白龟山水库汛期模糊集分析及在洪水资源化中的应用

袁晶瑄[1],孙广平[2]

(1.大连理工大学土木水利学院,大连 辽宁 116024;2.河南省水利勘测设计院,河南 郑州 450008)

摘要 运用模糊水文水资源学中成因分析、统计分析、模糊集分析相结合的基本方法,依据雨洪资料,对河南白龟山水库汛期进行模糊集分析和洪水资源利用研究。在不降低水库防洪标准前提下,对水库汛期汛限水位进行动态控制,即水库主汛期以原设计汛限水位迎洪,8 月中旬始可在 1.0 m 范围内上浮汛限水位,水库年均工业与民用供水量比原设计的增加 24%。

关键词 模糊水文水资源学;汛期;模糊集分析;水库汛限水位;洪水资源化

中图分类号:O235,TV213.9 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-6933(2008)06-0040-03

Application of fuzzy set analysis during flood seasons in utilization of flood resources in Baiguishan Reservoir

YUAN Jing-xuan[1], SUN Guang-ping[2]

(1. *School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *China*; 2. *Henan Investigation and Design Institute of Water Conservancy, Zhengzhou* 450008, *China*)

Abstract: Fuzzy set analysis and the utilization methods of flood resources in the Baiguishan Reservoir during the flood season are presented based on rainfall data using the cause analysis, the probability analysis and the fuzzy set analysis methods in fuzzy hydrology. On ensuring the standard for flood control of the reservoir, the flood control water level of the Baiguishan Reservoir can be regulated dynamically: the design flood control water level is used in main flood seasons, while the flood control water level can be raised within a range of 1.0 m from the middle of August. Thus, the mean annual industrial and domestic water supply can be 24% higher than the design value.

Key words: fuzzy hydrology; flood season; fuzzy set analysis; flood control water level of reservoir; flood resources utilization

北方河流年降水量主要集中在汛期,其中每年的七八月份降水占整个汛期降水量的 50% 左右,具有明显的季节性特征。将水库汛期单一汛限水位的传统方式改为多级汛限水位,是缓解水库防洪与兴利矛盾,提高现有水库的调蓄作用,实现洪水资源安全利用的一个有效途径。

“要么是汛期,要么是非汛期”的普通集合论概念,硬性规定汛期的起讫时间的传统描述方式,是造成我国众多水库汛期不敢蓄水、汛后又蓄不上水,使有限而紧缺的水资源未能有效利用的一个重要原因。陈守煜建立的模糊水文水资源学关于汛期的描述与表达,突破了硬性划分汛期起讫时间的传统水文学观点,为缓解水库防洪与兴利矛盾,有效利用洪水资源提供了理论基础[1-2]。本文应用模糊水文水资源学中描述汛期的理论[3-4],采用成因分析、概率统计分析与模糊集分析相结合的基本方法,依据长系列历史雨洪资料,研究河南白龟山水库汛期演变规律,以期利用洪水资源,充分发挥水库效益。

1 白龟山水库简介

1.1 水库概况

河南省白龟山水库是淮河流域最大支流沙颍河

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50779005);水利部科技创新项目(SCXC2005-01)

作者简介:袁晶瑄(1966—),女,辽宁大连人,讲师,硕士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:yuanjingxuan@yahoo.com.cn

水系沙河干流上的一座大（Ⅱ）型年调节半平原水库，以防洪为主，兼顾城市供水、农灌等综合利用。流域面积 2 740 km^2。大坝按 100 年一遇洪水设计，2000 年一遇洪水校核。总库容 9.22 亿 m^3，兴利库容 2.36 亿 m^3。设计汛限水位 102.0 m，兴利蓄水位 103.0 m，死水位 97.5 m。

白龟山水库自 1960 年建成至今已运行 47 年，防洪和兴利效益十分显著。下游有平顶山、漯河、周口等重要城市，焦枝、平舞、京广、京深等重要铁路及 107 国道。白龟山水库是平顶山市工业和生活用水以及 3.33 万 hm^2 农田灌溉的主要水源。由于当地工农业需水量大，水库兴利库容偏小，防洪与兴利矛盾突出，不能满足工农业需水要求，因此白龟山水库迫切需要研究汛期洪水资源利用问题。

