

'97 卷

大连理工大学教授学术丛书

工程水文水资源系统
模糊集分析理论与实践

陈守煜 著

THE FUZZY SETS
THEORY AND
PRACTICE FOR
ENGINEERING
HYDROLOGY
AND WATER
RESOURCES SYSTEM

大连理工大学出版社

大连理工大学教授学术丛书 '97 卷

工程水文水资源系统 模糊集分析理论与实践

陈守煜 著

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程水文水资源系统模糊集分析理论与实践/陈守煜著. —大连:大连理工大学出版社, 1998. 6

(大连理工大学教授学术丛书'97 卷)

ISBN 7-5611-1553-9

I. 工… I. 陈… II. ①水文分析-模糊集理论 ②水文预报
IV. P333

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 31812 号

大连理工大学出版社出版发行

(大连市凌水河 邮政编码 116024)

大连业发印刷厂印刷

开本: 850×1168 毫米 1/32 字数: 212 千字 印张: 8.25 插页: 4

印数: 1—3000 册

1998 年 6 月第 1 版

1998 年 6 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘晓晶

责任校对: 王 董

封面设计: 孙宝福

版式设计: 石 佳

定价: 15.00 元

前 言

水文现象既是一种自然现象,又是人类生存不可替代的水资源之源泉。它具有确定性与非确定性两个基本方面。水文现象的确定性是指影响现象发生、发展与变化的诸多复杂因子的综合物理过程。水文现象的非确定性主要是指现象发生的随机性及对现象发展与变化的中介过程划分或识别中的模糊性。过去,水文现象的非确定性仅被理解为现象发生的随机性,显然是不全面的。事实上,年径流现象的丰与枯,水体质量的清洁与污染,流域自然地理条件的相似与相异,河流的汛期与非汛期,暴雨与特大暴雨,干旱与湿润,洪水过程线的典型与非典型,水汽供应充分与不充分等等都找不到明确的划分或识别的界面。水文现象与概念从共维差异的一方到另一方,中间经历了一个连续过渡过程,这是差异在共维条件下的中介过渡性,由中介过渡而产生划分或识别上的非确定性就是水文现象与概念的模糊性,是一种客观存在着的基本事实。因此在工程水文与水资源系统分析中,只考虑确定性与随机非确定性,常常还不能完整地表述水文水资源系统的特征。为此,笔者分别于1987年10月在我国西安召开的全国水文情报网网员代表大会、1990年9月在波兰华沙召开的国际水文学与水资源非确定性新概念学术会议上作了建立新学科——模糊水文学及其研究方法论的学术报告。1990年、1992年相继发表了专著《模糊水文学与水资源系统模糊优化原理》、《水文水资源系统模糊识别理论》。本书是这一工作的继续与深入,是系统论述工程水文水资源系统模糊集分析理论与应用的又一本专著,笔者相信它将有助于促进水文水资源学科的进一步发展。

工程水文水资源系统模糊集分析是模糊水文学的拓宽,从发展到完善要经历较长的时间,需经实践、认识、再实践、再认识……的反复过程。但是新学科的建立,则是水文水资源学科发展到一定阶段的客观需要。它有着深刻的辩证唯物论哲学基础、时代特点与背景。在世界水资源问题十分突出的今天,科学家们预言,继世界石油危机后,水资源危机将成为 21 世纪世界所面临的重大危机。因此,发展工程水文水资源系统模糊集分析新学科,将它进一步用于实践,是笔者撰写本书的宗旨。

