对应洪水大于 50 年一遇), 则不再限泄。

方案 4: 同方案 3, 但对发生小于 50 年一遇洪水时, 尽量减轻下游防洪压力。该方案的调洪决策为: 当  $Y(t) \leq 0.5806$  (对应洪水不大于 20 年一遇), 允许下泄流量不大于  $1200\text{m}^3/\text{s}$ ; 当  $0.5806 < Y(t) \leq 0.8080$  (对应洪水大于 20 年一遇, 不大于 50 年一遇), 允许下泄流量不大于  $3585\text{m}^3/\text{s}$ ; 当  $Y(t) > 0.8080$  时 (对应洪水大于 50 年一遇), 则不再限泄。

## 二、汛限水位的计算

对门楼水库而言, 百年一遇设计洪水的允许最高水位为  $31.65\text{m}$ , 万年一遇洪水的允许最高水位为  $33.46\text{m}$ 。对各旬和各月均以此为上限水位, 采用峰量综合控制法经过调洪计算可求得相应的各旬和各月的汛限水位。

在调洪计算并确定汛限水位过程中，需要说明以下两点：第一，因为来水事先是未知的，调洪过程中在保证大坝安全的前提下，应尽量保证下游的安全。因此，根据设计洪水确定汛限水位时，需要对设计洪水过程的涨洪段进行连续判定，根据判定结果不断调整水库调度方案即确定允许下泄量。这样，即将确定汛限水位与实际洪水调度相结合，又将中小洪水保下游安全与大洪水确保大坝安全有机地联为一体。第二，上述调洪原则是对应设计洪水或设计暴雨最大的区间，对于其它区间而言，同频率的设计洪水要比最大区间的小，在调洪计算时，仍用式（4-2）计算判定指标，但判定标准需作相应调整，各月和各旬的判定标准值见表4-11和表4-12。按表4-11和表4-12的标准进行调洪计算，其目的是在保证大坝安全、尽量减少下游洪灾损失的前提下，提高汛限水位，充分发挥水库的兴利效益。以旬计算为例，由于其它各旬同频率的暴雨即同频率的洪水都小于8月中旬的相应值，因此，除8月中旬外，若仍以表4-10所给定指标为标准进行洪水调度，则其它各旬对下游防洪安全的保证程度会明显偏高，甚至高于水库本身，从而大大降低水库的兴利效益。以7月上旬为例，7月上旬百年一遇的洪水（或暴雨）与8月中旬20年一遇的洪水（或暴雨）相当，7月上旬千年一遇的洪水（或暴雨）与8月中旬百年一遇的洪水（或暴雨）相当，故对7月上旬而言，若仍以前述标准（见表4-10）进行调度，则会过分保守。

根据方案1、方案2、方案3和方案4，对百年一遇、万年一遇（分为原值和扩大1.06倍两种情况）的设计洪水分别进行调洪计算推求汛限水位，计算结果见表4-13～表4-20。

表 4-11 综合判定指标值 (月设计洪水)

P (%)	6 月	7 月	8 月	9 月
5	0.3209	0.4753	0.5806	0.2517
2	0.4466	0.6615	0.8080	0.3502
1	0.5527	0.8187	1.0000	0.4335

表 4-12 综合判定指标值 (旬设计洪水)

P (%)	6 月			7 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
5	0.1269	0.1961	0.3626	0.3371	0.2904	0.5137
2	0.1766	0.2729	0.5046	0.4691	0.4041	0.7149
1	0.2186	0.3377	0.6245	0.5806	0.5002	0.8848
P (%)	8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
5	0.3969	0.5806	0.4513	0.2803	0.1340	0.1272
2	0.5523	0.8080	0.6281	0.3901	0.1865	0.1770
1	0.6836	1.0000	0.7774	0.4828	0.2309	0.2192

表 4-13 各旬汛限水位计算结果 (方案 1) 单位: m

P (%)	6 月			7 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	30.60
0.01	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	30.16
$0.01 \times 1.06$	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	29.06
P (%)	8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1	30.68	30.26	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01	30.68	27.00	30.68	30.68	30.68	30.68
$0.01 \times 1.06$	30.68	27.00	30.68	30.68	30.68	30.68

表 4-14 各旬汛限水位计算结果 (方案 2) 单位: m

P (%)	6 月			7 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	30.60
0.01×1.06	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	29.40
P (%)	8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1	30.68	30.56	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01	30.68	27.20	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01×1.06	30.68	27.00	30.68	30.68	30.68	30.68

表 4-15 各旬汛限水位计算结果 (方案 3) 单位: m

P (%)	6 月			7 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01×1.06	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	29.75
P (%)	8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01	30.68	27.20	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01×1.06	30.68	27.00	30.68	30.68	30.68	30.68

表 4-16 各旬汛限水位计算结果 (方案 4) 单位: m

P (%)	6 月			7 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01×1.06	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	29.55

续表

P (%)	8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
1	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01	30.68	27.20	30.68	30.68	30.68	30.68
$0.01 \times 1.06$	30.68	27.00	30.68	30.68	30.68	30.68

表 4-17 各月汛限水位计算结果 (方案 1) 单位: m

P (%)	6 月	7 月	8 月	9 月
1	30.68	30.68	30.26	30.68
0.01	30.68	30.68	27.00	30.68
$0.01 \times 1.06$	30.68	30.40	27.00	30.68

表 4-18 各月汛限水位计算结果 (方案 2) 单位: m

P (%)	6 月	7 月	8 月	9 月
1	30.68	30.68	30.56	30.68
0.01	30.68	30.68	27.20	30.68
$0.01 \times 1.06$	30.68	30.68	27.00	30.68

表 4-19 各月汛限水位计算结果 (方案 3) 单位: m

P (%)	6 月	7 月	8 月	9 月
1	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01	30.68	30.68	27.20	30.68
$0.01 \times 1.06$	30.68	30.68	27.00	30.68

表 4-20 各月汛限水位计算结果 (方案 4) 单位: m

P (%)	6 月	7 月	8 月	9 月
1	30.68	30.68	30.68	30.68
0.01	30.68	30.68	27.20	30.68
$0.01 \times 1.06$	30.68	30.68	27.00	30.68

### 三、汛限水位过程线的分析确定

在表 4-13~表 4-20 中, 利用百年一遇与万年一遇的设计洪水分别推求了汛限水位。在最终汛限水位确定时, 需考虑以下原则: ①当计算的汛限水位高于 30.68m (目前的兴利水位) 时, 即采用 30.68m。在表 4-13~表 4-20 中, 当计算结果大于 30.68m 时, 已直接选用了 30.68m; ②各旬 (或月) 的汛限水位选用三种计算结果 (即 1%, 0.01%,  $0.01\% \times 1.06$  对应结果) 中的最小值, 以保证工程本身安全; ③在确定以旬为区间的汛限水位时, 从近期和远期考虑 7 月下旬、8 月中旬采用第二方案和第三方案的计算结果, 其它各旬尽量利用第一方案和第四方案的计算结果, 其目的是有利于下游防护对象的安全; ④在确定以月为区间的汛限水位时, 从近期和远期考虑 8 月中旬采用第二方案和第三方案的计算结果, 其它各月利用第一方案和第四方案的计算结果, 也是为了在保证工程本身安全的前提下, 提高下游防护对象的防洪标准; ⑤从有利于工程安全和方便实用的角度出发, 汛限水位变化过程应平稳光滑。根据以上原则, 最后确定的近期汛限水位见表 4-21、表 4-22, 远期汛限水位见表 4-23、表 4-24。

表 4-21

各旬汛限水位 (近期)

单位: m

旬	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
汛限水位	30.68	30.68	30.68	30.30	29.70	29.40	28.50	27.00	30.00	30.68	30.68	30.68

表 4-22

各月汛限水位 (近期)

单位: m

月份	6	7	8	9
汛限水位	30.68	30.40	27.00	30.68

表 4-23

各旬汛限水位 (远期)

单位: m

旬	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
汛限水位	30.68	30.68	30.68	30.50	30.00	29.50	28.50	27.00	30.00	30.68	30.68	30.68

表 4-24

各月汛限水位 (远期)


单位: m

月份	6	7	8	9
汛限水位	30.68	30.68	27.00	30.68

## 第五节 水库实用调度说明

门楼水库位于大沽夹河的内夹河,距烟台市福山区 10km。大沽夹河由内夹河、外夹河两条河流组成,两条河流在门楼水库之下、福山大桥之上交汇,外夹河流域没有控制性水利工程,洪水基本上按天然规律下泄。因此,要保证福山区和福山大桥的安全,门楼水库起着举足轻重的作用。门楼水库在实际防洪调度时,必须考虑与外夹河流域的洪水遭遇问题,实施错峰调度。

在门楼水库实际调度时，对中小型暴雨洪水而言，要在福山大桥和下游河道能够通过的安全泄量范围内，根据外夹河流域的来水过程和门楼水库到内外夹河交汇处洪水的传播时间，分析确定门楼水库的下泄过程，以保证下游的安全。在制定具体调度方案时，应根据内外夹河暴雨洪水的不同组合情况确定相应的调度方案。



## 第五章

# 水库动态汛限水位过程线研究

---

## 第一节 动态汛限水位过程线的基本 概念与计算公式

### 一、动态汛限水位过程线的基本概念

若将汛期暂且划分成两段，例如 8 月 15 日前为前段，8 月 16 日后为后段，通过对北方很多流域特别是门楼水库所在流域的分析研究发现，对于某年某流域而言，若前段已发生了较大降雨，则后段再发生较大降雨的可能性就明显偏小；反之，若前段没有发生较大降雨，则后段发生较大降雨的可能性就较大。由此可对前述汛限水位过程线给予修正，修正的基本思路是：若前段已发生了较大降雨，则后段在符合设计保证率的前提下，利用统计理论提高汛限水位；若前段没有发生较大降雨，则后段汛限水位不变。进一步可将汛期划分成若干段，分别研究各段之间降雨特性的关系，进而根据前一段（或前若干段）的降雨情况对后一段的汛限水位进行修正，修正后的汛限水位过程线则称为动态汛限水位过程线。因此，动态汛限水位随前若干段的降雨情况而

