

碧流河水库后汛期汛限水位及控制运用方式

周惠成，王福兴，梁国华

(大连理工大学土木水利学院，辽宁 大连 116024)

摘要：水库汛期分期后上下游防洪标准的确定是水库分期运用的难点，针对北方地区后汛期来水特点，提出从防洪、兴利与两者权衡3个角度通过优化推求汛限水位备选方案，并协调方案中各指标间的复杂关系，建立汛限水位多方案分层模糊优化决策模型。经应用于碧流河水库表明，该方法在不改变水库原防洪标准的前提下，抬高水库后汛期汛限水位。研究结果为决策提供了技术支持，对北方缺水地区的其它水库有指导意义。

关 键 词：汛期分期；优化；汛限水位；模糊集理论；水库

中图分类号：TV697.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-6791(2009)06-0857-06

将汛期分期、实施分期汛限水位已成为中国北方有公用库容的大中型水库协调防洪兴利间矛盾的主要方法。该方法以提高水库蓄满率，达到水库设计的兴利效益。然而，如何制定各分期合理的汛限水位及相应的调度方式，目前仍缺乏较深入的研究，其难点在于如何确定分期后水库上下游防洪标准，或如何协调防洪与兴利间矛盾。针对上述问题，开展了很多研究工作。肖义^[1]等采用 Gumbel-Hougaard Copula 函数描述两个分期的分期最大洪水间相关性结构，并构造边缘分布为 P- 型分布的分期最大洪水联合分布，讨论了分期设计洪水频率与防洪标准的关系。方彬^[2]等采用 Von Mises 分布和 P- 型分布分别拟合年最大洪水发生时间和量级的概率分布，选用 Gumbel Archimedean Copula 函数建立年最大洪水发生时间和量级之间的联合分布，进行洪水设计分析。邹鹰^[3]应用概率论中独立事件概率组合原理，提出水库分期防洪标准的等价表达形式，进而确定分期设计洪水标准及相应汛限水位。刘攀^[4]等提出优化设计分期汛限水位的模型与解法，通过降低主汛期汛限水位获得的防洪效益，换取前汛期、后汛期汛限水位的抬高。Ruan 和 Vijay^[5]基于主汛期发生了较大降雨，则后汛期再发生较大降雨可能性较小的假定，应用分期设计暴雨的条件概率，研究了分期汛限水位及其动态控制方法。

以上研究成果从概率组合角度出发，理论上探讨了分期设计洪水问题并确定分期汛限水位。实际上，从应用角度，还应根据流域特点，在不改变水库防洪标准前提下，确定水库分期汛限水位及运用方式。在中国北方，近年来连续干旱，水资源短缺问题十分突出^[6]，后汛期作为从汛期到非汛期过渡的关键时期，其调度方式合理与否直接关系到汛期结束后水库能否蓄满，进而影响水库兴利效益。因此，迫切需要深入研究适合北方水库的分期汛限水位及控制运用方式。本文结合北方地区分期洪水特点，以水库分期后实际应用为出发点，综合考虑防洪与兴利关系，以不降低水库防洪标准为原则，研究碧流河水库后汛期防洪限制水位及其控制运用方式的确定方法。

1 碧流河水库汛期分期及其设计洪水

碧流河水库位于辽宁省普兰店市双塔镇与庄河市荷花山镇分界的碧流河干流，水库以城市供水、防洪为主，兼有发电、灌溉、养鱼等综合利用功能。水库按 500 年一遇洪水设计，设计洪水位 71.0 m；万年一遇洪水校核，校核洪水位 72.6 m；总库容 9.34 亿 m³，正常高水位 69.0 m，相应库容 7.14 亿 m³。

收稿日期：2008-10-20

基金项目：水利部公益性行业科研专项经费资助项目（200701015）；国家自然科学基金资助项目（50809011）

作者简介：周惠成（1958-），男，吉林农安人，教授，博士生导师，主要从事水文水资源方面的研究。

E-mail：hczhou@dlut.edu.cn

碧流河水库是大连市最主要的供水水源^[7]，然而自1983年建库至2005年，有14年弃水，仅2年蓄至兴利库容，防洪与兴利矛盾十分突出。因此，有必要在保证防洪安全前提下，分期抬高汛限水位以提高水库蓄满率，从而缓解大连市资源型缺水问题。由表1，采用数理统计法将汛期划分为前汛期(6月1日~7月20日)、主汛期(7月21日~8月10日)和后汛期(8月11日~9月20日)，该分期已运用多年。在此基础上，同频率放大典型年1962年洪水，得图1所示后汛期设计洪水过程。