本书得到水资源教研室王本德教授、周惠成教授、博士生聂相田、张文国等的支持与协助,借本书出版之际,表示谢意。

陈守煜

1998 年 5 月

于大连理工大学

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 水文水资源系统模糊集分析科学意义与基础	4
一、水文系统模糊集分析的科学意义	4
二、水文系统研究的方法论	8
三、水资源系统模糊集分析的科学与现实意义	9
四、水资源系统分析的研究方法论	12
五、模糊集理论的基础——隶属度、隶属函数定义的 拓展	13
第二章 汛期模糊集分析	19
一、概 述	19
二、北方流域降雨成因与时程分析	19
三、汛期模糊集分析	23
四、汛期绝对隶属函数的应用	56
第三章 中长期水文预报综合分析理论、模型与方法	59
一、概 述	59
二、以成因分析为基础筛选预报因子	59
三、中长期水文预报模糊聚类理论与模型	60
四、模糊概念在分级条件下最大隶属原则的 不适用性	66
五、级别(或类别)特征值	67
六、预报识别模型	71
七、实 例	73

第四章 相似流域选择模糊集分析模型	79
一、概 述	79
二、相似流域选择模糊集计算模型与方法	79
三、相似流域选择实例	82
第五章 开放的复杂水资源巨系统分析技术	88
一、开放的复杂水资源巨系统的特点	88
二、人的经验知识量化原理与综合决策模型	89
三、实 例	97
第六章 水资源可持续利用评价量化理论、模型与方法	101
一、概 述	101
二、水资源可持续利用程度与地区水资源承载能力的 联系	103
三、水资源持续利用模糊模式识别模型	104
四、水资源持续利用程度模糊模式识别评价实例	109
第七章 半结构性多目标模糊优选理论及在水资源系统中 的应用	117
一、概 述	117
二、定量目标的相对优属度公式	117
三、半结构性决策系统目标相对优属度矩阵	121
四、半结构性决策系统模糊优选理论与模型	122
五、多层系统模糊优选	125
六、算 例	126
七、结 论	133
第八章 模糊模式识别神经网络预测模型及在水文中长期预 报中的应用	135
一、概 述	135
二、模糊模式识别神经网络预报模型	135
三、提出的模糊模式识别神经网络预测系统权重调整	

BP 模型	138
四、模糊模式识别神经网络预测系统权重调整进化单纯形法	141
五、预报实例	144
六、结 论	149
第九章 径流长期预报模糊推理模式	150
一、概 述	150
二、径流(输出)、径流的前期影响因子(输入)的模糊集合描述与模糊控制径流预报模式	150
三、模糊控制径流预报输出信息的特征展开模糊推理法	152
四、径流长期预报实例——大伙房水库汛期入库径流长期预报方法的模糊推理模式	153
第十章 模糊非线性规划优选梯级水电站工作深度	164
一、概 述	164
二、梯级水电站工作深度优选的模糊非线性规划模型	164
三、例 题	171
第十一章 水体质量模糊模式识别综合评价	175
一、概 述	175
二、水体质量模糊模式识别综合评价理论与模型	176
三、综合评价实例	182
第十二章 湖泊与水库富营养化评价模糊模式	188
一、概 述	188
二、我国湖库富营养化评价指标权重的确定	189
三、湖库富营养化指标综合权重矩阵	190
四、湖库富营养化综合评价模型	193
五、应用实例	193
六、结 论	199

第十三章 综合利用水库洪水调度决策模糊优选原理与应用	
.....	201
一、概 述	201
二、消除两种距离参数影响的模糊优选模型	201
三、水库洪水调度的主要目标函数与约束条件	206
四、水库调洪计算数值与解析解法	208
五、应用实例	217
第十四章 多目标模糊优选动态规划理论及在梯级水库洪水调度决策中的应用	221
.....	
一、概 述	221
二、多目标模糊优选动态规划理论与模型	221
三、应用实例	225
附录	236
附录一 符合我国语言习惯的决策思维模式	236
附录二 水工建筑物设计洪水重现期等公式的推导	241

绪 论

自然界一切物质系统都处于不断运动、永恒的产生和消灭的演化过程中。演化是自然界物质系统最普遍的现象，是自然界物质系统运动的普遍规律。因此，自然界中一切旧的物质系统的毁灭和代之以新的物质系统是不可避免的。根据现代科学提供的大量材料，毁灭后的物质系统的重新产生，都必须经过一个过渡阶段，在这一过渡阶段中形成过渡性或中介现象的系统形态，它是自然界的物质系统演化过程中到处盛行的真实过程的反映。在物质系统发展过程中，中介表现为转化的中间环节是普遍存在的。物质系统之间存在的这种过渡形态或中介现象，构成物质系统演化的前后相继、持续不断的发展过程。

