

水库防洪风险预警与生态调度的研究及应用

万芳¹,王明闪²,韩宇平¹,柴启辉¹,肖凌峰¹

(1.华北水利水电大学 水资源学院,郑州 450046;2.河南省地质矿产勘查开发局 第二地质环境调查院,郑州 450012)

摘要:水库防洪调度具有不确定性和实时性,何时何量下泄洪水不仅关系到防洪安全,而且对生态保护也是巨大挑战.为此提出水库防洪调度风险预警指标,在不同洪水级别下,确定合理的生态流量及生态保护策略;在分析水库防洪操作规线的基础上,将洪水实时入流情况与水库目前水位相结合,同时考虑未来洪水情势,对洪水进行监测.通过对现状洪水指标和未来6小时内洪水情势进行分析,在汛期不同阶段,确定防洪与生态调度之间的重要性顺序.以黄河上游龙羊峡水库、刘家峡水库联合防洪调度为研究对象,通过防洪预警的研究及应用,确定水库防洪调度风险程度指导多目标水库防洪、生态调度,为保障黄河安澜提供决策支持,对于支撑黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义.

关键词:防洪调度;生态保护;洪水预警指标;模糊集理论;黄河上游

中图分类号:TV697.1

文献标志码:A

我国水资源短缺、供需矛盾加剧以及洪涝灾害频繁共存,如何既保证防洪安全又较大限度地利用洪水资源,兼顾防洪与生态功能,完善水库防洪安全保障体系,是目前国内外学者关注的热点问题.同时考虑风险因素之间也可能具有复杂的联系,如何在现有风险估计方法的基础上,对风险程度进行预警,实现防洪与兴利联合调度,在确保生态用水的情况下,充分利用洪水,多水联调、循环利用、节约高效、合理配置河道生态用水水源,目前仍是研究难题.在风险预警方面研究较多的有洪水预警^[1-6]及干旱预警^[7-13],其中刘招等^[1]应用遗传算法对洪水进行预警;顿晓晗等^[2]利用长系列历史实测径流资料的防洪库容频率曲线对溪洛渡、向家坝、三峡水库进行防洪联合调度,分析三峡水库汛期不同时段实时防洪风险;TUNCOK^[3]应用洪水相应机制,估算土耳其和希腊边界的跨界河流流域系统的不同超越概率的极值流量;BLÁZQUEZ等^[4]从政策及立法角度,提出通过利益相关者的参与基于自然的解决方案以减轻洪水风险;姜丽等^[5]设置不同的未来极端洪水情景,以时空演变模拟为基础,对杭州湾北岸的洪涝风险进行评估.而在干旱预警等方面的研究也较多,其中魏小村等^[7]基于DPSIR模型对西北干旱风沙区旅游生态安全进行预警研究;文献^[8]从地理、气候学角度研究了中国西北玉米干旱的灾害预警,建立了干旱灾害风险预警模型,预警干旱灾害的玉米在生长阶段的表现程度;文献^[9]结合降水与地下水关系,研究了干旱预警系统,为灌区抗旱管理提供依据.

近年来,针对水库群优化调度的研究越来越多,为优化调度方案的制定提供了良好的理论技术支撑.但水库防洪预警与生态联合考虑的研究进展缓慢,且大多都只关注某部门或某几个部门的调度风险,难以真实完整地考虑水库群这一复杂大系统各目标间防洪与生态保护内在的联系及相互影响、难以明晰其转变的规律,以及面临不确定性水文条件的变化.因此研究基于风险评估的防洪系统风险预警机制,兼顾洪水资源利用及保证生态用水,对于提高调度方案的可操作性具有重要的意义.

黄河上游水库群的建设虽然以发电为主,但防洪、防凌、生态保护仍是其主要任务之一.自从龙羊峡水库和刘家峡水库兴建以后,黄河上游梯级水库群的防洪运行已经形成了龙羊峡和刘家峡两大水库联合调度的格局.黄河上游防洪对象的任务是通过龙羊峡、刘家峡两库联合调度实现的,龙、刘两库联合防洪度汛的任务

收稿日期:2021-08-31;修回日期:2022-01-10.