1.2 洪水季节性变化特点

水库流域属于大陆性气候，气象变化受季风影响。年均降雨量约 900 mm，60% 降水集中在汛期 6、7、8 三个月。年际降水变化较大，最大最小值可差 5 倍。分析白龟山水库 1952 ~ 2001 年共 50 年入库洪水实测资料，统计年最大 1 日洪量、3 日洪量及 7 日洪量在汛期（6 月 1 日 ~ 9 月 30 日）出现的频次（表 1），入库洪水有明显的季节性变化特点。主汛期可采用 7 月中旬至 8 月上旬，8 月中旬至 9 月末作为后汛期。

表 1 洪水年最大值在汛期出现的次数

分期时间	年最大值出现次数		
	1 日洪量	3 日洪量	7 日洪量
6 月 1 日 ~ 20 日	8	7	7
6 月 21 日 ~ 7 月 10 日	10	11	13
7 月 11 日 ~ 8 月 10 日	23	19	18
8 月 11 日 ~ 9 月 30 日	8	12	11
9 月 30 日以后	1	1	1

2 汛期模糊集分析和洪水资源利用研究

2.1 汛期模糊集分析方法

按照工程模糊集理论，汛期是一个模糊现象，“汛期”和“非汛期”之间存在过渡时期。汛期作为 1 年时间论域 T 中的一个模糊子集 $\underset{\sim}{A}$。对于任意元素 t（$t \in T$），可以确定一个映射：

$$\begin{aligned} \mu_{\underset{\sim}{A}} &: T \rightarrow [0,1] \\ \mu &\rightarrow \mu_{\underset{\sim}{A}}(t) \in [0,1] \end{aligned} \tag{1}$$

式中，$\mu_{\underset{\sim}{A}}(t)$ 为 t 隶属于模糊子集 $\underset{\sim}{A}$ 的相对隶属度。其物理意义是 $:\underset{\sim}{A}$ 中的每个元素均对应着闭区间 [0，1] 中的一个无单位数，此数表示该时刻或元素 t 对于汛期 $\underset{\sim}{A}$ 的相对隶属程度，$1 \geqslant \mu_{\underset{\sim}{A}}(t) \geqslant 0$，可用直接模糊统计试验确定相对隶属函数 $\mu_{\underset{\sim}{A}}(t)$[4]。

2.2 汛期直接模糊统计试验

分析白龟山流域 1964 ~ 1994 年共 31 a 的逐日降雨实测资料，10 月以后降中到大雨的可能性很小，6 月以前亦如此，故选择汛期与非汛期分界的流域日降雨量标准值 $Y_t = 10$ mm/d，6 月 1 日 ~ 9 月 30 日作为本流域汛期论域 $\underset{\sim}{A}$。

某年，汛期开始的时间为 t_1，汛期结束的时间为 t_4，根据大于等于 Y_t 的起始时间 t_2 和终止时间 t_3，这里取 $t_1 = t_2 - 1$，$t_4 = t_3 + 1$，确定该年汛期的区间 $[t_1, t_4]$，即是汛期模糊集合 $\underset{\sim}{A}$ 的一次试验结果，为一个汛期的显影样本区间，如表 2 所示。

表 2 白龟山水库汛期模糊集合 $\underset{\sim}{A}$ 的试验结果（$Y_t = 10$ mm/d）

序号	年份	t_2/月，日	t_3/月，日	序号	年份	t_2/月，日	t_3/月，日
1	1964	6，15	9，23	17	1980	6，06	9，08
2	1965	6，30	9，04	18	1981	6，08	9，28
3	1966	6，24	8，23	19	1982	6，08	9，30
4	1967	6，19	9，29	20	1983	6，11	9，22
5	1968	6，30	9，18	21	1984	6，05	9，30
6	1969	6，04	9，26	22	1985	7，11	9，21
7	1970	6，12	9，24	23	1986	6，15	9，09
8	1971	6，02	8，23	24	1987	6，05	9，02
9	1972	6，10	9，05	25	1988	7，03	9，13
10	1973	6，09	9，27	26	1989	6，03	8，18
11	1974	7，03	9，29	27	1990	6，07	9，22
12	1975	6，21	9，29	28	1991	6，13	9，22
13	1976	6，28	9，01	29	1992	6，13	9，20
14	1977	6，24	9，14	30	1993	6，03	8，23
15	1978	6，24	8，11	31	1994	6，05	8，29
16	1979	6，18	9，23				

