

从研究汛期描述论水文系统 模糊集分析的方法论*

陈 守 煜

(大连理工大学土木工程系 大连 116023)

提 要 论述了水文系统模糊集分析的哲学基础,提出了水文成因、概率统计、模糊集分析相结合的确定期限隶属函数的综合性方法。从汛期描述的研究,阐述了水文系统模糊集分析的基本方法论。

关键词 水文成因 概率统计 模糊集分析 汛期 方法论

分类号 P333; P333.6

1 水文系统模糊集分析的哲学基础

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——随机性与模糊性的另一面。所谓模糊性主要是指客观现象在共维时的差异在中介过渡阶段或状态所呈现的亦此亦彼性。诸如水文系统中的汛期、水污染、年径流的丰枯、流域的相似、水文过程的典型、水位流量关系的稳定和因素之间的相关关系等。

现代科学提供的大量材料证实:物质系统的产生与消亡,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。它是自然界物质系统演化过程中到处盛行的真实过程的反映。恩格斯指出:“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,……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]。1965年美国学者札德提出的模糊集合概念正是对物质系统在一定阶段的模糊性及其在人脑中的反映——模糊概念的科学描述^[2],正是对那些没有绝对分明的差异,没有固定边界的系统整体的抽象。可见,水文系统模糊集分析以辩证唯物论的哲学为基础。只考虑水文系统的确定性与随机不确定性。常常还不能全面地描述水文系统的特征,要完善地从发展中表达水文系统,只承认“非此即彼”还不够,还应该适当的地方承认“亦此亦彼”,所以水文系统模糊集分析是必要的,是一个进步。

2 汛期描述的研究

长期的水库调度实践使人们认识到要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

收稿日期:1994-7-16

* 国家自然科学基金资助项目的研究成果。

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

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^[3]。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

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

$x_A(t)$ 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

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

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

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

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期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 亿 m^3 是多年平均径流量的 2 倍,当年弃水 14 亿 m^3 ,汛后蓄水量比兴利库容少 2 亿 m^3 ^[4]。因此,用普通集合论为理论基础的硬性规定汛期起迄时间的描述方式,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^[4]。

为了在理论上完善对汛期的描述,笔者在文献 [5] 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

$$\mu_A: T \rightarrow [0, 1]$$

$$t \rightarrow \mu_A(t)$$

(4)

$\mu_A(t)$ 为元素 t (时间) 隶属于模糊集合 A (汛期) 的隶属度。式 (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，用隶属度来刻划处于非汛期向汛期、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 (4) 等同于汛期的特征函数式 (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 (3) 中汛期 A 的特征函数 $x_A(t)$ 变为汛期 A 的隶属函数 $\mu_A(t)$ ，得到时间 t 水库所需要的防洪库容为

$$V_t = \mu_A(t) V_F$$

(5)

$0 \leq \mu_A(t) \leq 1$ ，汛期（主汛期） $\mu_A(t) = 1$ ，非汛期 $\mu_A = 0$ ，过渡阶段或过渡期 $0 < \mu_A(t) < 1$ 。当汛期隶属函数 $\mu_A(t)$ 确定后，根据式 (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， $\mu_A(t)$ 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。

3 确定汛期隶属函数的综合性方法

根据模糊水文学的基本研究方法论——结合论^[5]，汛期隶属函数的合理描述，需要进行全面深入的研究工作。应进行流域水文气象、自然地理、植被覆盖等暴雨洪水的成因分析；水库设计或校核洪水的概率统计分析，汛期中介过渡阶段的模糊集分析，以成因分析为基础，将成因分析、概率统计分析与模糊集分析结合起来。文献①应用此研究方法论，分析推求了辽宁省大伙房水库汛期的隶属函数。

从天气系统分析，大伙房水库以上流域 6 月~9 月产生暴雨的天气系统主要有台风、高空槽、低压冷锋和华北气旋。不同的天气系统所产生的降雨强度、分布和走向各不相同，不同时期各种天气系统出现的频率和组合情况也不一样，随着太平洋副高压脊线的西伸北抬位置与西风带环流特征而变。大伙房水库流域 6 月形成暴雨的天气系统，主要是低压冷锋和高空槽；7 月主要是华北气旋和高空槽；8 月主要是低压冷锋、高空槽和台风，流域的暴雨多发生在 7 月下旬与 8 月上旬。统计 1905 年~1934 年、1950 年~1983 年 6 月至 9 月各旬发生大于 70mm 的 3 日暴雨的次数列于表 1，旬平均降雨量列于表 2。由表 1 可见，6 月到 7 月形成暴雨的天气系统逐渐增多，8 月上旬以后形成暴雨的天气系统又逐渐减少，7 月下旬至 8 月上旬是形成暴雨天气系统的全盛时期。

表 1 大于 70mm 的 3d 暴雨次数
Table 1. Times of storm for three days whose amount is larger than 70mm

月		6			7			8			9		
旬		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
次数		1	1	1	2	9	13	17	12	6	2	1	0