基金项目:国家自然科学基金(51679089);河南省重大科技专项(201300311400);河南省自然科学基金(222300420491).

作者简介(通信作者):万芳(1982-),女,河南信阳人,华北水利水电大学副教授,博士,研究方向为水库群优化调度,

E-mail:121521947@qq.com.

为:在确保龙羊峡、刘家峡水库大坝自身安全的前提下,保证下游已建水电站和兰州市的防洪安全以及下游河道的生态用水.本文以黄河上游龙、刘水库联合防洪调度为研究对象进行防洪预警与生态联合调度的研究及应用.

1 洪水预警指标(Flood Alert Index,简称 FAI)计算

在降雨确定的前提条件下,对洪水预警及采取相应应急措施并不困难,但来水具有不确定性,因此洪水预警模型的研究有着现实意义及应用前景.洪水预警主要应用于在随机水文条件下对洪水进行监测,判断发生洪涝灾害的可能性并用不同的预警灯号表明其灾害程度,并采取相应应急措施,减少人员伤亡及经济损失.其中洪水风险预警模型过程如图 1 所示,主要包括洪水监测、洪水情势分析、决策分析几部分.

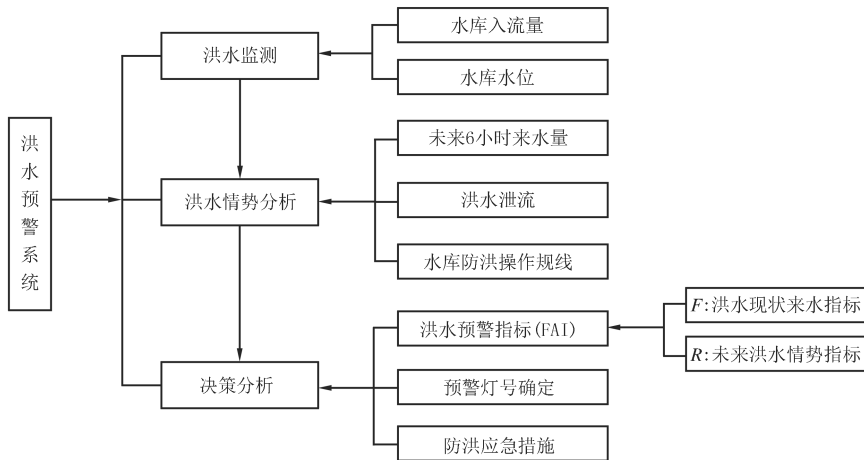


图1 水库防洪预警系统流程图

Fig.1 The flow chart of early warning system for reservoir flood control

1.1 洪水监测

对于无法明确划分的物理量(洪水程度)可用模糊集理论^[12]中模糊隶属度函数建立评估集,进行模糊变化,以针对各不同洪水影响因子独立评估其洪水影响程度.应用模糊综合评价决策对洪水现状来水指标 F 进行分析,将影响洪涝灾害的因子作为指标集 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$: u_1 下泄量, u_2 水库水位, u_3 洪峰值, u_4 暴雨来水历时, u_5 来水强度, u_6 可洪水资源化的水量;产生洪水灾害的等级作为评判集 $v_j (j = 1, 2, \dots, m)$: v_1 无影响, v_2 轻度影响, v_3 中度洪灾, v_4 严重灾害, v_5 特严重灾害.模糊关系 R_f 为: $R_f(u_i, v_j) = f(u_i)(v_j) = r_{ij}$, 对于权重 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$, 取 max-min 合成运算, 可得综合评判 B :

$$B = Q \circ R, \tag{1}$$

其中 R 为模糊矩阵,

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

用指标 F 来量化水库现状洪水程度 ($F = 1, 2, \dots, 5$): $F = 1$ 为无影响; $F = 2$ 为轻度影响; $F = 3$ 为中度洪灾; $F = 4$ 为严重灾害; $F = 5$ 为特严重灾害.

用 A 表示洪水指标的重要参数, E 为评价集, 表示洪水评估类别.

$$A = [A_1, A_2], \tag{3}$$

$$E = [E_1, E_2, E_3, E_4, E_5], \tag{4}$$

式中, $A_1 = P_t, A_2 = I_t, P_t$ 表示水库现状蓄水情况, I_t 表示暴雨来水情况. E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 : 洪水影响程度非常低、较低、中等、严重、非常严重.