恩格斯在《自然辩证法》中对自然系统演化过程中出现的这种过渡状态作了深刻的论述。他指出：“一切差异都在中间阶段融合，一切对立都经过中间环节而互相过渡，对自然观的这种发展阶段来说，旧的形而上学的思维方法就不再够了。辩证法不知道什么绝对分明的和固定的不变的界限，不知道什么无条件的普遍有效的‘非此即彼！’，它使固定的形而上学的差异互相过渡，除了‘非此即彼！’，又在适当的地方承认‘亦此亦彼！’，并且使对立互为中介”^[1]。

列宁在《哲学笔记》中提出大量的中介问题，表明每种现象、事物的发展、变化过程，都存在着中介。因此，乌杰在《系统辩证论纲要》中指出：中介是客观事物之间联系的环节，是普遍的、客观存在的。在客观事物发展过程中，中介表现为转化或发展的中间环节。认识中介的存在、中介的地位和作用，有助于全面理解事物内在层次之间的复杂联系，有助于克服在对立统一规律上的简单化的二

极倾向。^[2]

我国古代易学中同样充满着阴阳对立与转化的中介辩证思维^[3]。

这里应该强调指出:所谓“非此即彼”是指在一定条件下新旧系统的界限是分明的、确定的,必须从系统的确定性来把握系统。但在物质系统演化过程中又存在着中间阶段或过渡状态,在这里新旧系统之间的界限和差异是不确定的、模糊的。按照辩证法的思维方法,要全面地把握系统,从发展中把握系统,除了承认“非此即彼”外,还必须在适当的地方承认“亦此亦彼”,承认它是这个系统又不是这个系统^[4]。

现象具有确定性与非确定性两个基本方面,经典数学(如微分方程等)是表达现象确定性方面强有力的数学工具。但是在一个很长的时期内,现象的非确定性仅仅被理解为随机性的一个侧面。对于现象的模糊性,由于长期受普通集合论只能描述“非此即彼”、“非0即1”二值逻辑框架的束缚,而被长期地忽视着。甚至有时这种忽视很不符合现象的实际情况。对现象模糊性的忽视,在哲学上表现为对物质系统在演化过程中所呈现的中介过渡性或中介性的忽视^[5]。

模糊集合概念的建立,使人们对于现象非确定性的理解有了拓广与深化,现象的非确定性不仅有随机性,而且还有模糊性,且两者有着本质上的区别。随机性是因果律破缺所造成的一种非确定性,随机现象(或事件)本身有着明确的含义,仅仅是因为条件不充分,使得条件与现象之间未能出现决定性的因果关系,因而在现象的出现与否上表现出非确定性。模糊性则是排中律破缺所造成的一种非确定性,在那里概念本身没有明确的外延,一个对象是否符合这个概念难以确定,是由于概念外延的模糊而造成识别或划分上的非确定性。因此笔者认为:模糊性作为一种基本真实而客观地存在着。如果说,在过去的水文研究中,由于模糊数学尚未建立,人们忽视水文现象识别的模糊性,而仅考虑现象的确定性与随机

非确定性方面。那么,在今天的水文工作中,特别是在那些模糊性不容忽略的研究领域,忽视模糊性的存在,将是研究方法论方面的一种欠缺^[6,7]。

当今,由于系统科学的发展,系统理论与方法已渗透到各个学科领域,经典优化技术是重要的基本的方法。但是水资源系统常常是一个多因素、多层次、多目标、多功能、多阶段的复杂巨系统。经典的数学优化理论与技术很难胜任。因此,需要寻求一种解决系统复杂化与传统优化技术间难以适应的矛盾的新途径。由于优与劣概念之间,在识别过程中并不存在绝对分明的界限,具有中介过渡性,因而在水资源系统分析中引入中介性,突破不考虑中介性研究方法论的束缚,建立水资源系统的决策分析理论的新体系,给出求解水资源系统优化的新路^[8,9],因此,水文水资源系统模糊性概念的建立与运用,在科研方法论与实际应用上有着十分重要的意义^[10]。