设时间 t 被汛期 $\underset{\sim}{A}$ 的 n（$n = 31$）个显影样本区间覆盖的次数为 m_t，t 属于汛期 $\underset{\sim}{A}$ 的相对隶属度 $\mu_{\underset{\sim}{A}}(t) = m_t / n$。计算各日对汛期 $\underset{\sim}{A}$ 的相对隶属度见表 3，隶属函数曲线见图 1。实验表明，随着 n 增大，汛期相对隶属度的期望值会呈现稳定性[5]。

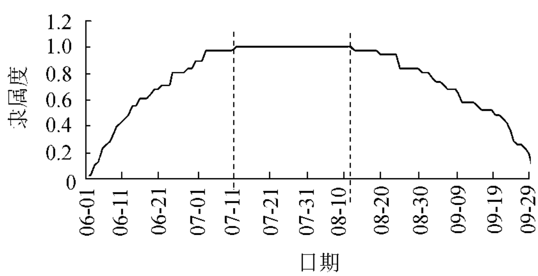

图 1 白龟山水库汛期相对隶属函数曲线

据汛期相对隶属函数，可划分 7 月 11 日 ~ 8 月 11 日为主汛期，6 月 1 日 ~ 7 月 11 日为前汛期，8 月 12 日 ~ 9 月 30 日为后汛期，与 2.2 节统计汛期洪水季节性变化相一致。

2.3 动态汛限水位的确定

根据汛期相对隶属函数，推求汛期逐日汛限水

表 3　白龟山水库汛期相对隶属度表

月份	日期														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6 月	0	0.03	0.10	0.13	0.23	0.26	0.29	0.35	0.39	0.42	0.45	0.48	0.55	0.55	0.61
7 月	0.90	0.90	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8 月	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	0.97	0.97	0.97
9 月	0.81	0.77	0.74	0.74	0.71	0.68	0.68	0.68	0.65	0.58	0.58	0.58	0.58	0.55	0.52

月份	日期															
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
6 月	0.61	0.61	0.64	0.68	0.68	0.71	0.71	0.71	0.81	0.81	0.81	0.81	0.84	0.84	0.90	
7 月	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8 月	0.97	0.97	0.97	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.81	0.81
9 月	0.52	0.52	0.52	0.48	0.48	0.45	0.42	0.35	0.29	0.26	0.26	0.23	0.19	0.06	0.06	

位。假定汛期任一时刻 t 所需要的调洪库容 $V_{fcs}(t)$ 与主汛期所需要的调洪库容 V_{fcs}(6.816 亿 m^3)之比等于该时刻汛期相对隶属度[3]，即

$$\mu_{\underset{\sim}{A}}(t) = V_{fcs}(t)/V_{fcs} \tag{2}$$

主汛限水位以上容许超蓄水量：

$$W_{fcs}(t) = V_{fcs} - V_{fcs}(t) = (1 - \mu_{\underset{\sim}{A}}(t))V_{fcs} \tag{3}$$

主汛限水位 102.0 m 相应库容为 2.404 亿 m^3，由 $W_{fcs}(t)+2.404$(亿 m^3)查水位库容关系，得 t 时刻的汛限水位 $Z_e(t)$，$102.0\,m \leqslant Z_e(t) \leqslant 103.0\,m$，见表 4。