表1 碧流河水库1958~2001年洪水场次分析

Table 1 Analysis of flood number in Biliuhe reservoir from 1958 to 2001

标准	洪峰(共80场)				大于1000 m ³ /s洪峰(共44场)	
	时间	7月20日以前	7月21日~7月31日	8月1日~8月10日	8月11日以后	7月21日~7月31日
场数及所占比例		14场(17.5%)	23场(28.8%)	18场(22.5%)	25场(31.2%)	17场(38.6%)
						8场(18.2%)

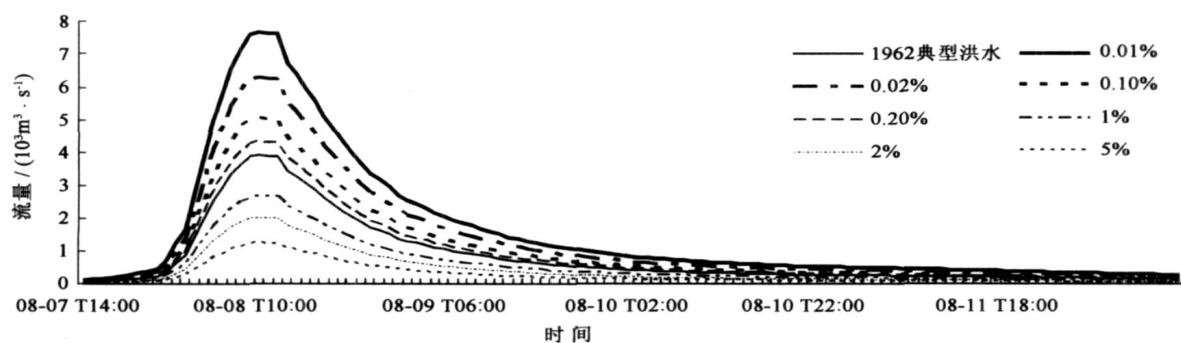


图1 1962年典型洪水及后汛期设计洪水过程线

Fig. 1 Typical flood process of 1962 and design flood processes in the post-flood season

对比后汛期与1974年补充初设的主汛期设计洪水，找出表2所示洪峰洪量值相应的对应关系。如，后汛期0.02%设计洪水的洪峰、洪量值与主汛期2%设计洪水相当。

表2 后汛期与主汛期洪峰、洪量值对比

Table 2 Comparison of flood peak and volume between the post-flood season and the main flood season

频率/%	主汛期	$Q_m/(m^3 \cdot s^{-1})$		$W_3/10^8 m^3$		$W_5/10^8 m^3$	
		后汛期	主汛期	后汛期	主汛期	后汛期	主汛期
0.2	10	4330	3720	3.47	3.26	3.92	3.97
0.1	5	5080	4750	4.07	4.07	4.60	4.94
0.02	2	6300	6150	5.05	5.06	5.70	6.16
0.01	1	7660	7600	6.14	6.16	6.94	7.52

注： Q_m 为洪峰流量， W_3 为3d洪量， W_5 为5d洪量。

2 碧流河水库后汛期汛限水位的备选方案

对于相同频率洪水，后汛期设计洪水的洪峰、洪量比主汛期偏小。因此，为提高汛期结束时水库蓄满率可适当提高汛限水位，并制定合理的洪水调度方式。首先确定汛限水位最小与最大抬高值，即抬高后的汛限水位变化区间；然后在此区间内设定多个抬高的汛限水位，针对每一汛限水位均得出合理可行并满意的洪水调度规则，多个汛限水位抬高方案组成后汛期汛限水位备选方案。

2.1 后汛期汛限水位的变化区间

汛限水位最小抬高值，是从保证水库及上下游防洪安全角度确定的，因此，以水库原设计后汛期汛限水位作为最小抬高值。比如，碧流河水库后汛期汛限水位最小抬高值采用原设计值68.5 m。