异，即随年而异。根据上述概念，下面分析确定动态汛限水位的基本计算公式。

## 二、动态汛限水位过程线的计算公式

### 1. 汛期划分成两段

设前段发生较大暴雨的事件为  $A$ ，后段发生较大暴雨的事件为  $B$ ，原汛限水位过程线对应设计暴雨的频率为  $p$ 。当前段发生了较大暴雨，后段汛限水位的确定方法如下：后段发生较大暴雨的频率为  $P(B/A) = P(AB)/P(A)$ ，为了在后段时期内工程满足设计频率  $p$ ，根据概率定理，后段时期内设计暴雨的频率  $P_{\text{设}}$  可按下式确定，即

$$P_{\text{设}} P(B/A) \leq p$$

由上式得

$$P_{\text{设}} \leq p/P(B/A) = p/[P(AB)/P(A)] \quad (5-1)$$

也就是说，后段汛限水位可按此时  $P_{\text{设}}$  所对应的设计暴雨确定。当前一段没有发生较大暴雨，则后段汛限水位过程线不变。

### 2. 汛期划分成三段

设三段发生较大暴雨的事件分别为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ，原汛限水位过程线对应设计暴雨的频率为  $p$ ，对于第二段而言，动态汛限水位的推求方法类似上述后段的情况，不再讨论。对于第三段讨论如下：

当  $A$  发生，而  $B$  没有发生时

$$P_{\text{设}} \leq p/P(C/A) = p/[P(AC)/P(A)]$$

当  $A$  没有发生，而  $B$  发生时



$$P_{\text{设}} \leq p/P(C/B) = p/[P(BC)/P(B)]$$

当 A、B 均发生时

$$P_{\text{设}} \leq p/P[C/(A+B)]$$

以上各式可用一通式表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{设}} \leq p/P[C/(A+B)] &= p/\{P[(A+B)C]/P(A+B)\} \\ &= p/\{[P(AC) + P(BC)]/[P(A) \\ &\quad + P(B) - P(AB)]\} \quad (5-2) \end{aligned}$$

当 A、B 均未发生，第三段汛限水位不变。当第三段设计暴雨的频率  $P_{\text{设}}$  求得后，则可根据相应设计暴雨对应的洪水推求其相应汛限水位。

### 3. 汛期划分成四段

设四段发生较大暴雨的事件分别为 A、B、C、D，原汛限水位过程线对应设计暴雨的频率仍为  $p$ ，则对于第二、三段而言，动态汛限水位的推求方法同上。类似分成三段的推导方法，对第四段而言， $P_{\text{设}}$  的计算通式如下

$$\begin{aligned} P_{\text{设}} &\leq p/P[D/(A+B+C)] \\ &= p/\{P[(A+B+C)D]/P(A+B+C)\} \\ &= p/\{[P(AD) + P(BD) + P(CD)]/[P(A) \\ &\quad + P(B) + P(C) - P(AB) - P(AC) \\ &\quad - P(BC) + P(ABC)]\} \quad (5-3) \end{aligned}$$

当 A、B、C 均未发生，则第四段保持原汛限水位。否则，应根据推求的  $P_{\text{设}}$  调整其相应的汛限水位。

### 4. 汛期划分成五段

设五段发生较大暴雨的事件分别为 A、B、C、D、E，原

汛限水位过程线对应设计暴雨的频率仍为  $p$ ，对于第二、三、四段而言，动态汛限水位的推求方法同上。对于第五段，其通式为

$$\begin{aligned}
 P_{\text{设}} &\leq p/P[E/(A+B+C+D)] \\
 &= p/\{P[E(A+B+C+D)]/P(A+B+C+D)\} \\
 &= p/\{[P(AE)+P(BE)+P(CE)+P(DE)] \\
 &\quad / [P(A)+P(B)+P(C)+P(D) \\
 &\quad - P(AB)-P(AC)-P(AD)-P(BC) \\
 &\quad - P(BD)-P(CD)+P(ABC)+P(ACD) \\
 &\quad + P(BCD)-P(ABCD)]\} \quad (5-4)
 \end{aligned}$$

当  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  均未发生，则第五段保持原汛限水位。否则，应根据推求的  $P_{\text{设}}$  调整其相应的汛限水位。

#### 5. 汛期划分成六段

设六段发生较大暴雨的事件分别为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ ，原汛限水位过程线对应设计暴雨的频率仍为  $p$ ，对于第二、三、四、五段而言，动态汛限水位的推求方法同上。对于第六段，其通式为

$$\begin{aligned}
 P_{\text{设}} &\leq p/P[F/(A+B+C+D+E)] \\
 &= p/\{P[F(A+B+C+D+E)]/P(A+B+C+D+E)\} \\
 &= p/\{[P(AF)+P(BF)+P(CF)+P(DF) \\
 &\quad + P(EF)]/[P(A)+P(B)+P(C)+P(D) \\
 &\quad + P(E)-P(AB)-P(AC)-P(AD)-P(AE) \\
 &\quad - P(BC)-P(BD)-P(BE)-P(CD)-P(CE)
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 & - P(DE) + P(ABC) + P(ABD) + P(ABE) \\
 & + P(BCD) + P(BDE) + P(CDE) - P(ABCD) \\
 & - P(ACDE) - P(BCDE) + P(ABCDE)] \} \quad (5-5)
 \end{aligned}$$

当  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  均未发生, 则第六段保持原汛限水位。否则, 也应根据推求的  $P_{\text{设}}$  调整其相应的汛限水位。

在式 (5-1)、式 (5-2)、式 (5-3)、式 (5-4)、式 (5-5) 中, 若某事件不发生, 那么相应概率就为零, 与其交集的概率也为零。进一步可将汛期分为更多段, 讨论分析方法类似上述情况。至于划分多少段最为合适, 应根据各地区形成大暴雨的气象成因具体而定, 不宜划分太细。

根据以上讨论求出各种情况下的各段设计暴雨的频率  $P_{\text{设}}$  后, 则以其相应设计暴雨推求相应的设计洪水, 进而确定其相应的汛限水位。由此可看出, 动态汛限水位过程线随年而变化。

## 第二节 降水量序列的展延

前面讨论了动态汛限水位过程线的基本概念与计算公式。但在动态汛限水位确定时, 由于实测资料长度有限, 在实测期内出现大暴雨的可能性较小, 因此难以确定有关事件发生的频率, 从而无法根据实测资料确定动态汛限水位, 给动态汛限水位过程线的应用带来困难。针对此问题, 本次提出了应用多变量模型展延各时段降水量序列的方法。利用展延的各时段降水量长系列资料, 可求得展延期内出现大暴雨的次数, 进而确定有关事件发生的频率, 然后利用动态汛限水位过程线的计算公式即可确定动态汛限水位过程线。

### 一、随机模型的选用

参见第六章第四节，经综合分析比较，认为多变量模型不仅可用来研究同一气候区内相邻各站水文要素在空间上的关系和同一站几个变量之间的关系，同时可用于研究月（旬等不同时段长，本章以月为例，以下同）最大降水量序列的关系。各段降水量序列之间存在相互联系，因此在对其进行展延时必须考虑它们之间的相关信息，为此本书首次将多变量模型用于研究各段（月、旬等）最大降水量序列的展延方面。

### 二、多变量模型简介

假定时段长为 1 个月（也可采用其它时段长或变时段长，以下同），基于一阶 AR 模型，第  $i$  月的降水量最大值标准化序列  $Z_t^{(i)}$  不仅与其当月的  $Z_{t-1}^{(i)}$  有关，而且与其它各月同时的  $Z_t^{(i)}$  和前一个时段的  $Z_{t-1}^{(i)}$  有关，且有随机因素的影响。可描述为

$$Z_t^{(i)} = a_{i1}Z_{t-1}^{(i)} + \cdots + a_{in}Z_{t-1}^{(n)} + b_{i1}\epsilon_t^{(i)} + \cdots + b_{in}\epsilon_t^{(n)}$$

$$i = 1, 2, \cdots, n \quad (5-6)$$

式中  $Z_t^{(i)}$ ——标准化降水量序列；

$\epsilon_t^{(i)}$ ——均值为零、方差为 1 的随机变量。

令

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$



$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

$$Z_t = \begin{bmatrix} Z_t^{(1)} \\ Z_t^{(2)} \\ \vdots \\ Z_t^{(n)} \end{bmatrix}$$

$$\epsilon_t = \begin{bmatrix} \epsilon_t^{(1)} \\ \epsilon_t^{(2)} \\ \vdots \\ \epsilon_t^{(n)} \end{bmatrix}$$

则式 (5-6) 可写成

$$Z_t = AZ_{t-1} + B\epsilon_t \quad (5-7)$$

### 三、模型参数确定

式 (5-7) 中参数矩阵  $A$ 、 $B$  的确定公式如下

$$A = M_1 M_0^{-1}$$

$$BB^T = M_0 - M_1 M_0^{-1} M_1^T \quad (5-8)$$

式 (5-8) 中  $M_1$ 、 $M_0$  分别为滞时为零和滞时为 1 的相关

矩阵, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} M_0 &= \begin{bmatrix} \rho_0^{11} & \rho_0^{12} & \cdots & \rho_0^{1n} \\ \rho_0^{21} & \rho_0^{22} & \cdots & \rho_0^{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \rho_0^{n1} & \rho_0^{n2} & \cdots & \rho_0^{nn} \end{bmatrix} \\ M_1 &= \begin{bmatrix} \rho_1^{11} & \rho_1^{12} & \cdots & \rho_1^{1n} \\ \rho_1^{21} & \rho_1^{22} & \cdots & \rho_1^{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \rho_1^{n1} & \rho_1^{n2} & \cdots & \rho_1^{nn} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (5-9)$$