表 4　白龟山水库动态汛限水位

日期	$\mu_{\underset{\sim}{A}}(t)$	$1-\mu_{\underset{\sim}{A}}(t)$	$W_{fcs}(t)$/亿 m^3	$W_{fcs}(t)+2.404$/亿 m^3	$Z_e(t)$/m
06-01	0	1.00	6.816	3.020	103.00
06-05	0.23	0.77	5.248	3.020	103.00
06-10	0.42	0.58	3.953	3.020	103.00
06-15	0.61	0.39	2.658	3.020	103.00
06-20	0.68	0.32	2.181	3.020	103.00
06-25	0.81	0.19	1.295	3.020	103.00
06-30	0.90	0.10	0.682	3.020	103.00
07-05	0.97	0.03	0.204	2.608	102.38
07-10	0.97	0.03	0.020	2.424	102.28
07-15	1.00	0	0	2.404	102.00
07-20	1.00	0	0	2.404	102.00
07-25	1.00	0	0	2.404	102.00
07-31	1.00	0	0	2.404	102.00
08-05	1.00	0	0	2.404	102.00
08-10	1.00	0	0	2.404	102.00
08-15	0.97	0.03	0.204	2.608	102.38
08-20	0.94	0.06	0.409	2.813	102.70
08-25	0.84	0.16	1.091	3.02	103.00
08-31	0.81	0.19	1.295	3.02	103.00
09-05	0.71	0.29	1.977	3.02	103.00
09-10	0.58	0.42	2.863	3.02	103.00
09-15	0.52	0.48	3.272	3.02	103.00
09-20	0.48	0.52	3.544	3.02	103.00
09-25	0.26	0.74	5.044	3.02	103.00
09-30	0.06	0.94	6.816	3.02	103.00

由表 4 知，前汛期 6 月 1 日 ~ 7 月 11 日汛限水位逐渐由 103.0 m 降至 102.0 m，考虑枯水期来水较少和兴利用水等因素，前汛期抬高汛限水位运行不切实际，其汛限水位应同主汛期的汛限水位；主汛期 7 月 11 日 ~ 8 月 11 日的汛限水位 102.0 m；后汛期 8 月 12 日 ~ 9 月 30 日，汛限水位逐渐提高，8 月 15 日汛限水位 102.38 m，8 月 20 日汛限水位 102.70 m，8 月 25 日汛限水位提高到 103.0 m。

2.4　后汛期汛限水位提高后的水库安全

由 1952 ~ 2001 年 50 年系列分期洪水的统计成果①，后汛期设计洪水略小于原设计洪水。由后汛期各种频率洪水进行调洪计算，后汛期汛限水位提高到 103.4 m，50 年一遇洪水位 105.34 m 低于设计的防洪高水位 105.90 m，100 年一遇洪水位 105.84 m 低于设计的 105.90 m，2000 年一遇洪水位 108.84 m 低于校核洪水位 109.56 m。后汛期将汛限水位提高 1.4 m，白龟山水库是安全的。

鉴于白龟山水库原设计兴利蓄水位 103.0m，后汛期汛限水位可采用 103.0 m。

2.5　汛期动态控制运用兴利效益

原汛期为 6 月 20 日 ~ 9 月 30 日，设计汛限水位 102.0 m。原设计兴利指标为工业和生活供水量 1.06 亿 m^3/a，保证率 97%，灌溉面积 3.33 万 hm^2，农灌供水保证率 75%。

汛期分期后，主汛期(7 月 11 日 ~ 8 月 11 日)汛限水位 102.0 m，后汛期(8 月 12 日 ~ 9 月 30 日)汛限水位逐步提高到 103.0 m。

据 1972 ~ 2001 年共 30 a 水库天然来水资料，应用动态汛限水位对水库进行优化调度研究。长系列兴利调节计算起止时间为 1972 年 10 月 1 日 ~ 2001 年 9 月 30 日，起调水位为兴利蓄水位。汛期动态控制运用对水库各兴利指标影响见表 5。

据汛期模糊集分析，若后汛期汛限水位由 102.0 m提高到 103.0m，即表 5 的方案 2，(下转第 52 页)

① 大连理工大学土木水利学院，河南省水利勘测设计院，河南省白龟山水库管理局. 河南省白龟山水库汛限水位设计与运用研究报告. 2004 年 12 月.

黄河水质，使黄河包头段水体有半年时间处于Ⅴ类或劣Ⅴ类状态。

b. 综合各项指标，可以判定黄河包头段在2004年12月至次年3月间，处于富营养化状态。

c. 黄河水源水质的富营养化必然对以黄河水为水源的包头市的饮用和工业用水安全造成威胁。

参考文献：

[1] 王利平，李义科，庞宏，等. 稀土冶炼氯胺废水氨氮去除试验研究[J]. 给水排水，2004，30(4)：50-52.