参 考 文 献

- 1 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1971
- 2 乌杰. 系统辩证论纲要. 系统辩证学学报,1993(1)
- 3 陈守煜. 易图的系统辩证思维剖析. 系统辩证学学报,1997(4)
- 4 中国科技大学等合编. 自然辩证法原理. 长沙:湖南教育出版社,1984
- 5 陈守煜,赵瑛琪. 模糊数学的建立与科研基本方法论. 新学科研究. 北京:中国科学技术出版社,1993
- 6 陈守煜. 模糊水文学. 大连理工大学学报,1988(1)
- 7 陈守煜. 模糊水文学的建立与前景. 大自然探索,1992(1)
- 8 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用. 大连:大连理工大学出版社,1994
- 9 陈守煜. 工程模糊集理论与应用. 北京:国防工业出版社,1998
- 10 陈守煜. 模糊水文学与水资源系统模糊优化原理. 大连:大连理工大学出版社,1990

第一章 水文水资源系统模糊集 分析科学意义与基础

一、水文系统模糊集分析的科学意义

在天气系统中,两个温度、湿度特性不同的气团在地球表层相遇,其接触处由于气团性质不同形成一个过渡带或中介地带,因过渡带两侧的温度、湿度、气压等气象要素的明显差异,其间常伴有暴雨、大风等异常天气现象的产生、变化与发展。气团间的中介过渡地带,是天气变化的渊源,是水文系统赖以存在、发展、变化的基础。

水文系统既有受控于流域的水文气象、自然地理、植被覆盖等确定性因素影响的主导方面,又具有不确定性,主要是随机性与模糊性的另一方面。所谓模糊性是指客观现象、概念处于共维条件下的差异,在中介过渡阶段或状态所呈现的亦此亦彼性。模糊现象、概念在水文系统中大量存在,诸如:江河的汛期与非汛期,年径流量的丰与枯,水质的清洁与污染,流域的相似与相异,径流、暴雨、洪水过程的典型与不典型,水位流量关系的稳定与不稳定等均属于模糊现象、模糊概念的范畴。因此,经典水文学考虑水文现象、水文概念的确定性分析与随机不确定性分析,忽略或不考虑模糊不确定性分析,常不能完整地表述水文系统的特征。要完善地从发展中表达水文系统,只承认“非此即彼”还不够,还应该适当的时间与空间承认“亦此亦彼”,否则,将是研究方法论上的一个欠缺。所以水文系统模糊集分析是一个进步,具有重要的科学意义。下面以水文系统中的汛期分析为例,来说明笔者这一论点。

长期的水库调度实践使人们认识到确保水库及其下游的防洪安全,又要不失时机地多蓄水保证兴利用水,一个重要的课题是研

究汛期的变化规律。对于我国暴雨特征有明显季节性差异且水库防洪与兴利之间矛盾突出的地区,进行这一研究尤为重要。研究的目的是可归结为:在确保水库及其下游防护地区防洪安全的条件下,寻求主汛期后转入中介过渡阶段,逐步提高水库汛期限制水位的动态规律,为合理地运用水库的共用库容提供科学依据。