式 (5-9) 中,  $\rho_0^i$ 、 $\rho_1^j$  分别表示第  $i$  月和第  $j$  月之间滞时为 0 和滞时为 1 的互相关系数, 可由实测样本序列求得。

#### 四、利用多变量 AR (1) 模型展延偏态序列的步骤

第一步, 利用式 (5-8) 和式 (5-9) 分别计算  $M_0$ 、 $M_1$ 、 $A$ 、 $B$  矩阵。

第二步, 偏态系数矩阵  $C_e$  的推求

$$C_e = G^{-1}H \quad (5-10)$$

式中

$$G = \begin{bmatrix} b_{11}^3 & b_{12}^3 & \cdots & b_{1n}^3 \\ b_{21}^3 & b_{22}^3 & \cdots & b_{2n}^3 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1}^3 & b_{n2}^3 & \cdots & b_{nn}^3 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} m_3^{(1)} - d_3^{(1)} \\ m_3^{(2)} - d_3^{(2)} \\ \vdots \\ m_3^{(n)} - d_3^{(n)} \end{bmatrix}$$

在  $H$  阵中

$$m_3^{(i)} = E[(Z_t^{(i)})^3]$$

$$d_3^{(i)} = \sum_{j,k,l=1}^n a_{ij}a_{ik}a_{il}E[Z_{t-1}^{(j)}Z_{t-1}^{(k)}Z_{t-1}^{(l)}]$$

以  $n=4$  为例,  $C_e$  的计算公式如下

$$\begin{aligned} Z_t^{(i)} &= a_{i1}Z_{t-1}^{(1)} + a_{i2}Z_{t-1}^{(2)} + a_{i3}Z_{t-1}^{(3)} + a_{i4}Z_{t-1}^{(4)} \\ &\quad + b_{i1}\epsilon_t^{(1)} + b_{i2}\epsilon_t^{(2)} + b_{i3}\epsilon_t^{(3)} + b_{i4}\epsilon_t^{(4)} \\ (i &= 1, 2, 3, 4) \end{aligned}$$

$$G_4 = \begin{bmatrix} b_{11}^3 & b_{12}^3 & b_{13}^3 & b_{14}^3 \\ b_{21}^3 & b_{22}^3 & b_{23}^3 & b_{24}^3 \\ b_{31}^3 & b_{32}^3 & b_{33}^3 & b_{34}^3 \\ b_{41}^3 & b_{42}^3 & b_{43}^3 & b_{44}^3 \end{bmatrix}$$

$$H_4 = \begin{bmatrix} m_3^{(1)} - d_3^{(1)} \\ m_3^{(2)} - d_3^{(2)} \\ m_3^{(3)} - d_3^{(3)} \\ m_3^{(4)} - d_3^{(4)} \end{bmatrix}$$

在  $H_4$  阵中

$$m_3^{(i)} = E[(Z_t^{(i)})^3]$$

$$\begin{aligned} d_3^{(i)} = & a_{i1}^3 E[(Z_{t-1}^{(1)})^3] + a_{i2}^3 E[(Z_{t-1}^{(2)})^3] \\ & + a_{i3}^3 E[(Z_{t-1}^{(3)})^3] + a_{i4}^3 E[(Z_{t-1}^{(4)})^3] \\ & + 3a_{i1}^2 a_{i2} E[(Z_{t-1}^{(1)})^2 Z_{t-1}^{(2)}] + 3a_{i1}^2 a_{i3} E[(Z_{t-1}^{(1)})^2 Z_{t-1}^{(3)}] \\ & + 3a_{i1}^2 a_{i4} E[(Z_{t-1}^{(1)})^2 Z_{t-1}^{(4)}] + 3a_{i1} a_{i2}^2 E[Z_{t-1}^{(1)} (Z_{t-1}^{(2)})^2] \\ & + 3a_{i1} a_{i3}^2 E[Z_{t-1}^{(1)} (Z_{t-1}^{(3)})^2] + 3a_{i1} a_{i4}^2 E[Z_{t-1}^{(1)} (Z_{t-1}^{(4)})^2] \\ & + 3a_{i2}^2 a_{i3} E[(Z_{t-1}^{(2)})^2 Z_{t-1}^{(3)}] + 3a_{i2}^2 a_{i4} E[(Z_{t-1}^{(2)})^2 (Z_{t-1}^{(4)})^2] \\ & + 3a_{i2} a_{i3}^2 E[Z_{t-1}^{(2)} Z_{t-1}^{(3)}] + 3a_{i2} a_{i4}^2 E[Z_{t-1}^{(2)} Z_{t-1}^{(4)}] \\ & + 3a_{i3}^2 a_{i4} E[(Z_{t-1}^{(3)})^2 Z_{t-1}^{(4)}] + 3a_{i3} a_{i4}^2 E[(Z_{t-1}^{(3)})^2 (Z_{t-1}^{(4)})^2] \\ & + 6a_{i1} a_{i2} a_{i3} E[Z_{t-1}^{(1)} Z_{t-1}^{(2)} Z_{t-1}^{(3)}] + 6a_{i1} a_{i2} a_{i4} E[Z_{t-1}^{(1)} Z_{t-1}^{(2)} Z_{t-1}^{(4)}] \\ & + 6a_{i1} a_{i3} a_{i4} E[Z_{t-1}^{(1)} Z_{t-1}^{(3)} Z_{t-1}^{(4)}] + 6a_{i2} a_{i3} a_{i4} E[Z_{t-1}^{(2)} Z_{t-1}^{(3)} Z_{t-1}^{(4)}] \end{aligned}$$

$$C_{\epsilon 4} = G_4^{-1} H_4$$

利用矩阵  $A$  和实测降水量标准化序列求得  $m_3^{(i)}$ 、 $d_3^{(i)}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ )，代入  $H_4$  矩阵，即可求得  $C_{\epsilon 4}$ 。

第三步，由标准正态分布纯随机数  $\xi_t$  转换为皮尔逊Ⅲ型分布纯随机数  $\phi_t$

$$\begin{aligned} \phi_{ti} = & \frac{2}{C_{\epsilon i}} \left[ 1 + \frac{C_{\epsilon i} \xi_t}{6} - \frac{C_{\epsilon i}^2}{36} \right]^3 - \frac{2}{C_{\epsilon i}} \\ & i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5-11)$$

第四步， $Z_t$  序列的生成

$$Z_t = AZ_{t-1} + B\phi_t \quad (5-12)$$

第五步，序列的还原。 $Z_t$  为标准化序列，利用下式即可还原成原序列  $X_t$



$$X_t^{(i)} = Z_t^{(i)}\sigma^{(i)} + u^{(i)} \quad (5-13)$$

式 (5-13) 中,  $u^{(i)}$  和  $\sigma^{(i)}$  分别为第  $i$  月原始序列的均值和均方差。

第六步, 展延序列的检验。对展延序列的均值、均方差、变差系数和偏态系数进行检验, 看其是否能保持原样本序列的统计特性。

### 五、月降水量序列的展延

门楼水库控制面积内月最大一日实测降水量序列和月最大三日实测降水量序列 (分跨期选样和不跨期选样两种情况) 分别见表 3-35、表 3-37、表 3-39, 相应的各序列统计参数分别见表 3-36、表 3-38、表 3-40。

下面以月最大一日降水量序列为例说明月降水量序列的具体展延过程, 对月最大三日降水量序列 (不跨期选样) 只列出有关计算结果, 不再给出详细过程。

#### 1. 月最大一日降水量序列的展延

第一步, 计算  $M_0$ 、 $M_1$ 、 $A$ 、 $B$ 。

利用月最大一日降水量序列资料, 可求得各月序列滞时为 0 和滞时为 1 的互相关系数, 代入式 (5-9) 进而得到矩阵  $M_0$  和  $M_1$ , 结果如下

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0266 & -0.1463 & 0.2057 \\ 0.0266 & 1.0000 & -0.0387 & -0.0835 \\ -0.1463 & -0.0387 & 1.0000 & -0.3136 \\ 0.2057 & -0.0835 & -0.3136 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} -0.0788 & 0.1241 & 0.1966 & -0.2960 \\ 0.2735 & 0.0570 & 0.0363 & 0.1359 \\ 0.1494 & -0.0639 & 0.0073 & -0.1578 \\ -0.1494 & 0.0801 & -0.1084 & -0.1715 \end{bmatrix}$$

将  $M_0$  和  $M_1$  代入式 (5-8) 即可求得  $A$ 、 $B$  矩阵。在求矩阵  $B$  时, 假定  $B$  为下三角矩阵

$$A = \begin{bmatrix} -0.0133 & 0.1086 & 0.1218 & -0.2460 \\ 0.2633 & 0.0648 & 0.1160 & 0.1235 \\ 0.1909 & -0.0883 & -0.0358 & -0.2157 \\ -0.1904 & 0.0620 & -0.1927 & -0.1875 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.9427 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0562 & 0.9448 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.1878 & -0.0471 & 0.9470 & 0.0000 \\ 0.1754 & -0.0131 & -0.2925 & 0.9345 \end{bmatrix}$$

第二步, 计算偏态系数  $C_e$ 。

对月最大一日降水量序列资料进行标准化处理, 利用该标准化序列和矩阵  $A$ 、 $B$ , 由式 (5-10) 即可求得  $C_e$ , 计算结果为

$$C_e = [0.9849 \quad 1.1438 \quad 1.1850 \quad 1.1324]^T$$

第三步, 由计算机随机数发生器生成标准正态分布纯随机数  $\xi_t$  系列, 然后利用式 (5-11) 转换为皮尔逊Ⅲ型分布纯随机数  $\phi_t$  系列。