汛限水位最大抬高值，是从提高水库蓄满率角度推求出的。基本理念是，针对后汛期洪水对应的主汛期洪

水量级,在不低于主汛期相应量级洪水防洪标准前提下抬高后汛期汛限水位。如表2,后汛期0.1%洪水不超过主汛期5%洪水允许泄量,以此为限逐级调节^[8]确定汛限水位最大抬高值。

基于以上分析,以水位结合入库流量做判别指标通过调洪得碧流河水库后汛期汛限水位最小与最大抬高值分别为0.4、0.9m,则汛限水位变化区间为68.5~69.0m(主汛期原设计汛限水位68.1m)。

2.2 汛限水位备选方案及其控制运用方式

上面的汛限水位最小、最大抬高值,分别称为防洪方案、兴利方案,作为后汛期汛限水位2个基本备选方案;其它方案可在这2个方案确定的汛限水位区间内,内插多个起调水位以权衡防洪与兴利关系。以碧流河水库为例,在68.5~69.0m之间选择68.8m作为后汛期汛限水位权衡方案。首先,参考主汛期洪水调度规则初拟后汛期调度规则,下泄流量以不超过主汛期相应量级洪水允许泄量为限。如,后汛期0.1%洪水最大允许泄量以主汛期5%洪水允许泄量2500 m³/s为限逐级调节各频率洪水,初拟可行调度规则。然后,根据调洪结果进行人机交互以改进此规则,以能较好兼顾防洪与兴利的调度规则作为满意调度规则,如表3,相应的汛限水位抬高方案作为比较方案。

表3 防洪与兴利权衡方案(68.8m)调度规则及调洪结果

Table 3 Operation rules and results of balance program(68.8 m)

后汛期设计 洪水/%	调度规则			调洪结果		
	水位/m	判断指标 入流/(m ³ s ⁻¹)	控制出流 /(m ³ s ⁻¹)	最高水位 /m	最大泄量 /(m ³ s ⁻¹)	组合流量 /(m ³ s ⁻¹)
5	70.2	<600(600)	入流(600)	69.07	600	1250
2	(70.2, 70.5]	<1100(1100)	入流(1100)	69.80	1100	1800
1	(70.5, 70.6]	<1700(1700)	入流(1700)	70.22	1700	
0.2	(70.6, 71.0]	<2100(2100)	入流(2100)	70.92	2100	
0.1	(71.0, 71.3]	<2400(2400)	入流(2400)	71.28	2400	
0.01	(71.3, 72.6]	<3350(3350)	入流(3350)	72.55	3350	
>0.01	>72.6		入流			

2.3 后汛期汛限水位备选方案

表4列出了防洪方案、兴利方案、权衡方案及原设计主汛期汛限水位68.1m的方案。

表4 后汛期汛限水位备选方案

Table 4 Alternatives of limited water level in post-flood season for optimization

调度 方案 (1)	汛限水 位/m (2)	调节各种设计频率洪水最大下泄流量/(m ³ s ⁻¹)						调节各种设计频率洪水最高水位/m					
		5 % (3)	2 % (4)	1 % (5)	0.2 % (6)	0.1 % (7)	0.01 % (8)	5 % (9)	2 % (10)	1 % (11)	0.2 % (12)	0.1 % (13)	0.01 % (14)
主汛	68.1	400	1000	1500	1900	2200	3200	68.78	69.65	70.19	70.82	71.20	72.47
防洪	68.5	500	1100	1600	2000	2300	3300	69.03	69.78	70.22	70.92	71.27	72.54
兴利	69.0	800	1300	1800	2200	2500	3500	69.20	69.84	70.26	70.98	71.30	72.58
权衡	68.8	600	1100	1700	2100	2400	3350	69.07	69.80	70.22	70.92	71.28	72.55

2.4 备选方案效益分析

依据碧流河水库1951~1998年天然来水情况,采用长系列调节计算法^[8],研究后汛期汛限水位提高后每年洪水资源利用增量及其效益。从表5看,该方法研究成果的应用效果十分显著。