国内外对汛期的传统描述是根据水库所在流域的水文气象条件,历年暴雨、洪水等资料的分析,硬性规定汛期的起止时间。这种“要么是汛期,要么不是汛期”绝不模棱两可的汛期表示方式,是以非此即彼的普通集合论为理论基础^[1]。设论域 T 为一年内的时间(以天作为单位), t 为 T 中的任意元素,汛期 A 是论域 T 中的一个普通子集。若 $t \in T$, 则

$$x_A(t) = \begin{cases} 1 & t \in A \\ 0 & t \notin A \end{cases} \quad (1-1)$$

$x_A(t)$ 为元素 t 关于汛期 A 的特征函数。

设 V_t 为时间 t 水库所需要的防洪库容, V_F 为满足校核(或设计)标准条件下的防洪库容。根据普通集合论的汛期描述方式,应有

$$V_t = \begin{cases} V_F & t \in A \\ 0 & t \notin A \end{cases} \quad (1-2)$$

由式(1-1)、式(1-2)可见,特征函数 $x_A(t)$ 实质上是作为权重隐含在式(1-2)中,即

$$V_t = x_A(t)V_F \quad (1-3)$$

在这一理论指导下的汛期描述方式,是很长时期内水库洪水设计的基础。例如建国后修建的官厅、大伙房、海龙、清河、岳城、丹江口和碧流河等水库皆在确定的汛期起止时间取洪水样本进行频率分析,求得全汛期设计洪水。调洪计算求出的水库防洪限制水位,调洪方式及规则,要求调度人员在全汛期必须严格遵守,这种非此即彼的汛期描述方式,严重地影响了水库兴利效益的发挥。岳城水库

1968 年建成,到 1979 年总运行 12 年,只有 $1/3$ 的年份汛期后蓄满兴利库容。大伙房水库 1960 年来水 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 是多年平均径流量的 2 倍,当年弃水 $14 \times 10^8 \text{ m}^3$,汛后蓄水量比兴利库容少 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此,用普通集合论为理论基础的硬性规定汛期起止时间的描述方式,是造成我国部分地区,尤其是北方缺水地区水库汛期不敢蓄水,汛期过后又蓄不上水,共用库容很难合理运用,有限、紧缺的水资源未能有效利用的一个重要原因。为了改变这种状态,不少实际调度与研究人员进行汛期变化规律的研究,通过分析暴雨洪水形成的天气系统和环流形势的变化规律等特性,研究汛期分期的可能性、分期的方法和原则。根据暴雨洪水出现的随机性进行概率统计分析。将全汛期细分为 3 个时期:汛前期、主汛期、汛末期,分别确定分期设计洪水。以不同的调洪规则与调洪方式,进行水库调洪计算得到水库分期防洪限制水位。这种汛期描述方法比传统模式有了很大进步,但它仍以普通集合论为基础。各期防洪限制水位为阶梯变化,运行中很难突然抬高或降低限制水位。为此,有的水库将阶梯状防洪限制水位用斜线表示,实质上是在逼近汛期变化的连续性和中介性^[2]。

为了在理论上完善对汛期的描述,笔者在文献 3 中明确指出:汛期的边界不清晰,是客观存在着的模糊现象,应该用模糊集理论加以分析。事实上,河流由非汛期逐步过渡到汛期(或主汛期),再由汛期逐渐过渡至非汛期,是属于模糊现象的范畴,其间存在着两个过渡阶段。可将汛期表示为论域 T 中的一个模糊集合 A ,用隶属函数进行描述,即对于任意元素 $t, t \in T$, 确定映射

$$\begin{aligned} \mu^{\circ}_A: T &\rightarrow [0, 1] \\ t &\rightarrow \mu^{\circ}_A(t) \end{aligned} \quad (1-4)$$

$\mu^{\circ}_A(t)$ 为元素 t (时间)隶属于模糊集合 A (汛期)的隶属度。式 (1-4)的物理意义是:论域 T 中的每个元素均对应着闭区间 $[0, 1]$ 中的一个数,此数表示元素 t 对于模糊现象汛期 A 的隶属程度或