第四步, 序列的展延。

将矩阵  $A$ 、 $B$  和皮尔逊Ⅲ型分布纯随机数  $\phi_t$  系列代入式 (5



-12), 有

$$\begin{bmatrix} Z_t^{(1)} \\ Z_t^{(2)} \\ Z_t^{(3)} \\ Z_t^{(4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0133 & 0.1086 & 0.1218 & -0.2460 \\ 0.2633 & 0.0648 & 0.1160 & 0.1235 \\ 0.1909 & -0.0883 & -0.0358 & -0.2157 \\ -0.1904 & 0.0620 & -0.1927 & -0.1875 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{t-1}^{(1)} \\ Z_{t-1}^{(2)} \\ Z_{t-1}^{(3)} \\ Z_{t-1}^{(4)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.9427 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0562 & 0.9448 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.1878 & -0.0471 & 0.9470 & 0.0000 \\ 0.1754 & -0.0131 & -0.2925 & 0.9345 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_t^{(1)} \\ \Phi_t^{(2)} \\ \Phi_t^{(3)} \\ \Phi_t^{(4)} \end{bmatrix}$$

利用上式即可展延出标准化月最大一日降水量序列, 本次展延序列长度为 10000 年。

第五步, 序列的还原。

利用式 (5-13), 即可将第四步展延的 10000 年标准化序列还原成月最大一日降水量序列。月最大一日降水量展延序列见表 5-1, 相应的序列统计参数见表 5-2。

第六步, 序列统计参数检验。

比较表 3-36 和表 5-2, 可见生成序列基本保持了原实测样本序列的统计特性。

2. 月最大三日降水量序列 (不跨期选样) 的展延

有关中间计算结果如下, 展延序列见表 5-3, 相应的统计参数见表 5-4。

比较表 3-38 和表 5-4, 可见生成序列基本保持了原实测样本序列的统计特性。

表 5-1

月最大一日降水量展延序列

单位: mm

年 数 \ 月 份	6	7	8	9
1	6.1380	69.9114	83.5373	2.0457
2	42.8286	41.3419	67.1049	38.633
3	10.2571	90.1444	10.0701	47.7764
...	...	...	...	...
9998	25.5045	21.5506	66.0242	4.5952
9999	19.6001	9.8865	226.2424	31.3082
100000	13.8556	58.6187	51.2627	16.6867

注 表中只列出了部分数据。

表 5-2

月最大一日降水量展延序列的统计参数

参 数 \ 月 份	6	7	8	9
$\bar{x}$	36.3109	52.2430	66.3725	26.1057
S	25.5517	25.4814	42.4218	18.8368
$C_v$	0.7038	0.4877	0.6391	0.7216

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.1261 & -0.0972 & 0.1446 \\ 0.1261 & 1.0000 & -0.0911 & -0.0882 \\ -0.0972 & -0.0911 & 1.0000 & -0.2542 \\ 0.1446 & -0.0882 & -0.2542 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} -0.0710 & 0.0722 & 0.0945 & -0.3100 \\ 0.1482 & 0.0833 & 0.0415 & 0.1556 \\ 0.0989 & -0.1177 & -0.0270 & -0.1771 \\ -0.1303 & 0.2016 & -0.1149 & -0.1214 \end{bmatrix}$$



$$A = \begin{bmatrix} -0.0328 & 0.0522 & 0.0210 & -0.2952 \\ 0.1210 & 0.0980 & 0.1063 & 0.1737 \\ 0.1451 & -0.1647 & -0.0876 & -0.2349 \\ -0.1519 & 0.1975 & -0.1417 & -0.1180 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.9489 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.1807 & 0.9536 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.1471 & -0.0329 & 0.9490 & 0.0000 \\ 0.1016 & -0.0810 & -0.2406 & 0.9484 \end{bmatrix}$$

$$C_e = [1.5486 \quad 2.5539 \quad 1.46836 \quad 1.3721]^T$$

$$\begin{bmatrix} Z_t^{(1)} \\ Z_t^{(2)} \\ Z_t^{(3)} \\ Z_t^{(4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0328 & 0.0522 & 0.0210 & -0.2952 \\ 0.1210 & 0.0980 & 0.1063 & 0.1737 \\ 0.1451 & -0.1647 & -0.0876 & -0.2349 \\ -0.1519 & 0.1975 & -0.1417 & -0.1180 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{t-1}^{(1)} \\ Z_{t-1}^{(2)} \\ Z_{t-1}^{(3)} \\ Z_{t-1}^{(4)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.9489 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.1807 & 0.9536 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.1471 & -0.0329 & 0.9490 & 0.0000 \\ 0.1016 & -0.0810 & -0.2406 & 0.9484 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_t^{(1)} \\ \Phi_t^{(2)} \\ \Phi_t^{(3)} \\ \Phi_t^{(4)} \end{bmatrix}$$

## 六、对月降水量序列展延结果的分析讨论

由月最大一日降水量展延序列、月最大三日降水量展延序列（不跨期选样）直接排频，可求得不同频率的月设计暴雨，见表 5-5 和表 5-6。

表 5-3 月最大三日降水量展延序列 (不跨期选样) 单位: mm

月 份 年 数	6	7	8	9
1	27.7313	58.7790	77.7613	12.2921
2	80.7493	37.0069	93.1994	16.5539
3	70.9649	136.2394	98.6908	47.4943
...	...	...	...	...
9998	52.2204	97.2820	78.7357	38.2148
9999	20.9635	51.9295	52.2977	48.1403
100000	54.4974	61.9067	7.0874	20.5841

注 表中只列出了部分数据。

表 5-4 月最大三日降水量展延序列 (不跨期选样) 的统计参数

月 份 参 数	6	7	8	9
$\bar{x}$	45.7835	74.0994	87.4908	34.6216
S	33.0693	47.8297	60.0805	27.2292
$C_v$	0.7223	0.6455	0.6867	0.7865

表 5-5 各月最大一日设计暴雨 (展延系列) 单位: mm

频率 P (%)	6 月	7 月	8 月	9 月
0.1	145.4	174.8	263.0	108.5
1	110.0	128.7	195.1	81.6
2	99.7	117.2	171.4	71.4
5	88.4	101.5	148.8	62.3
10	70.2	87.3	122.7	50.7
20	56.3	71.8	98.5	39.7



表 5-6 各月最大三日设计暴雨 (展延系列、不跨期选样)

单位: mm

频率 $P$ (%)	6 月	7 月	8 月	9 月
0.1	219.3	356.3	389.0	179.1
1	148.7	246.3	273.4	119.3
2	132.7	212.6	242.4	104.6
5	110.6	156.6	199.8	90.8
10	87.7	130.8	163.1	69.4
20	68.1	98.4	127.7	54.0

比较由配线法求得的各月最大一、三日设计暴雨 (见表 3-44 和表 3-45) 和由展延序列直接排频求得的各月最大一、三日设计暴雨 (见表 5-5 和表 5-6), 二者有明显差异, 后者小于前者。其原因在于二者对月降水量实测序列的代表性考虑上的不同。配线法认为月降水量实测样本序列一般较短, 可能不能很好地代表月降水量序列的总体, 因此在配线时对样本序列的统计参数  $C_v$ 、 $C_s$  分别进行了适当调整, 通过适当调整参数使曲线与经验频率点据拟合较好, 即样本能够较好地代表总体为目标。而展延法没有考虑月降水量实测序列的代表性, 即没有考虑月降水量实测样本序列能不能较好地代表月降水量总体, 在序列生成时直接采用了样本序列的统计参数, 在对结果进行评价时, 只是注意了展延序列和实测序列的统计参数是否保持一致。

在应用多变量模型时, 如果直接选用配线法最终选用的统计参数, 则月最大一日和月最大三日降水量序列的展延结果见表 5

-7 和表 5-8。对表 5-7 和表 5-8 所列结果进行分析可知,生成序列不仅保持了原始序列的统计参数(指配线法最终选用的统计参数),而且由生成序列分析统计的设计暴雨值与配线法相应频率的值也非常接近。限于篇幅,结果不再列出。

表 5-7 月最大一日降水量展延序列 单位: mm

月 份 年 数	6	7	8	9
1	72.658	69.452	44.147	110.9
2	41.985	51.612	43.517	136.53
3	1.516	88.791	93.274	103.52
...	...	...	...	...
9998	5.1932	92.473	12.25	53.132
9999	82.56	65.205	14.989	21.281
10000	47.593	59.061	186.88	32.07

注 1. 表中只列出了部分数据。

2. 序列生成时选用了配线法最终选用的统计参数。

表 5-8 月最大三日降水量展延序列 (不跨期选样) 单位: mm

月 份 参 数	6	7	8	9
1	19.35	117.68	132.89	44.277
2	17.18	29.196	31.498	31.147
3	24.15	81.286	35.698	25.263
...	...	...	...	...