[2] 高际玫，董俊玲，张娜. 包头四道沙河流域稀土行业废水对水环境影响分析[J]. 内蒙古环境保护，2002，14(3)：31-33.

[3] 何江，米娜，匡运臣，等. 黄河包头段水环境中稀土元素的形态及分布特征[J]. 环境科学，2004，25(2)：61-66.

[4] 薛爱娣，张雪梅. 黄河水源污染对画匠营子水厂供水的影响[J]. 包钢科技，2002，28(2)：71-75.

[5] 李进修，杜斌，孙以三. 水动力条件对富营养化影响规律探讨[J]. 水利水电技术，2005，36(5)：15-18.

[6] 廖平安. 流速对藻类生长影响的试验研究[J]. 北京水利，2005(2)：12-14.

[7] 吴彦领. 以黄河为生活饮用水水源的卫生研究[J]. 河南预防医学杂志，2000，11(2)：72-75.

[8] 许秋瑾，高光，陈伟民. 太湖微囊藻毒素与湖泊物理因子之间的关系[J]. 中国环境监测，2004，20(1)：12-16.

[9] 孟玉珍. 郑州市水源水藻类和藻毒素污染调查[J]. 卫生研究，1999，28(2)：100-101.

[10] 胡鸿钧. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京：科学出版社，2006.

（收稿日期：2008-04-12 编辑：高渭文）

（上接第42页）

表5 各蓄水方案水库兴利效益

方案	汛限水位/m		弃水量/(亿 $m^3 \cdot a^{-1}$)	工业供水/(亿 $m^3 \cdot a^{-1}$)	工业供水增量/(亿 $m^3 \cdot a^{-1}$)	农灌面积/万顷	调节期末水位/m	期末库容/亿 m^3
	主汛期	后汛期						
1	102.0	102.0	4.14	1.18	—	3.33	101.57	2.155
2	102.0	103.0	3.96	1.32	0.14	3.33	101.92	2.356

在工业和生活供水保证率不低于97%的情况下，可使工业和生活供水量增至1.32亿 m^3/a，比原设计的增加0.26亿 m^3/a，增幅24%，能满足目前平顶山市1.18亿 m^3/a的工业和生活用水的实际需求以及近期平顶山市经济发展而增加的水量需求。

与原设计的单值静态汛限水位相比，在不降低水库防洪标准前提下，汛限水位动态控制运用后，对提高水库的综合效益十分有效。通过实例，本文研究成果的应用效益将十分显著，是水库洪水资源有效利用的可行方法。

3 结 语

运用模糊水文水资源学中确定性(成因)分析、概率统计分析与模糊集分析相结合的基本原理，综合考虑各方面的因素，较全面地揭示了河南白龟山水库汛期演变规律，将设计状态下的单一汛限水位变成多级汛限水位，从而调整白龟山水库的防洪调度方案，水库年均工业和生活供水量比原设计的增加24%，能满足目前平顶山市工业和生活水量的实际需求。本研究成果只是调整水库运行方式，并未降低水库防洪设计标准，所得结果合理、可靠，可推广运用于其他已建的水资源短缺地区的综合利用水库。为缓解我国缺水地区水库防洪与兴利矛盾及充分利用洪水资源提供了一条有效途径，对区域水资源的可持续开发利用具有理论与现实意义[6-8]。

本文在撰写过程中承蒙陈守煜教授指导，谨此表示谢意！

参考文献：

[1] 陈守煜. 模糊水文学与水资源系统模糊优化原理[M]. 大连：大连理工大学出版社，1990.

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

[3] 陈守煜. 从研究汛期描述论水文系统模糊集分析的方法论[J]. 水科学进展，1995(2)：133-138.

[4] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京：国防工业出版社，1998.

[5] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M]. 长春：吉林大学出版社，1998.

[6] 陈守煜，王淑英，郭瑜等. 水库设计汛限水位动态模糊控制分析[J]. 大连理工大学学报，2005(5)：735-739.

[7] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连：大连理工大学出版社，2005.

[8] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型——模糊水文水资源学数学基础[J]. 大连理工大学学报，2005，45(2)：308-312.

（收稿日期：2008-02-19 编辑：高渭文）