表5 碧流河水库后汛期汛限水位抬高后效益增加情况

Table 5 Added benefits due to the limited water level raised in the post-flood season of Biliuhe reservoir

调度方案 (1)	汛限水位 /m (2)	蓄水量增加 /万 m ³ (3)	供水效益 /万 m ³ (4)	发电效益 /万 kW·h (5)	直接经济效益 /万元 (6)	解决生活用水人口 /万人 (7)
主汛	68.1	0	0	0	0	0
防洪	68.5	2184	431.46	21.90	146.70	27.25
兴利	68.8	3822	757.92	38.47	257.69	47.25
权衡	69.0	4914	849.29	43.11	288.76	52.25

3 碧流河水库后汛期汛限水位方案的优选

为避免忽略一些次要因素的权重，采用多层模糊优选^[9]对上述方案进行选择。

3.1 建立方案集与指标集

表5中(4)、(5)、(6)三列数据是相关的，为避免指标重复，以(6)代表这3个指标，并结合表4，建立后汛期汛限水位方案集与指标集：方案集包括主汛、防洪、兴利、权衡方案；指标集为表4的(3)~(14)和表5的(3)、(6)、(7)相对应的指标。

3.2 应用多层多目标模糊优选模型进行分析

3.2.1 系统分层

15个指标较多，为明晰思路和便于确定指标权重，将这些指标分层考虑，如图2。

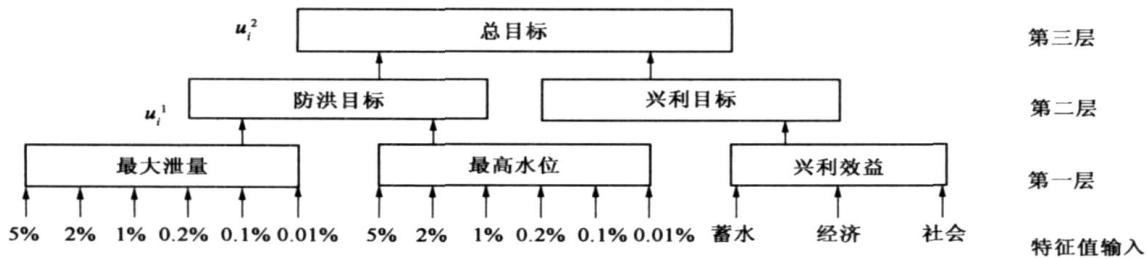


图2 汛限水位方案三层模糊优选系统

Fig. 2 Three-layer fuzzy optimal selection system of limited water level alternatives

3.2.2 计算相对隶属度向量

以第一层最高水位单元系统为例，具体计算过程如下。

(1) 确定目标值矩阵并计算目标相对优属度向量 据表4之(9)~(14)列数据建立第一层最高水位单元系统的目标特征值矩阵 G_2^1 ，为便于不同量纲指标比较，分别采用下列公式计算目标相对优属度。

$$\text{特征值越大越优} \quad r_{hj} = [g_{hj} - \min_j(g_{hj})] / [\max_j(g_{hj}) - \min_j(g_{hj})] \quad (1)$$

$$\text{特征值越小越优} \quad r_{hj} = 1 - [g_{hj} - \min_j(g_{hj})] / [\max_j(g_{hj}) - \min_j(g_{hj})] \quad (2)$$

$$\text{中间型} \quad r_{hj} = 1 - |g_{hj} - \bar{g}_h| / \max_j |g_{hj} - \bar{g}_h| \quad (3)$$

式中 r_{hj} 是目标值 g_{hj} 的优属度， $h=1, 2, \dots, m$ ； $j=1, 2, \dots, p$ ； $\max_j(g_{hj})$ 、 $\min_j(g_{hj})$ 及 \bar{g}_h 分别为相对于第 m 个目标 p 个方案值中最大、最小及最优值。其中当目标特征值变化范围较大时，采用式(1)、式(2)计算；反之采用式(3)计算。由表4，库水位指标值相差较小，因此采用式(3)计算目标优属度 R_2^1 。