续表

参 数 \ 月 份	6	7	8	9
9998	29.099	15.491	165.74	67.754
9999	24.492	42.618	50.353	46.15
100000	82.56	65.205	14.989	21.281

注 1. 表中只列出了部分数据。

2. 序列生成时选用了配线法最终选用的统计参数。

因此, 在应用时间序列法展延降水量序列时, 应考虑实测降水量序列的代表性, 否则生成的结果可能不能较好的代表序列总体的特性。建议在应用时以配线法确定的参数为基础, 必要时可作适当调整。从而使生成的结果更好的代表总体。

### 第三节 水库动态汛限水位 过程线的分析确定



#### 一、月设计暴雨发生频率及其组合频率的确定

##### 1. 月设计暴雨发生频率及其组合频率的统计

将汛期 6~9 月以月为单位划分为四段 (也可采用其它划分方法, 等间距与不等间距均可), 设四段发生某频率设计暴雨的事件分别为 A、B、C 和 D, 根据展延长系列资料 (见表 5-7、表 5-8), 以不同频率的年设计暴雨值为阈值, 统计各月发生设计暴雨的频率及其组合频率, 统计结果见表 5-9、表 5-10。

表 5-9 月最大一日降水量序列统计结果

频率 (%)	0.1 (千年一遇)	1 (百年一遇)	2 (50 年一遇)	5 (20 年一遇)	10 (10 年一遇)	20 (5 年一遇)
$P(A)$	0	0.02	0.04	0.16	0.59	1.83
$P(B)$	0	0.07	0.14	0.39	1.45	3.82
$P(C)$	0.1	0.9	1.89	4.35	7.89	14.18
$P(D)$	0	0	0	0.02	0.03	0.18
$P(AB)$	0	0	0	0	0	0.04
$P(AC)$	0	0	0	0	0.02	0.16
$P(AD)$	0	0	0	0	0	0
$P(BC)$	0	0	0	0	0.09	0.57
$P(BD)$	0	0	0	0	0	0
$P(CD)$	0	0	0	0	0	0.01
$P(ABC)$	0	0	0	0	0	0
$P(ABD)$	0	0	0	0	0	0
$P(ACD)$	0	0	0	0	0	0
$P(BCD)$	0	0	0	0	0	0
$P(ABCD)$	0	0	0	0	0	0

表 5-10 月最大三日降水量序列(不跨期选样)统计结果

频率 (%)	0.1 (千年一遇)	1 (百年一遇)	2 (50 年一遇)	5 (20 年一遇)	10 (10 年一遇)	20 (5 年一遇)
$P(A)$	0	0.03	0.04	0.15	0.56	1.47
$P(B)$	0	0.21	0.49	1.28	2.99	6.35
$P(C)$	0.1	0.75	1.42	3.51	6.41	11.62



续表

频率 (%)	0.1 (千年一遇)	1 (百年一遇)	2 (50年一遇)	5 (20年一遇)	10 (10年一遇)	20 (5年一遇)
$P(D)$	0	0	0	0.04	0.13	0.48
$P(AB)$	0	0	0	0	0.03	0.22
$P(AC)$	0	0	0	0	0	0.08
$P(AD)$	0	0	0	0	0	0.03
$P(BC)$	0	0	0	0.05	0.2	0.63
$P(BD)$	0	0	0	0	0	0.02
$P(CD)$	0	0	0	0	0	0.05
$P(ABC)$	0	0	0	0	0	0.02
$P(ABD)$	0	0	0	0	0	0
$P(ACD)$	0	0	0	0	0	0
$P(BCD)$	0	0	0	0	0	0.01
$P(ABCD)$	0	0	0	0	0	0

## 2. 月设计暴雨发生频率统计结果的合理性检验

对某一量级的暴雨而言, 年发生的频率应与各月发生的频率之和相等, 即  $P_{\text{年}} = P(A) + P(B) + P(C) + P(D)$ 。下而以月最大一日降水量序列的统计结果为列, 对结果的合理性进行检验。

由表 5-9 可见, 对千年一遇的设计暴雨,  $P(A) + P(B) + P(C) + P(D) = 0.1$ ; 对百年一遇的设计暴雨,

$P(A) + P(B) + P(C) + P(D) = 0.99$ ; 对 50 年一遇的设计暴雨,  $P(A) + P(B) + P(C) + P(D) = 1.95$ ; 对 10 年一遇的设计暴雨,  $P(A) + P(B) + P(C) + P(D) = 10.09$ ; 对 5 年一遇的设计暴雨,  $P(A) + P(B) + P(C) + P(D) = 19.92$ 。由上统计分析可见, 结果基本合理。同理表 5-10 的统计结果也基本合理。

## 二、汛限水位动态控制说明

现以不小于 5 年一遇设计暴雨为例 (参见表 5-10), 说明汛限水位动态控制方法。

1) 对于 7 月份而言, 其汛限水位的动态控制取决于 6 月份是否发生了不小于 5 年一遇的设计暴雨, 分两种情况。

第一种情况: 若事件 A 发生 (设 A 为 6 月份发生不小于 5 年一遇设计暴雨的事件), 因为门楼水库的防洪限制水位是由百年一遇的设计暴雨或设计洪水确定的, 即  $p_{\text{设}} = 0.01$ , 由式 (5-1) 有

$$\begin{aligned}
 P_{\text{设}7} &= p_{\text{设}} / [P(AB)/P(A)] \\
 &= 0.01 / [0.220/1.470] = 0.067 = 6.7\%
 \end{aligned}$$

上式表示若 6 月份发生了不小于 5 年一遇的设计暴雨, 则 7 月份可按频率为 6.7% 的暴雨确定汛限水位, 水库不需再按原设计频率 1% 的暴雨所对应的汛限水位运行。

第二种情况: 若事件 A 不发生, 即 6 月份没有发生不小于 5 年一遇的设计暴雨, 则 7 月份汛限水位不变。

2) 对于 8 月份而言, 其汛限水位的动态控制取决于 6、7 月份是否发生了不小于 5 年一遇的设计暴雨, 分四种情况。



第一种情况：若事件 A 发生，事件 B 不发生（设 6、7 月份发生了不小于 5 年一遇设计暴雨的事件分别为 A、B），同前， $p_{\text{设}} = 0.01$ ，由式 (5-2) 有

$$\begin{aligned} P_{\text{设}8} &= p_{\text{设}} / [P(AC)/P(A)] \\ &= 0.01 / [0.008/1.470] = 0.18 = 18\% \end{aligned}$$

上式表示若 6 月份发生了不小于 5 年一遇的设计暴雨，而 7 月份不发生，则 8 月份可按频率为 18% 的暴雨确定汛限水位，水库不需再按原设计频率 1% 的暴雨所对应的汛限水位运行。

第二种情况：若事件 A 不发生，而事件 B 发生，同上有

$$\begin{aligned} P_{\text{设}8} &= p_{\text{设}} / [P(BC)/P(B)] \\ &= 0.01 / [0.630/6.350] = 0.10 = 10\% \end{aligned}$$

上式表示若 7 月份发生了不小于 5 年一遇的设计暴雨，而 6 月份不发生，则 8 月份可按频率为 10% 的暴雨确定汛限水位，水库也不再需要按原设计频率 1% 的暴雨所对应的汛限水位运行。

第三种情况：若事件 A、B 均发生，同上有

$$\begin{aligned} P_{\text{设}8} &= p_{\text{设}} / \{ [P(AC) + P(BC)] \\ &\quad / [P(A) + P(B) - P(AB)] \} \\ &= 0.01 / \{ [0.008 + 0.630] \\ &\quad / [1.470 + 6.350 - 0.220] \} \\ &= 0.12 = 12\% \end{aligned}$$

上式表示若 6、7 月份均发生了不小于 5 年一遇的设计暴雨，则 8 月份可按频率为 12% 的暴雨确定相应的汛限水位。

第四种情况：若事件 A、B 均不发生，即若 6、7 月份均不



发生不小于 5 年一遇的设计暴雨，则 8 月份汛限水位不变。

3) 对于 9 月份而言，其汛限水位的动态控制取决于 6、7、8 月份是否发生了不小于 5 年一遇的设计暴雨，共有八种可能情况。

第一种情况：若事件 A 发生，事件 B、C 均不发生（设 6、7、8 月份发生大于等于五年一遇设计暴雨的事件分别为 A、B、C）；

第二种情况：若事件 B 发生，事件 A、C 均不发生；

第三种情况：若事件 C 发生，事件 A、B 均不发生；

第四种情况：若事件 A、B 均发生，事件 C 不发生；

第五种情况：若事件 A、C 均发生，事件 B 不发生；

第六种情况：若事件 B、C 均发生，事件 A 不发生；

第七种情况：若事件 A、B、C 均发生；

第八种情况：若事件 A、B、C 均不发生。

对于第一种情况，同前述分析方法， $p_{\text{设}} = 0.01$ ，由式（5-3）有

$$\begin{aligned} P_{\text{设}9} &= p_{\text{设}} [P(AD)/P(A)] \\ &= 0.01/[0.03/1.470] = 0.49 = 49\% \end{aligned}$$

上式表示若 6 月份发生了不小于 5 年一遇的设计暴雨，而 7、8 月份均不发生，则 9 月份可按频率为 4.9% 的暴雨确定汛限水位，而不需再按原设计频率 1% 的暴雨所对应的汛限水位运行。

对于第二种至第七种情况，同前述分析方法，求得的设计频率均大于 100%，即小于 1 年一遇设计暴雨，故 9 月份可按 1 年一遇的设计暴雨相应的汛限水位运行。



对于第八种情况，即事件  $A$ 、 $B$ 、 $C$  均不发生，也就是 6、7、8 月份都没有发生不小于 5 年一遇设计暴雨，则 9 月份汛限水位不变。

其它情况下汛限水位动态控制方法类似，不再赘述。

在实际应用时，由于根据一个生成样本确定的事件发生频率及其组合频率的随机性较大，建议多生成几个样本，求出事件发生频率与组合频率的平均值，以此作为确定动态汛限水位的依据。



## 第六章

### 其它有关问题研究

#### 第一节 降雨与洪水资料统计分析

对近 20 年来内夹河流域发生的较大洪水（暂定为洪峰流量大于  $100\text{m}^3/\text{s}$ ）进行统计分析，统计结果见表 6-1。

表 6-1 较大洪水发生频率统计表

频 率 $P(\%)$ 洪峰流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	月 份	6	7	8	9
$Q_m \geq 100$		5.9 (28)	17.6 (24~31)	58.8 (2~25)	17.6 (1~6)
$Q_m \geq 200$		0 (0)	23.1 (24~31)	69.2 (2~25)	7.7 (5)
$Q_m \geq 500$		0 (0)	12.5 (31)	87.5 (2~25)	0 (0)
$Q_m \geq 1000$		0 (0)	0 (0)	100 (2~25)	0 (0)