令 $\mu_j(A_i)$ 表示 A_i 对相关联的模糊集 E_j 的隶属函数,其中 $\mu_j(A_1)$ 和 $\mu_j(A_2)$ 分别根据洪水空间在供水上限规则曲线上方和来水频率定义.在本文中,隶属函数由试凑法和实际经验生成, $\mu_j(A_i)$ 为正规化的隶属函数,满足 $0 \leq \mu_j(A_i) \leq 1$.属性 A_1 和 A_2 的梯形隶属函数 $\mu_j(A_i)$ 分别如图 2 和 3 所示.图 2 中 α 表示供水规线的高程, β 表示 α 上方的防洪空间.

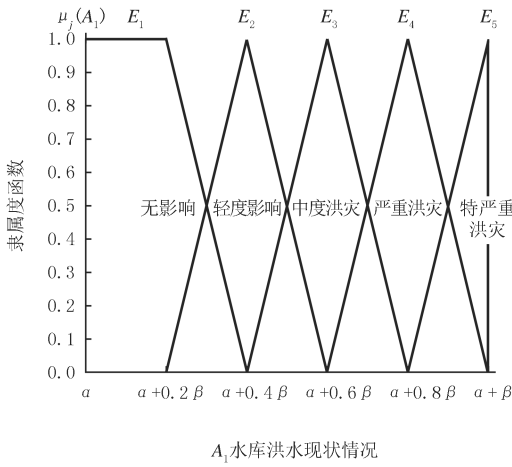


图2 水库洪水现状情况的隶属函数

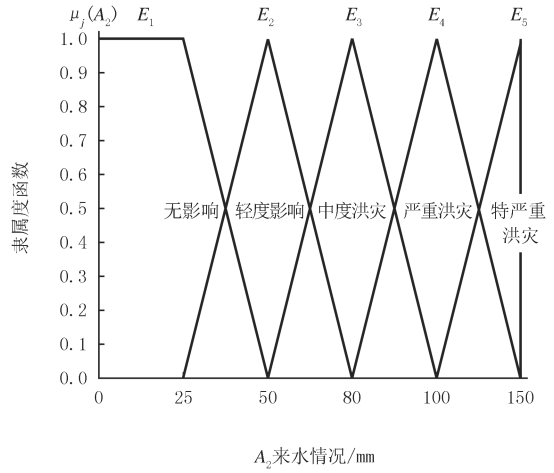


图3 暴雨来水情况的隶属度函数

Fig.2 The membership function of reservoir flood status

Fig.3 The membership function of storm inflow

建立决策矩阵 D :

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

其中, d_{ij} 表征属性 A_i 与模糊集 E_j 的关系 ($i=1,2; j=1,2,\dots,5$).

建立各属性相对重要性之间的加权平均判断向量 (G), 即:

$$G = wD = (g_1, g_2, g_3, g_4, g_5). \tag{6}$$

其中 $w = [w_1, w_2]$ 为属性提供了一组分配的权重.本文中,下泄将每小时调整一次.假设属性 A_1 与属性 A_2 的比值是剩余的防洪空间 ($K - S_t$) 与前一小时的平均流入流量 $\left(\frac{I_{t-1} + I_1}{2} \Delta t\right)$ 的比值.权重随时间而变化.如果防洪空间占入库流量的比例较大,则 A_1 属性对洪水监视状态的影响较大,例如在小洪水情况下,事件发生时的入库流量较小.从(6)式中可知, g_i ($i=1,2,3,4,5$) 为加权平均判断向量,则 F 为洪水现状 ($F=1,2,3,4,5$),应用 $\sum_{i=1}^F g_i > 0.5 > \sum_{i=1}^{F-1} g_i$ 来表示洪水现状观测状态.

1.2 洪水情势分析

由于降雨等水文条件的不确定性,决策者很难确定洪水程度及应急措施,本文主要考虑影响洪水情势的 3 个因素:(1)可能的降雨雨型;(2)估计的入流曲线及降雨频率分析;(3)洪水调度规线.