① 张力. 汛期模糊描述与洪水模糊优化控制. 大连理工大学硕士学位论文, 1990

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

表 2 旬平均降雨量
Table 2. Average rainfall for ten days

单位: mm

月	6			7			8			9		
旬	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
平均雨量	41.2	37.2	39.1	55.2	60.4	92.3	67.1	56.3	53.5	29.7	26.9	24.5

由表 2 可见,该流域的旬平均降雨量 6 月为 40mm 左右,而后逐渐增大;7 月下旬达到最大,为 92.3mm,然后又逐渐减小,8 月上旬为 67.1mm,下旬为 53.5mm;9 月下旬减小到 24.5mm,明显地存在着中介过渡阶段。即是从 6 月开始降雨量逐渐增大,由非汛期逐渐过渡到主汛期;8 月上、中旬以后,降雨量又逐渐减小,由主汛期逐步过渡到非汛期,由成因分析可见,该流域的汛期确实是一个模糊现象。对它进行合理的描述,确定其隶属函数,还需要作概率统计分析与模糊集分析。

汛期隶属函数可先用模糊统计^[6]确定其大致的轮廓或形状,本文称其为经验隶属函数。文献①分析了大伙房水库以上流域 1950 年~1983 年的 6 月 1 日至 9 月 30 日的日降雨量资料。根据专家经验与知识选定该流域日降雨量大于或等于 15mm 为入汛指标^[4]。由此可确定 n ($n=34$) 个汛期的游动区间,称为 n 个汛期的显影样本区间。设时间 t 被汛期的 n 个显影样本区间覆盖的次数为 m_t ,根据文献 [6], t 对汛期 A 的隶属频率为 m_t/n 或 t 对 A 的经验隶属度为 m_t/n 。于是得到该流域汛期的经验隶属函数如表 3 所列(表中仅给出 8 月 11 日至 9 月 30 日各天对汛期的隶属度)。

表 3 8 月 11 日~9 月 30 日各天对汛期的隶属度
Table 3. Membership of day to flood periods from 11, Aug. to 30, Sep

日 期	8 月 11 日	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
经验隶属度	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.94	0.91	0.91	0.88	0.88	0.88	0.85	0.85
理论隶属度	0.999	0.997	0.994	0.990	0.984	0.977	0.969	0.959	0.949	0.937	0.925	0.911	0.896	0.881	0.864	0.847	0.829
日 期	8 月 28 日	29	30	31	9 月 1 日	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
经验隶属度	0.82	0.82	0.79	0.79	0.74	0.71	0.68	0.68	0.65	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.56	0.56	0.53
理论隶属度	0.811	0.792	0.772	0.752	0.731	0.710	0.689	0.667	0.646	0.624	0.602	0.580	0.558	0.537	0.515	0.484	0.473
日 期	9 月 14 日	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
经验隶属度	0.44	0.44	0.41	0.41	0.35	0.35	0.35	0.32	0.26	0.18	0.18	0.15	0.12	0.12	0.09	0.03	0.03
理论隶属度	0.452	0.432	0.412	0.393	0.374	0.355	0.337	0.319	0.302	0.286	0.270	0.254	0.239	0.225	0.211	0.198	0.186

文献① 对大伙房水库的汛期进行了较详细的分析,现引用其部分成果:主汛期结束日期 8 月 10 日,主汛期校核标准的水库防洪库容 $V_F=1187\times 10^6\text{m}^3$,主汛期至非汛期过渡阶段(汛后期)校核标准的水库防洪库容 $V_c=848.1\times 10^6\text{m}^3$ 。

根据笔者在文献 [5] 中的研究,主汛期向非汛期过渡阶段汛期的理论隶属函数可选用降半正态分布。

$$\mu_A(t) = e^{-\left(\frac{t-a}{b}\right)^2}, \quad t > a, b > 0$$

(6)

a 为主汛期结束日期 (待定参数); t 时间以日为单位; b 为大于 0 的待定参数。参数 a 、 b 可根据以下原则确定:

(1) 水库的防洪安全; (2) 综合考虑成因分析、概率统计分析、模糊统计试验等有关分析成果; (3) 理论与经验隶属函数的拟合。

根据成因分析知, 8 月上旬属主汛期, 故主汛期结束日期为 8 月 10 日, 参数 a 定为 8 月 10 日, 该日对主汛期的隶属度 $\mu_A(t=8 \text{ 月 } 10 \text{ 日})=1$ 。

又根据概率统计分析成果知, $V_F=1187 \times 10^6 \text{ m}^3$, $V_C=848.1 \times 10^6 \text{ m}^3$, 则 $V_C/V_F=0.71$ 。