(2) 确定权重并计算方案优属度向量 将各指标取相同权重，利用模糊分化矩阵计算模型^[9]分别计算第 j ($j=1, 2, \dots, p$) 个方案隶属于优等方案程度：

$$U_2^1 = (u_1, u_2, \dots, u_p) = (1.0000, 0.6402, 0, 0.5764) \quad (4)$$

式(4)作为第二层指标优属度进一步优选。表4中兴利方案的调洪最高水位都最高，在相对比较时可认为该方案对防洪最不利。

3.2.3 方案优选结果

分别计算其它单元系统的方案优属度，如表6所示。

表6 方案优选结果

Table 6 Results of alternative optimal selection

分层	单元系统	权 重	方案优属度			
			主汛期	防洪	兴利	权衡
第一层	最大泄量	6个指标权重均取0.1667	1.0000	0.8409	0.0000	0.5506
第一层	兴利效益	3个指标权重均取0.3333	0.0000	0.4828	1.0000	0.9694
第二层	防洪目标	2个指标权重均取0.5000	1.0000	0.8783	0.0000	0.6250
第二层	兴利目标	仅有一个指标, 取1.0000	0.0000	0.4656	1.0000	0.9990
第三层	总目标	2个指标权重均取0.5000	0.5000	0.7668	0.5000	0.9080

注: 最大泄量单元系统目标值优属度按式(3)计算, 其它按式(1)计算; 下一层方案优属度作为上一层指标优属度计算。

从表6看出, 兴利效益单元系统的主汛期68.1 m方案较差, 在表4中该方案效益最小, 对兴利最不利; 总目标单元系统中将防洪与兴利取等权重后, 权衡方案明显优于其它方案, 表4中权衡方案各指标值在其它方案之间, 兼顾了防洪与兴利, 总体较优。

3.3 不同权重下的优选结果

结合决策人偏好, 若侧重考虑常遇洪水(5%、2%)与设计洪水(0.2%), 则 $W_1^1 = W_2^1 = (0.2000, 0.2000, 0.1333, 0.2000, 0.1333, 0.1333)$, 并根据防洪与兴利的侧重点不同可得表7结果。

表7 不同目标权重下的优选结果

Table 7 Results of optimal selection under the different objective weights

不同目标的权重		各方案的优属度			
防洪目标	兴利目标	主汛期方案	防洪方案	兴利方案	权衡方案
0.3	0.7	0.1552	0.5336	0.8448	0.9635
0.4	0.6	0.3077	0.6240	0.6923	0.9212
0.5	0.5	0.5000	0.7260	0.5000	0.8558
0.6	0.4	0.6923	0.8167	0.3077	0.7712
0.7	0.3	0.8448	0.8819	0.1552	0.6844

从表7看出: 总体变化趋势合理, 即随着防洪目标权重从0.3增加到0.7, 防洪方案优属度逐步增大, 兴利方案与权衡方案的优属度逐渐减小; 由于兼顾了防洪与兴利, 权衡方案在兴利目标权重不小于0.5时都优于其它方案; 只有决策者偏重于防洪目标, 即权重大于0.5时, 防洪方案才优于其它方案。因此, 一般情况下推荐权衡方案; 只有在侧重防洪时, 才推荐防洪方案。

若不对兴利效益系统指标简化, 经计算, 表6及表7计算结果略有变化, 但不影响以上结论。

4 结 论

本文结合北方后汛期洪水特点, 以碧流河水库为例, 经优化和优选推求后汛期汛限水位满意方案。

(1) 通过优化推求后汛期汛限水位备选方案。针对后汛期汛限水位变化区间内每一抬高的汛限水位, 参考主汛期洪水调度规则, 先制定一套初始规则, 在规则可行的基础上, 通过人机交互对规则不断改进, 直到满意为止。多个汛限水位抬高方案组成后汛期汛限水位备选方案供下一步优选。

(2) 多个汛限水位备选方案的分层模糊优选。将汛限水位调度方案涉及的指标层次化, 采用分层模糊优选法对调洪计算结果进行选择, 并讨论了不同权重下的优选结果, 最后根据碧流河水库实际情况, 选择防洪与兴利权衡方案作为推荐方案。

与传统方法相比, 该方法综合考虑了防洪与兴利间需求, 并且将待选方案的多个指标分层考虑, 更易于描述决策人的经验, 可为确定后汛期汛限水位及控制运用方式提供科学依据。