注 表中括号内的数字为洪水发生日期。

由表 6-1 可见，较大洪水均发生在 7 月下旬与 8 月份。洪峰流量大于  $500\text{m}^3/\text{s}$  的洪水，除 1 场发生在 7 月 31 日，其余均发生在 8 月份。洪峰流量大于  $1000\text{m}^3/\text{s}$  的洪水均发生在 8 月份。



表 6-2 较大暴雨发生频率 (次数) 统计表

暴雨量级 (mm)	发生频率 $p$ (%)	月 (旬)	6			7			8			9		
			上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
$p \geq 50$			16.00 (12)			29.33 (22)			49.33 (37)			5.33 (4)		
			0 (0)	1.33 (1)	14.67 (11)	10.67 (8)	5.33 (4)	13.33 (10)	16.00 (12)	21.33 (16)	12.00 (9)	4.00 (3)	0.00 (0)	1.33 (1)
$p \geq 70$			17.15 (6)			20.00 (7)			60.00 (21)			2.86 (1)		
			0 (0)	2.86 (1)	14.29 (5)	8.57 (3)	5.71 (2)	5.71 (2)	8.57 (3)	34.29 (12)	17.14 (6)	2.86 (1)	0 (0)	0 (0)
$p \geq 100$			9.09 (1)			18.18 (2)			72.73 (8)			0		
			0 (0)	0 (0)	9.09 (1)	0 (0)	9.09 (1)	9.09 (1)	18.18 (2)	27.27 (3)	27.27 (4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
$p \geq 150$			0			0			100 (2)			0		
			0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	50 (1)	50 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)

注 括号内为暴雨发生次数。

对近 30 年来该流域发生的较大暴雨（指日降水量大于 50mm）进行了统计分析，统计结果见表 6-2。

由表 6-2 可见，日降雨量大于 100mm 的暴雨共发生了 11 次，1 次发生在 6 月下旬，7 月中、下旬各发生了一次，其余 8 次均发生在 8 月份。8 月份发生的频率为 72.73%。日降雨量大于 150mm 的暴雨共发生了两次，全发生在 8 月份，8 月中、下旬各发生一次。

从对洪水与暴雨的统计分析可以看出：8 月份发生的频率明显高于其它月份，且分布范围从月初基本上到月末。同时，各旬之间又有明显的差异。因此，在设计暴雨计算和汛限水位确定时选用了旬或月为计算时段。在汛限水位动态控制时，考虑到暴雨洪水的分布特性，同时为了方便实用，选用了月为计算时段。在其它流域应用时，建议根据流域的暴雨特性划分时段。

## 第二节 尾水利用研究

### 一、尾水利用的必要性与可行性

门楼水库所在流域同胶东地区的其它流域一样，一年中一般只发生一、二场大洪水，若不抓住洪水尾水的利用，则要失去良机，在汛末可能蓄不到兴利水位。因此，对洪水尾水利用问题的研究就显得十分必要。

一方面，该水库溢洪道上设有闸门，汛限水位在溢洪道堰顶高程之上，若有大洪水来临，可打开闸门在较短时间之内将汛限水位之上的预蓄水量泄掉，不会威胁工程的安全。因此，在工程

方面为拦蓄尾水提供了条件。另一方面,通过对入库洪水的分析研究,各场较大洪水的退水段变化规律比较一致,为利用洪水尾水提供了方便与可能。

## 二、洪水退水段规律研究

为了分析洪水退水段的规律,本次选择了近年来发生的几场较大暴雨和径流资料。通过分析发现,在洪水退水段,若没有后续降雨,则各场洪水的退水规律比较一致。对于有后续降雨的场次,若较合理的扣除后续降雨的影响,则退水规律与无降雨场次相符合。另外,退水规律还受上游水利工程泄流的影响。对上游庵里水库有泄流的场次,在分析退水规律时,应扣除泄流的影响。

### 1. 洪水尾水流量与洪水余量关系分析

选择若干场代表性好的较大洪水,将各场洪水的退水过程画在同一张图上,使其尽可能地重合,求出一条平均的退水过程,该过程就作为流域退洪过程线。该曲线如图 6-1。根据该曲线可求得不同尾水流量对应的洪水余量。部分流量对应的洪水雨量见表 6-3。

表 6-3 尾水流量与洪水余量关系对照表

尾水流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
洪水余量 (万 $\text{m}^3$ )	100	420	630	810	965	1145	1328	1510	1580	1845	2020

### 2. 后续降雨影响分析

当无后续降雨时(指拦蓄尾水开始时刻之后),可利用图 6-

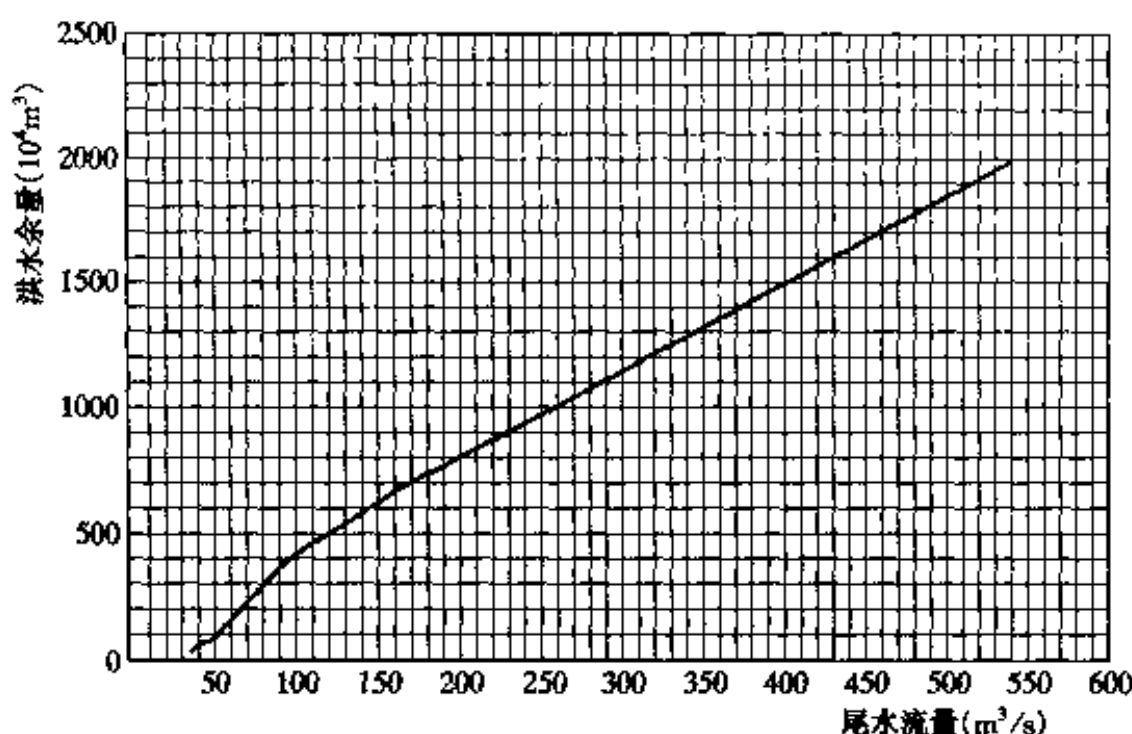


图 6-1 尾水流量与洪水余量关系图

1 或表 6-3 根据尾水流量查出对应的洪水余量, 供决策。若后续仍有降雨时, 后续降雨会造成洪水余量增大。后续降雨形成的洪水余量  $W$  可用式 (6-1) 计算。

$$W = 1000 \sum_{i=1}^5 \rho_i (I_i - I_{i0}) F_i \quad (6-1)$$

式中  $\rho_i$ ——第  $i$  场后续降雨的径流系数;

$I_{i0}$ ——第  $i$  场后续降雨的初始损失, mm;

$F_i$ ——第  $i$  场后续降雨的控制面积, km<sup>2</sup>, 具体数据见表 6-4;

$I_i$ ——第  $i$  场后续降雨深, mm。

经多场洪水综合分析计算,  $\rho_i = \rho = 0.6$ ,  $I_{i0} = I_0 = 5\text{mm}$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ )。因此, 该水库后续降雨形成的洪水余量 (指直接汇集到门楼水库的径流总量) 的计算公式为

表 6-4 各雨量站控制面积变化表

控制面积 (km <sup>2</sup> ) 测站 综合净雨深 (mm)	门楼	庙后	臧格庄	庵里	大庄头
≤100	118.47	164.60	300.74	141.76	56.95
100~160	118.47	181.23	300.74	141.76	68.97
160~260	118.47	207.47	341.39	151.56	86.16
>260	118.47	215.40	355.41	301.56	86.16

注 表中综合净雨深包括两部分：一是后续降雨深；二是中型和小（1）型水库后续降雨发生之前的蓄水量折合的净雨深。

$$W = 600 \sum_{i=1}^5 (I_i - 5) F_i \quad (6-2)$$

在实际应用时，根据各测站的实测后续降雨  $I_i$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ ) 和各中小水库前期蓄水量，求出综合净雨深，由综合净雨深查表 6-4 可求得各站相应控制面积  $F_i$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ )，将  $F_i$ 、 $I_i$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ ) 代入式 (6-2) 即可求得后续降雨形成的洪水余量，再加上由表 6-3（或图 6-1）查出的洪水余量即可求得总洪水余量。