洪水未来来水情势与水库现状蓄水和水库未来暴雨都息息相关.由于降雨受不确定因素影响较大,将会影响决策者对未来洪水灾害的正确评估.因此,根据未来 6 小时不同的暴雨类型及洪水量 (Q_F),制定水库未来洪水情势,从而量化水库产生洪涝灾难程度,不同程度指标见表 1 所示.

表 1 未来洪水情势指标 R 的确定

Tab. 1 Determination of index R of future flood situation

指标 R	1	2	3	4	5	6
未来洪水情势	$Q_F \leq Q_5$	$Q_5 < Q_F \leq Q_{10}$	$Q_{10} < Q_F \leq Q_{25}$	$Q_{25} < Q_F \leq Q_{50}$	$Q_{50} < Q_F \leq Q_{100}$	$Q_F > Q_{100}$

注: Q_T 表示 T 年重现期的洪水量.

1.3 决策分析

在建立洪水现状监测指标 F 和未来洪水情势指标 R 的基础上,应用信息熵的原理,确定洪水预警灯号

数及预警指标 FAI.

1.3.1 洪水预警灯号的确定

洪涝灾害的发生是一个随机事件,若把洪水现状来水指标 F 和未来洪水情势指标 R 看作两个离散随机变量,本文应用信息熵^[14]来描述其不确定性.一个信息源发出什么符号是不确定的,衡量它可以根据其出现的概率来度量,概率大,出现机会多,不确定性小;反之,概率小,出现机会少,不确定性就大.因此应用信息熵对洪水出现概率进行描述,即洪水预警灯号.不确定性函数 f 是概率 p 的减函数,两个独立符号所产生的不确定性等于各自不确定性之和,即:

$$f(p_1, p_2) = f(p_1) + f(p_2). \tag{7}$$

同时满足这两个条件的函数 f 是对数函数,即:

$$f(p) = \text{lb} \frac{1}{p} = -\text{lb} p. \tag{8}$$

在信息熵中,考虑的不是某一个时间发生的不确定性,而是要考虑这个信息源所有可能发生情况的平均不确定性.若信息源有 n 种取值: $x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$, 每种状态对应概率为: $p_1, \dots, p_i, \dots, p_n$, 此时,不确定事件 x 的信息熵 $H(x)$ 表示为:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p_i \text{lb}(p_i). \tag{9}$$

当系统概率为等概率时,则 $p_i = \frac{1}{n_0}$, 将其带入(8)式中得 $H(x)$ 为:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n_0} \text{lb}\left(\frac{1}{n_0}\right) = \text{lb}(n_0). \tag{10}$$

对于相关联的事件 x, y , 其不确定性可表示为 $H(x, y)$:

$$H(x, y) = - \sum_{i=1}^n p_{ij} \text{lb}(p_{ij}), \tag{11}$$

式中, p_{ij} 为相关联事件 x, y 共同作用下的状态出现概率,文中指来水现状状况指标 F 和未来洪水情势指标 R 共同作用下洪涝影响程度,例如: $H = 0$ 是一个确定事件; $H = 1$ 指事件具有两面性,像投硬币一样; $G = 2.58$ 像一个骰子,认为一个整数($G + 1$) 是一个合适的洪水预警灯号个数. n_F, n_R 分别为现状和未来情况下洪水灾害的可能性,其中 $n_F = 5, n_R = 6$, 因此,有 30 种可能的结果. $G(x, y)$ 即为近似的预警灯号数,故设定为 3 个预警灯号,其中,灯号(m_0) 分别表示为: 绿灯(Green 无影响);黄灯(Yellow 中度洪灾);红灯(Red 重度洪灾).