参考文献:

- [1] 肖义, 郭生练, 刘攀, 等. 分期设计洪水频率与防洪标准关系研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(1):54-60. (XIAO Yi, GUO Sheng-

- lian , LIU Pan , et al. Seasonal flood frequency analysis and flood prevention standard[J]. Advances in Water Science , 2008 , 19(1) : 54-60. (in Chinese))
- [2] 方彬 , 郭生练 , 肖义 , 等. 年最大洪水两变量联合分布研究[J]. 水科学进展 , 2008 , 19(4) :505-511. (FANG Bin , GUO Sheng-lian , XIAO Yi , et al. Annual maximum flood occurrence dates and magnitudes frequency analysis based on bivariate joint distribution[J]. Advances in Water Science , 2008 , 19(4) : 505-511. (in Chinese))
- [3] 邹鹰. 分期设计洪水标准计算方法研究[J]. 水文 , 2007 , 27(2) :54-56. (ZOU Ying. A method of estimating stage design floods during flood season[J]. Journal of China Hydrology , 2007 , 27(2) :54-56. (in Chinese))
- [4] 刘攀 , 郭生练 , 肖义 , 等. 水库分期汛限水位的优化设计研究[J]. 水力发电学报 , 2007 , 26(3) :5-10. (LIU Pan , GUO Sheng-lian , XIAO Yi , et al. Study on the optimal reservoir seasonal flood control water level[J]. Journal of Hydroelectric Engineering , 2007 , 26(3) :5-10. (in Chinese))
- [5] RUAN Y , VIJAY P S. Multiple duration limited water level and dynamic limited water level for flood control , with implications on water supply [J]. Journal of Hydrology , 2008 , 354(1/2/3/4) : 160-170.
- [6] 陈雷. 深入贯彻落实科学发展观 扎实做好新形势下的防汛抗旱工作[J]. 中国防汛抗旱 , 2009(1) : 1-6. (CHEN Lei. Thoroughly applying the scientific outlook on development , under the new situation of flood control and drought relief[J]. China Flood & Drought Management , 2009(1) : 1-6. (in Chinese))
- [7] CAO Yong-qiang , HAN Yan , WANG Ben-de. Study on control scheme of reservoir limited water level based on water supply risk[C]// 2008 International Conference on Wireless Communications , Networking and Mobile Computing , WiCOM 2008. [S. l.] : IEEE , 2008 :1-4.
- [8] 王本德 , 周惠成 , 王国利 , 等. 水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用[M]. 北京 : 中国水利水电出版社 , 2006 : 72-73 , 188-214. (WANG Ben-de , ZHOU Hui-cheng , WANG Guo-li , et al. Theory , method and application of reservoir normal elevation dynamic control in flood season[M]. Beijing : China WaterPower Press , 2006 : 72-73 , 188-214. (in Chinese))
- [9] 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 : 28-41 , 268-269. (CHEN Shou-yu. Theories and methods of variable fuzzy sets in water resources and flood control system[M]. Dalian : Dalian University of Technology Press , 2005 : 28-41 , 268-269. (in Chinese))

Decision-making on reservoir flood control level and its control manner in post-flooding seasons for Biliuhe Reservoir^{*}

ZHOU Hui-cheng , WANG Fu-xing , LIANG Guo-hua

(School of Civil and Hydraulic Engineering , Dalian University of Technology , Dalian 116024, China)

Abstract : Due to the characteristics of flood in regions in North China , it is difficult to determine the flood prevention standard after dividing the whole flood season into sub-seasons. This study develops alternatives for the reservoir's limited water level in post-flood seasons through optimization based on the three angles : the flood prevention , flood utilization and the balance between them. A multilayer fuzzy optimal selection model is established by coordinating the complex relationship among the multi-objectives. The proposed method is applied to Biliuhe reservoir and raises the limited water level in post-flood seasons without decreasing the flood prevention standard. The results show that it can provide technical support for the decision-making and be applied to those reservoirs in the water shortage regions in North China.

Key words : division of flood season ; optimization techniques ; limited water level ; fuzzy set theory ; reservoir

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50809011).