### 第三节 预蓄量的分析研究

上节讨论了尾水流量与洪水余量之间的关系，本节在上节分析的基础上对预蓄的可行性与预蓄量进行分析研究。

#### 一、洪水传播时间分析

通过对本流域的实测降雨径流资料进行分析，可得出如下初

步结论：①从洪水起涨到洪峰出现一般约需 12h 左右；②从流域平均降雨强度最大历时到洪峰出现一般约需 6h 左右。

## 二、预泄量分析

预泄量的大小主要取决于预泄时间。预泄时间可按照以下几种情况确定：

1) 预泄起始时刻为天气预报发布时刻，终止时刻为入库流量等于下游安全泄量的时刻。

2) 预泄起始时刻为水文预报发布时刻，终止时刻为入库流量等于下游安全泄量的时刻。

3) 预泄起始时刻为入库洪水开始起涨时刻，终止时刻为入库流量等于下游安全泄量的时刻。

预泄起始时刻与终止时刻之时间差值即为总预泄时间。对于上述三种情况，从总预泄时间长短而言，第一种情况下的总预泄时间最长，第三种情况下的总预泄时间最短，第二种情况下的总预泄时间介于第一种情况与第三种情况之间。从预泄的可靠性而言，第三种情况最为可靠，一般不会造成盲目泄流，因为泄流的决策是在洪水已发生的前提下做出的；第一种情况下的可靠性主要取决于天气预报的精度，如果天气预报不准确则可造成盲目泄流，浪费宝贵的水资源，总体而言第一种情况的可靠性最差；第二种情况同样介于第一和第三种情况之间，它的可靠性主要取决于流域水文预报的精度。

考虑到目前的预报水平与精度（包括天气预报和水文预报）和门楼水库的实际情况，特别是从确保工程安全的角度出发，本次预泄时间采用最保守的结果即第三种方法的计算结果。



下面说明预泄量的计算方法。

因为实际洪水过程未知，无法推求预泄时间与预泄量，本次应用设计洪水过程推求预泄量。其结果可作为实际应用时的重要参考。

不同频率的设计洪水过程见第四章，根据表 4-1 可求得不同频率洪水的预泄量，见表 6-5。

表 6-5 不同频率入库洪水可预泄量表

入库洪水频率 (%)	5	2	1	$0.1 \times 1.06$
可预泄量 (万 $m^3$ )	2818	2625	2382	2090

由表 6-5 可见，若流域发生了 20 年一遇的洪水，在该洪水入库流量小于  $1200m^3/s$  之前，可安全下泄 2800 万  $m^3$  以上；若流域发生了 50 年一遇的洪水，在该洪水入库流量小于  $1200m^3/s$  之前，可安全下泄 2600 万  $m^3$  以上；即使流域发生了千年一遇的洪水，在该洪水入库流量小于  $1200m^3/s$  之前，也可安全下泄 2000 多万  $m^3$ 。因此，在汛期水库预蓄部分水量还是完全可行的。

在实际操作时，可根据事先确定好的计划预蓄水量，由上节反推出相应的尾水流量，确定何时关闸蓄水。

#### 第四节 降水量序列展延模型研究



对于月（旬或指定时段，以下同）最大一日（三日、七日等，以下同）降水量序列而言，除了序列自身存在有相依性之

外,序列之间也存在有相依性。因此,在对其进行展延时,需同时考虑两方面的影响,而不能采用单变量序列的展延方法对每个序列单独进行展延。展延时应采用既能考虑序列自身相依关系,又能反映序列间相依关系影响的模型对各序列进行同时展延。对单变量序列展延问题,已有一套较为成熟的分析方法;但对多变量序列而言,由于问题的复杂性,还有待于进一步研究,特别是对于月最大一日降水量序列而言,仍属首次应用,更应该做一些研究工作。本书以汛期月最大一日降水量序列生成为例加以说明。目前可供选用的主要模型有:相关解集模型、正则展开模型、正交变换法、多变量模型和季节性自回归模型等。下面对各模型分别进行研究,以确定适合月最大一日降水量序列的展延方法。

## 一、相关解集模型

### 1. 模型结构

设  $Y_{t,i}$  表示中心化的月最大一日降水量序列,可用相关解集模型描述为

$$Y_{t,i} = a_i X_t + b_{i,1} \epsilon_{t,1} + b_{i,2} \epsilon_{t,2} + \cdots + b_{i,m} \epsilon_{t,m} \\ t = 1, 2, \cdots, n; i = 1, 2, \cdots, m \quad (6-3)$$

式中  $n$ ——实测降水量序列的长度,  $a_i$ ;

$m$ ——分期数;

$X_t$ ——中心化的汛期降水量序列;

$a_i$ ——反映汛期降水量序列与月降水量序列之间平均关系的参数;

$b_{i,j}$ ——反映随机因素和汛期降水量序列之间综合影响的



参数;

$\epsilon_t$ ——均值为零、方差为 1 的独立随机变量。

$$\text{令} \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mm} \end{bmatrix} \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_m \end{bmatrix}$$

则式 (6-3) 可写成

$$y = AX + B\epsilon \quad (6-4)$$

## 2. 模型参数确定

对式 (6-4) 中参数矩阵  $A$ 、 $B$ ，可用下式推求

$$A = S_{yx} S_{xx}^{-1}$$

$$BB^T = S_{yy} - S_{yx} S_{xx}^{-1} S_{xy} \quad (6-5)$$

满足式 (6-5) 的  $B$  很多，为求解方便常假定  $B$  为下三角矩阵。式 (6-5) 中， $S_{xx}$  表示汛期降水量序列的方差； $S_{xy}$ 、 $S_{yx}$  分别表示汛期降水量序列和各月降水量序列之间的协方差，二者具有同样的性质，前者为行阵，后者为列阵，且  $S_{xy}^T = S_{yx}$ ； $S_{yy}$  是一个对称矩阵，它表示各月降水量序列本身的变化程度和各月降水量序列之间的相关关系。具体表达式为

$$S_{xx} = E(XX^T)$$

$$\begin{aligned}
 S_{xy} &= E(XY^T) = E(X, y_1), E(X, y_2), \dots, E(X, y_m) \\
 S_{yx} &= E(YX^T) = \begin{bmatrix} E(y_1, X) \\ E(y_2, X) \\ \vdots \\ E(y_m, X) \end{bmatrix} \\
 S_{yy} &= E(YY^T) = \begin{bmatrix} E(y_1y_1) & E(y_1y_2) & \cdots & E(y_1y_m) \\ E(y_2y_1) & E(y_2y_2) & \cdots & E(y_2y_m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E(y_my_1) & E(y_my_2) & \cdots & E(y_my_m) \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{6-6}$$

在式 (6-6) 中,  $E(y_1y_1)$  为第一个月 (此处为 6 月) 降水量序列的方差;  $E(y_1y_2)$  为第一个月 (6 月) 与第二个月 (7 月) 降水量序列之间的协方差; 其它符号意义类推, 不再详述, 其值可由实测样本序列求得。

### 3. 利用相关解集模型展延偏态序列的步骤

第一步, 分别将汛期实测降水量序列和各月实测降水量序列转换为中心化序列。

第二步, 汛期总降水量序列的展延。

第三步, 偏态系数矩阵  $C_e$  的推求

$$\begin{aligned}
 C_e &= G^{-1}H \tag{6-7} \\
 \text{其中 } G &= \begin{bmatrix} b_{11}^3 & b_{12}^3 & \cdots & b_{1m}^3 \\ b_{21}^3 & b_{22}^3 & \cdots & b_{2m}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{m1}^3 & b_{m2}^3 & \cdots & b_{mm}^3 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} m_3^{(1)} - d_3^{(1)} \\ m_3^{(2)} - d_3^{(2)} \\ \vdots \\ m_3^{(m)} - d_3^{(m)} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

在  $G$ 、 $H$  阵中,  $m_3^{(i)} = E[(y_i)^3]$ ,  $d_3^{(i)} = a_i^3 E[(y_i)^3]$ 。利用实测降水量序列资料可求得  $G$ 、 $H$  阵中的元素, 进而由式(6-7)可求得  $C_s$ 。

第四步, 标准正态分布纯随机数  $\xi_i$  转换为皮尔逊Ⅲ型分布纯随机数  $\phi_i$ 。

第五步, 序列的生成。利用公式  $Y = AX + B\phi$  进行序列的生成。

第六步, 序列的还原。将中心化序列  $Y_i$  还原成原序列。

第七步, 展延序列的检验。对展延序列的均值、方差和偏态系数进行检验, 看其是否保持了原样本序列的统计特性。

第八步, 利用第五步生成的月降水量中心化展延序列, 重复第三步至第七步, 可得旬降水量展延序列, 不再详述(此时, 月相当于上面的汛期; 旬相当于上面的月)。

#### 4. 汛期降水量序列的展延

汛期降水量序列的展延采用  $AR(1)$  模型, 并将展延序列转换为中心化序列, 所需基本资料如表 6-6, 展延结果如表 6-7。

表 6-6 汛期实测降水量序列及其统计参数

年 份	降水量	年 份	降水量	年 份	降水量
1964	917.8	1965	615.9	1966	535.2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1999	342.6	2000	330.1	2001	625.7
$\bar{x}$	494.3	S	161.57	$C_s$	0.44

表 6-7 汛期降水量展延序列及其统计参数

年 数	降水量	年 数	降水量	年 数	降水量
1	535.1	2	712.8	3	635.2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9998	321.5	9999	330.8	10000	563.1
$\bar{x}$	494.3	S	161.40	$C_s$	0.43

### 5. 月降水量序列的展延

所需基本资料如表 6-8, 展延结果如表 6-9。

表 6-8 月实测降水量序列及其统计参数

年 份	6 月	7 月	8 月	9 月
1964	105.0	380.0	293.9	138.9
1965	42.1	377.2	195.3	1.3
1966	120.9	203.8	135.9	74.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1999	85.7	115.7	48.4	92.8
2000	38.5	115.8	131.0	44.8
2001	188.6	293.1	117.0	27.0
$\bar{x}$	78.6	173.5	180.6	61.6
S	52.04	87.84	102.35	45.51
$C_s$	0.95	1.76	0.87	0.91