将 0.71 作为主汛期向非汛期过渡阶段中某一特定日期 t_b 对汛期的隶属度^[7], 即 $\mu_A(t_b)=0.71$ 。由式 (5) 知 t_b 所需的防洪库容: $V_{t_b}=\mu_A(t_b) \cdot V_F=0.71V_F=V_C$ 。可见该特定日期水库仍满足校核标准的防洪要求。另一方面, 从理论与经验隶属函数拟合程度考虑, 可先设理论、经验隶属函数在该天的隶属度相等 (或很近)。由表 3 隶属度为 0.71 的日期为 9 月 2 日, 即 $t_b=9 \text{ 月 } 2 \text{ 日}$ 。将 $t=t_b=9 \text{ 月 } 2 \text{ 日}$, $\mu_A(t_b)=0.71$ 代入式 (6) 解得 $b=39.30$ 。根据式 (6) 得

$$\mu_A(t)=e^{-\left(\frac{t-8 \text{ 月 } 10 \text{ 日}}{39.30}\right)^2}, \quad t > 8 \text{ 月 } 10 \text{ 日} \quad (6')$$

按式 (6') 计算的汛期理论隶属函数一起列于表 3, 比较经验与理论隶属函数各日的隶属度可见: 在 8 月 11 日至 9 月 21 日的主要中介过渡阶段中, 经验与理论隶属函数的拟合程度很好, 其中 8 月 16、17、20、22、24、26、28 日, 9 月 1、2、3、5、8、15、16、19、21 日两者相差很小 (在 0.01 以内, 有的几乎相等), 仅 9 月下旬有所偏离。综合考虑水库防洪安全与拟合程度, 汛期隶属函数可采用式 (6') 的表示方式。

根据式 (5)、(6') 可以确定该水库主汛期至非汛期过渡阶段逐日所需要的防洪库容, 从而可确定此过渡阶段中逐日的汛限水位。水库在过渡阶段中可逐步地蓄水, 缓解防洪与兴利之间的矛盾, 减少弃水量, 提高水资源的利用程度。

4 水文系统模糊集分析的基本方法论

根据水文系统模糊集分析的哲学基础, 要全面地认识、揭示水文系统的规律, 除了承认“非此即彼”外, 还需要在适当的地方承认“亦此亦彼”。由对汛期的模糊集分析可见, 描述模糊集合汛期 A 的隶属函数 $\mu_A(t)$ 乃是综合运用水库流域洪水的成因分析、随机分析与模糊集分析相结合的结果。水文系统类似的研究课题很多。如河流年径流现象既受流域的水文气象、自然地理、植物覆盖下垫面等众多因素的影响, 并受控于流域系统水量平衡这一确定性关系的约束, 又要考虑年径流变化的随机性与年径流丰枯的模糊性。这样可以使设计年径流及其年内分配的确定, 建立在理论上比较严格的成因、统计与模糊集分析相结合的基础上^[8]。又如研究河流水质的评价与预测。显然, 水质的变化过程是物理、生化与水文现象的组合, 其中有随机不确定性的干扰存在, 以及在水质评价、预测的等级 (清洁、轻污染、重污染、严重污染) 划分中所具有的模糊性^[9]。因此, 水文系统模糊集分析的基本方法论应是以确定性分析为基础, 将确定性分析、概率统计分析与模糊集分析相结合, 综合运用有关方面的概念、理论与方法。

5 结 语

水文系统已经发展到了一个需要考虑模糊性的阶段。实践表明,水文系统模糊集分析有助于水文学科的发展,可以更全面地认识与揭示水文系统的规律,其基本方法论是确定性(成因)分析、概率统计分析与模糊集分析相结合。通过对汛期描述的研究,不仅有助于对方方法论的理解与掌握,且说明了水文系统模糊集分析的必要性 with 条件性。

参 考 文 献

- 1 恩格斯. 自然辩证法. 北京: 人民出版社, 1971. 190
- 2 Zadeh L A. Fuzzy sets. Inform. Control, 1965, 8. 338~353
- 3 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. 19~20
- 4 王本德. 水库模糊优化调度. 大连: 大连理工大学出版社, 1990. 76~82
- 5 陈守煜. 模糊水文学. 大连理工大学学报. 1988, 28 (1): 93~97
- 6 汪培庄. 模糊集合论及其应用. 上海: 上海科学技术出版社, 1983. 34~40
- 7 陈守煜, 赵瑛琪. 提高水资源可利用量的一个途径. 大连理工大学学报. 1990, 30 (2): 193~198
- 8 陈守煜. 水利水文水资源系统的模糊、优化与数值计算. 大连: 大连理工大学出版社, 1989. 12~22
- 9 陈守煜. 水文水资源系统模糊识别理论. 大连: 大连理工大学出版社, 1992. 90~98

Methodology of Fuzzy Sets Analysis to Hydrologic System from Research on Flood Period Description

Chen Shouyu

(Dalian University of technology, Dalian 116023)

Abstract: This paper discusses the philosophy basis of fuzzy sets analysis to hydrologic system. The comprehensive methods for determining the membership function of flood period is put forwards by combining hydrologic cause of formation and probability statistics with fuzzy set analysis. In addition, the paper expounds elemental methodology of fuzzy sets analysis to hydrologic system from research on flood period description.

Key words: hydrologic cause of formation; probability statistics; fuzzy set; analysis; flood period; methodology.