资格,用隶属度来刻画处于非汛期向汛期、汛期向非汛期中介过渡段的元素对差异一方所具有的倾向性。在不考虑中介过渡阶段的特殊情况下,汛期的隶属函数式(1-4)等同于汛期的特征函数式(1-1),即隶属函数变为特征函数。故汛期特征函数——传统的汛期描述方式是汛期隶属函数的特例。因此,汛期隶属函数比特征函数具有更为一般的数学物理含义。为此,将式(1-3)中汛期 A 的特征函数 $x_A(t)$ 变为汛期 A 的隶属函数 $\mu_A^\circ(t)$,得到时间 t 水库所需要的防洪库容为

$$V_t = \mu_A^\circ(t)V_F \quad (1-5)$$

$0 \leq \mu_A^\circ(t) \leq 1$, 汛期(主汛期) $\mu_A^\circ(t) = 1$, 非汛期 $\mu_A^\circ(t) = 0$, 过渡阶段或过渡期 $0 < \mu_A^\circ(t) < 1$ 。当汛期隶属函数 $\mu_A^\circ(t)$ 确定后,根据式(1-5)可求得水库动态的防洪限制水位过程线。在由主汛期过渡到非汛期的阶段中, $\mu_A^\circ(t)$ 逐渐地由 1 减小至 0,故水库可逐步地蓄水。汛期模糊集分析的主要任务是分析推求汛期的隶属函数。

由以上论述可见,汛期的模糊集分析不仅必要,且有助于水文科学的发展,类似的分析研究还可以列举很多。如河流年径流现象既受流域的水文气象、自然地理、植物覆盖等众多因素的影响,并受到河川流域系统水量平衡确定性关系的控制,要在分析年径流变化的随机性的同时,又应分析年径流丰枯的模糊性。这样可以使设计年径流量及其年内分配的计算,建立在既考虑确定性分析,又顾及随机与模糊不确定性分析,理论上比较严格的成因、统计与模糊集相结合的基础上。又如河流水质的评价、预测问题。由于水质过程是物理、生物化学与水文现象的综合,其中不仅存在着随机不确定性的干扰,而且在水质评价、预测的等级——清洁、轻污染、中污染、重污染、严重污染划分中所具有的模糊性。水质评价的实质是模糊模式识别问题^[4]。

综上所述,水文系统模糊集分析在理论与实践上都具有重要

的科学意义。

二、水文系统研究的方法论

现象具有确定性与不确定性(非确定性)两个基本方面。经典数学微分方程等是研究现象确定性强有力的数学工具,在水文系统中也是这样。但是在一个很长的时期内,现象的不确定性仅被理解为随机性一个侧面。人们在研究与实际工作中广泛应用随机数学(如概率论等)处理现象的随机不确定性。对于现象的模糊性,由于长期受经典集合论只能描述“非此即彼”非0即1二值逻辑框架的束缚,实际上是被长期地忽视着,甚至有时这种忽视或忽略很不符合现象的实际情况。

新的数学分支模糊集理论或模糊数学的建立,使人们对于现象不确定性的理解有了拓广与深化。现象的不确定性不仅有随机性,而且还有模糊性,且两者有着本质上的区别。随机现象本身有着明确的含义,仅仅是因为条件不充分,使得条件与现象之间未能出现决定性的因果关系,因而在现象的出现与否上表现出不确定性,它是因果律的破缺所造成的一种不确定性。但模糊性与随机性不同,它是排中律的破缺而造成的另一种不确定性。在那里,概念本身没有明确的外延,一个对象是否符合这个概念难以确定,是由于概念外延的模糊所造成的划分上的不确定性^[5]。如果说,在以往的水文系统研究与生产实践中,由于模糊数学尚未建立,人们忽略或忽视现象的模糊性,而仅考虑现象的确定性与随机不确定性方面。那么,在今天的研究和生产工作中,特别是在那些模糊性不容忽视的方面,研究方法论应是以系统的确定性分析为主导,与随机、模糊不确定性分析相结合的综合分析法。笔者在系统地考察了水文学科中现象的确定性、随机性与模糊性以后,首次提出了应用于水文系统的确定性分析(成因分析)、概率统计分析(随机性分析)与模糊集分析(模糊性分析)相结合的新的理论分析体系,简称为水文系统的成因随机模糊分析。研究此理论分析体系与方法的