1.3.2 洪水预警指标的计算

在洪水预警系统的研究中,洪水灾害风险是洪水现状来水指标 $F(F = 1, 2, \dots, 5)$ 与洪水未来情势指标 $R(R = 1, 2, \dots, 6)$ 的综合作用影响下结果,所以 FAI 不仅与 F, R 有关,且 R 应占有更大的比重,故 FAI 可表示为:

$$FAI = \log_{n_F}(F) + k \log_{n_R}(R), \tag{12}$$

式中, $n_F = 5, n_R = 6, F = 1, 2, \dots, 5, R = 1, 2, \dots, 6$, 故 $0 \leq FAI \leq k + 1, k$ 为非负整数($k \neq 1$). FAI 在不同区间表示不同的灯号,设定 FAI 的判断上限(ul) 为:

$$ul = k \frac{i - 1}{m_0 - 1} + 1, (i = 1, 2, \dots, m_0; m_0 = 3). \tag{13}$$

当 $k = 2$ 时, FAI 在不同区间的预警信号为: $0 \leq FAI \leq 1$ 为绿灯(G); $1 < FAI \leq 2$ 为黄灯(Y); $2 < FAI \leq 3$ 为红灯(R).

$$FAI = f(F, R | P_i) = \log_5(F) + 2\log_6(R). \tag{14}$$

将不同的 F, R 组合代入(11)式,并结合 FAI 灯号区间得到表 2(灯号预警分类).

1.4 不同级别洪水的生态响应机制

水库以安全行洪为根本,以生态修复为载体,以生态经济为导向,进行防洪与生态的协同调度.①当出现绿灯(G)预警时,适当考虑水库的滞洪与蓄洪作用,以洪水资源化的同时,满足适宜生态流量;②当出现黄灯

(Y)预警时,根据上游水库的运用情况,采取相应的调度及下泄方式;③当出现红灯(Y)预警时,确保防洪工程安全,视洪水情况,合理运用水库群的滞洪能力,减少淹没损失,兼顾洪水资源利用及下游河道的生态保护.

表 2 水库 FAI 预警灯号分类

Tab. 2 Classification of reservoirs FAI warning lights

洪水现状 F	未来洪水情势 R					
	$1(Q_F \leq Q_5)$	$2(Q_5 < Q_F \leq Q_{10})$	$3(Q_{10} < Q_F \leq Q_{25})$	$4(Q_{25} < Q_F \leq Q_{50})$	$5(Q_{50} < Q_F \leq Q_{100})$	$6(Q_F > Q_{100})$
1(无影响)	G	G	Y	Y	Y	Y
2(轻度影响)	G	Y	Y	Y	R	R
3(中度洪灾)	G	Y	Y	R	R	R
4(严重洪灾)	G	Y	R	R	R	R
5(特严重洪灾)	G	Y	R	R	R	R

2 实例分析

2.1 研究对象

本文以黄河上游已建水库龙羊峡、刘家峡两座水库为研究对象,龙羊峡位于青海共和县境内的黄河上游,上距黄河发源地 1 684 km,下至黄河入海口 3 376 km,是黄河流经青海大草原后,进入黄河峡谷区的第一个峡谷.龙羊峡水库位于刘家峡水库以上黄河干流的青海境内,属于多年调节水库,有效库容 193.5 亿 m^3 ,控制水量占黄河入海水量的 42%,在黄河流域防洪和水资源利用中具有重要的地位;刘家峡水库位于青海与甘肃交界处,距离兰州市 75 km,总库容为 57 亿 m^3 ,属于年调节水库.其对宁蒙河段的防洪防凌有着重要影响,黄河宁蒙河段主要洪水来自上游青海省吉迈至唐乃亥和青海省循化至兰州两个河段之间,黄河上游气流强烈,降雨多、雨强大,洪水多发生在 7 至 9 月份,因此对黄河上游洪水进行预警对宁蒙河段乃至整个黄河都具有重大意义.其中黄河流域水库位置图及黄河上游龙羊峡、刘家峡的位置如图 4 所示;水库的特征水位及特征参数如表 3 所示;水库水位~库容关系如表 4 所示;各库月末限制水位如表 5 所示.