表 6-9 月降水量展延序列的统计参数(相关解集模型)

参 数 \ 月 份	6	7	8	9
$x$	78.968	171.71	182.13	61.529
$S$	52.204	88.667	103.21	45.574
$C_i$	0.58089	0.60619	0.59043	0.67769

## 6. 分析讨论

同汛期月最大一日降水量序列生成方法,可对汛期各月中不同旬的最大一日降水量序列进行生成,生成结果不再列出。比较实测序列和生成序列可见,对月最大一日降水量序列,统计参数保持较好;对旬最大一日降水量序列,统计参数则保持较差。

## 二、正则展开模型

### 1. 正则展开模型简介

正则展开模型是以独立变量的线性组合来表征相依随机序列,模型结构可描述为

$$y_i = \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} \epsilon_j + \epsilon_i \quad i=1,2,\dots,p \quad (6-8)$$

式中  $y_i$ ——中心化的随机变量;

$\epsilon_i$ ——均值为零、方差为 1 的独立随机变量;

$p$ ——分期数。

$$\text{令 } Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & & & 0 \\ b_{21} & b_{22} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ b_{p1} & b_{p2} & \cdots & b_{pp} \end{bmatrix}$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_p \end{bmatrix}$$

则式 (6-8) 变为

$$Y = B\epsilon \quad (6-9)$$

其中  $b_{11} = b_{22} = \cdots = b_{pp} = 1$ , 即  $B$  是对角元素为 1 的下三角矩阵。

2. 模型参数矩阵  $B$  的确定

$$b_{ij} = s_{ij} / s_{\epsilon j} \quad j = 1$$

$$b_{ij} = (s_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} b_{ik} b_{jk} s_{\epsilon k}) / s_{\epsilon j} \quad j = 2, 3, \cdots, (i-1) \quad (6-10)$$

在式 (6-10) 中,  $s_{\epsilon i} = s_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} b_{ik}^2 s_{\epsilon k}$ ,  $s_{ij}$  为  $y_i$  和  $y_j$  的协方差,  $s_{\epsilon j}$  为  $\epsilon_j$  的方差。

以  $p=4$  为例(即汛期划分为四个月), 其表达式为

$$b_{11} = b_{22} = b_{33} = b_{44} = 1$$

$$s_{\epsilon 1} = s_{11} \quad b_{21} = s_{21} / s_{\epsilon 1}$$

$$b_{31} = s_{31} / s_{\epsilon 1} \quad b_{41} = s_{41} / s_{\epsilon 1}$$

$$s_{\epsilon 2} = s_{22} - b_{21}^2 s_{\epsilon 1}$$

$$b_{32} = (s_{32} - b_{31} b_{21} s_{\epsilon 1}) / s_{\epsilon 2}$$

$$b_{42} = (s_{42} - b_{41} b_{21} s_{\epsilon 1}) / s_{\epsilon 2}$$

$$s_{\epsilon 3} = s_{33} - (b_{31}^2 s_{\epsilon 1} + b_{32}^2 s_{\epsilon 2})$$

$$b_{43} = (s_{43} - b_{41} b_{31} s_{\epsilon 1} + b_{42} b_{32} s_{\epsilon 2}) / s_{\epsilon 3}$$

$$s_{\epsilon 4} = s_{44} - (b_{41}^2 s_{\epsilon 1} + b_{42}^2 s_{\epsilon 2} + b_{43}^2 s_{\epsilon 3})$$



### 3. 采用随机项变换法进行偏态序列的模拟

$$C_{\epsilon,i} = E(\epsilon_i^3) / (s_{\epsilon,i})^{1.5} \quad (6-11)$$

式中

$$E(\epsilon_i^3) = E(y_i^3) \quad i=1$$

$$E(\epsilon_i^3) = E(y_i^3) - \sum_{j=1}^{i-1} b_{i,j} E(\epsilon_j^3) \quad i \geq 2$$

利用式(6-11)求得独立随机变量偏态系数,然后将标准正态分布纯随机数  $\xi_i$  转换为皮尔逊Ⅲ型分布纯随机数  $\phi_i$ 。

### 4. 月最大一日降水量序列的展延

展延过程不再详述,展延序列的统计参数见表6-10。

表 6-10 月最大一日降水量展延序列的  
统计参数(正则展开模型)

参 数 \ 月 份	6	7	8	9
$\bar{x}$	36.356	51.156	64.780	24.854
S	1.006	47.215	8.501	8.198
$C_s$	0.845	-2.308	-2.392	-2.444
$r_1$	0.006	0.001	-0.012	0.012

### 5. 分析讨论

比较实测序列和展延序列的统计参数可见,二者均值保持较好,但均方差、偏态系数、一阶自相关系数很不稳定,有时相差甚远。

## 三、正交变换法

### 1. 正交变换法简介

正交变换法是把空间(或时间)上相依的各序列,变换成相互

独立的新序列,然后用现行单变量模型分别对各个新序列建立模型并进行模拟,最后通过反变换得到所希望的模拟序列。此法概念清楚,方法简单,参数较少,并能较好的反映均值、方差和零阶互相关系数等统计特性。由于各序列独立模拟,在考虑偏态特性方面还具有一定的灵活性,但该法的缺点是不能考虑各水文变量非零时移的互相关特性。

设  $X_t^{(i)}$  是均值为 0、方差为 1 的第  $i$  个水文变量的标准化序列,  $t = 1, 2, \dots, n$ 。  $n$  表示序列长度,单位为年;  $i = 1, 2, \dots, m$ 。  $m$  表示序列个数。  $X_t^{(i)}$  与  $X_t^{(j)}$  之间相互依赖,其相关关系可描述为

$$M_0 = E[XX^T]$$

式中  $X = [X_t^{(1)}, X_t^{(2)}, \dots, X_t^{(m)}]$ ,  $M_0$  表示各水文变量滞时为 0 的互相关矩阵。一般来讲  $M_0$  是非负定的,可将其作如下奇异值分解

$$M_0 = \Phi D \Phi^T$$

其中  $\Phi$  为各水文变量的正交矩阵(即  $\Phi\Phi^T = I$ ),  $D$  为相应的对角矩阵。

若令线性变换

$$Z = \Phi^T X$$

则相依序列  $X$  变换成相互独立的  $Z$  序列。对相互独立的  $Z$  序列可用现行单变量模型分别进行模拟,然后利用

$$X = \Phi Z$$

进行反变换即得到还原的模拟序列。在对新序列进行模拟时,若  $Z$  为正态序列,还原后的  $X$  序列亦为正态分布;若  $Z$  为偏态序列,还原后的  $X$  序列亦为偏态分布。

## 2. 月最大一日降水量序列的展延

展延过程不再详述,展延序列的统计参数见表 6-11。

表 6-11 月最大一日降水展延序列的统计参数(正交变换法)

参 数 \ 月 份	6	7	8	9
$\bar{x}$	36.178	52.609	66.506	25.762
S	25.108	25.721	41.915	18.046
$C_s$	0.592	0.973	0.744	0.618
$r_1$	-0.112	0.133	-0.001	-0.141

## 3. 分析讨论

比较实测序列和展延序列的统计参数可见,二者均值、均方差、偏态系数、一阶自相关系数都保持较好。

## 四、多变量 AR(1)模型

## 1. 月最大一日降水序列的展延

多变量 AR(1)模型见第五章第二节,月最大一日展延序列的统计参数见表 6-12。

表 6-12 月最大一日降水展延序列的统计参数(多变量 AR(1)模型)

参 数 \ 月 份	6	7	8	9
$\bar{x}$	36.514	52.220	65.756	26.117
S	25.405	25.642	42.020	18.052
$C_s$	0.840	1.015	0.980	0.780
$r_1$	-0.097	0.069	0.007	-0.159

## 2. 分析讨论

比较实测序列和展延序列的统计参数可见,二者均值、均方差、偏态系数、一阶自相关系数都保持较好。

## 五、季节性自回归模型

季节性自回归模型实际上是以年为周期的变参数自回归模型,其参数以年为周期,循环变化。设  $Z_i$  表示消除均值、方差季节变化影响后的标准化变量, $i$  代表年内季节数(以月为单位时  $i = 12$ ,此处不同于我们通常所说的四季,下同),对一阶季节性自回归模型,其表达式如下:

$$Z_i = \Phi_1 Z_{i-1} + \epsilon_i$$

即年内第  $i$  季节变量只依赖于第  $i-1$  季节变量。 $\Phi_1$  为季节性一阶自回归系数; $\epsilon_i$  是均值为零、方差为 1 的独立随机变量。

对汛期月降水量过程,由于当年的汛末月降水过程与下一年的汛初月降水过程不自然衔接,因此不能直接采用季节性自回归模型对汛期月降水过程进行展延。在建立模型时,需对原始序列做某些特殊处理,解决汛初、末月降水过程不自然衔接现象,因而增加了问题的复杂性,本次暂不考虑季节性自回归模型。

## 六、结论

月最大三日降水量序列、旬最大一日降水量序列、旬最大三日降水量序列的生成结果不再详述,其结论与月最大一日降水量序列所得结论一致。由此可见,正交变换法和多变量 AR(1)模型比较适合月(旬等)降水量序列的展延。进一步对正交变换法和多变量 AR(1)模型进行比较发现,在保持实测序列均值、均方差方面



二者接近,但在保持实测序列偏态系数、一阶自相关系数方面后者优于前者,这是由于前者仅考虑各水文变量零时移的互相关特性,后者不仅考虑了各水文变量零时移的互相关特性,也考虑了其非零时移的互相关特性。因此,建议采用多变量  $AR(1)$  模型对分期降水量序列进行展延。

[ G e n e r a l   I n f o r m a t i o n ]

书名 = 水库汛限水位计算理论与方法

作者 =

页数 = 1 8 0

S S 号 = 1 1 2 9 0 7 0 4

出版日期 =