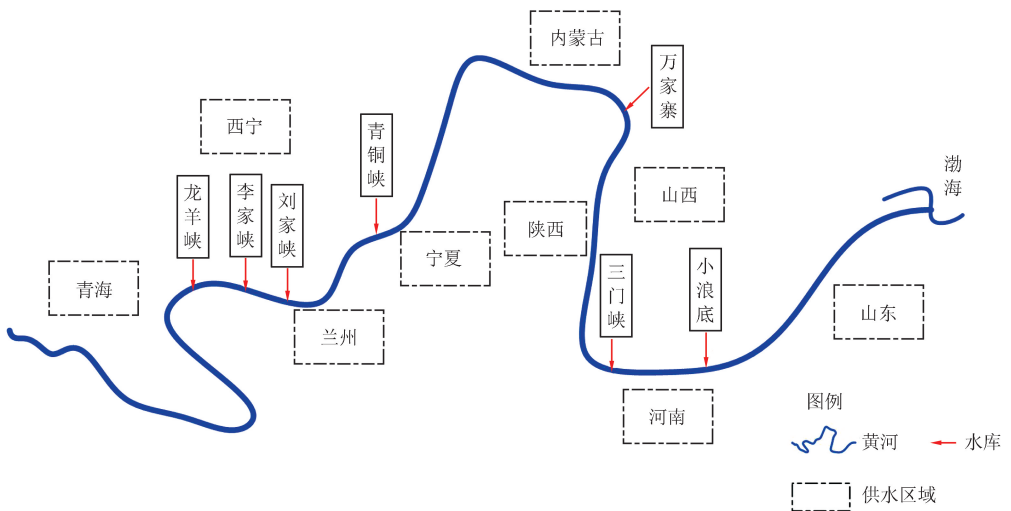


图4 研究区域位置图

Fig.4 Location map of study area

黄河上游流域面积广大,较大洪水的出现必须要有大尺度天气系统所形成的长历时、大面积连续降雨,洪水特性是暴雨特性在地面条件下的反映.黄河上游洪水特性为:涨落缓慢,历时较长,一次洪水过程平均 40 d 左右;洪水大都为单峰型,峰量关系较好.黄河上游大水多出现在 7 月和 9 月.在实测的较大洪水中,洪峰

出现在 9 月份的占 40%,出现在 7 月份的占 30%。一般来说,7 月份洪水峰型尖瘦,9 月份洪水峰型较胖.原因是 7 月份气温较高,气流辐合强烈,雨强较大而历时相对 9 月洪水较短;9 月份南下冷空气逐渐增强,且较稳定,容易出现雨强不大但历时较长的连阴雨天气.龙羊峡~刘家峡区间在黄河上游属相对干旱地区,以局部暴雨为主,形成的洪水过程一般在一天左右.龙羊峡~刘家峡区间设计洪水洪峰流量复核成果见表 6.

表 3 黄河流域上游龙羊峡、刘家峡的特征水位

Tab. 3 Characteristic water levels of Longyangxia reservoir and Liujiaxia reservoir in the upper reaches of the Yellow River basin

水库	死水位/m	正常蓄水位/m	汛限水位/m	校核洪水水位/m	总库容/亿 m ³
龙羊峡	2 530	2 600	2 594	2 607	274
刘家峡	1 696	1 735	1 727	1 738	57

表 4 黄河流域上游龙羊峡、刘家峡的水位~库容关系

Tab. 4 The relationship between water level and reservoir capacity of Longyangxia reservoir and Liujiaxia reservoir in the upper reaches of the Yellow River basin

龙羊峡	水位/m	2 530	2 540	2 550	2 560	2 570	2 580	2 590	2 600	2 610
		库容/亿 m ³	53.45	72.13	93.36	117.78	145.29	176.06	210.11	246.98
刘家峡	水位/m	1 701	1 705	1 710	1 715	1 720	1 725	1 730	1 735	
		库容/亿 m ³	10.98	13.32	16.88	20.86	25.47	31.19	37.45	43.83

表 5 各库月末限制水位

Tab. 5 Limiting water level at the end of each month

水库	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	次年 1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
	m											
龙羊峡	2 592	2 594	2 595	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 592
刘家峡	1 725	1 725	1 725	1 735	1 735	1 735	1 735	1 735	1 735	1 735	1 735	1 725

表 6 龙羊峡~刘家峡区间设计洪水成果表

Tab. 6 The table of design flood results for the interval of Longyangxia reservoir and Liujiaxia reservoir

特征值	均值	洪水频率/%					
		5	2	1	0.2	0.1	0.01
洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	220	466	576	662	860	940	1 220
日平均流量/(m ³ ·s ⁻¹)	165	347	426	488	632	693	893

2.2 计算结果及分析

龙、刘两库承担下游防洪任务,遇不同频率洪水时,龙羊峡和刘家峡水库用控制不同的下泄流量来满足各防洪对象的防洪要求.不同频率洪水龙羊峡、刘家峡水库泄流量见表 7 所示.

表 7 龙羊峡、刘家峡两库不同频率洪水控制流量

Tab. 7 The control flow with different flood frequency of Longyangxia reservoir and Liujiaxia reservoir

频率/%	5	1	0.2	0.1	0.05	0.01	PMF
龙羊峡/(m ³ ·s ⁻¹)	2 000	4 000	4 000	4 000	6 000	6 000	6 000
刘家峡/(m ³ ·s ⁻¹)	4 290	4 290	4 510	4 510	7 260	敞泄	敞泄

注:PMF 指可能最大洪水量.

在防洪过程中,根据遭遇洪水的大小,按照不同防洪对象的防洪标准与要求,逐级控制龙羊峡,刘家峡水库的泄量.当洪水流量不断增大时,按照确定的各泄量判别标准,并结合龙、刘两库的实际运行水位,逐步加大龙、刘两库的下泄流量,以保证各防洪对象所对应的不同防洪标准下的防洪安全,并确保龙羊峡,刘家峡水

库大坝安全度汛。

由于龙羊峡水库调蓄能力大,主要控制刘家峡水库、兰州站的来水量,故龙羊峡水库与刘家峡水库联合调度,对黄河兰州段防洪影响较大。刘家峡承担着兰州百年一遇的防洪任务,龙羊峡与刘家峡水库防洪联合调度中,能消减洪峰流量 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 左右,能够提高黄河的防汛能力,但仍需要对其防洪进行预警。其中洪水的现状情况及未来情势的 FAI 预警信号计算值如表 8 所示。

表 8 FAI 预警信号代表灯号

Tab.8 FAI early warning signal represents the lamp

洪水现状 F	未来洪水情势 R					
	$1(Q_F \leq Q_5)$	$2(Q_5 < Q_F \leq Q_{10})$	$3(Q_{10} < Q_F \leq Q_{25})$	$4(Q_{25} < Q_F \leq Q_{50})$	$5(Q_{50} < Q_F \leq Q_{100})$	$6(Q_F > Q_{100})$
1	G(0)	G(0.77)	Y(1.23)	Y(1.55)	Y(1.80)	Y(2)
2	G(0.43)	Y(1.20)	Y(1.66)	Y(1.98)	R(2.23)	R(2.43)
3	G(0.68)	Y(1.46)	Y(1.91)	R(2.23)	R(2.48)	R(2.68)
4	G(0.86)	Y(1.64)	R(2.09)	R(2.41)	R(2.66)	R(2.86)
5	G(1)	Y(1.77)	R(2.22)	R(2.54)	R(2.80)	R(3)

注: $0 \leq FAI \leq 1$ 为绿灯; $1 < FAI \leq 2$ 为黄灯; $2 < FAI \leq 3$ 为红灯。

以 1989 年黄河上游洪水为例,分析洪水的预警灯号,6 月 12 日至 6 月 16 日大范围的降雨导致 6 月 17 日至 6 月 23 日径流量最大达到 $265.7\ \text{mm}$,兰州站实测洪峰流量为 $5\ 670\ \text{m}^3/\text{s}$,经过龙羊峡与刘家峡水库的联合防洪调度,其实测的洪峰流量为 $3\ 530\ \text{m}^3/\text{s}$,根据(5)式计算模糊集及判断向量(G)的测量值,表明当前洪水的观测状态为“中度影响”级别(即 $F=3$)。而在未来 6 小时降雨中,龙、刘两库的联合调度,消减了兰州洪峰流量的 $2\ 140\ \text{m}^3/\text{s}$,未来的洪水等级为 $R=3$,根据(14)式及表 8 得到 $FAI=1.91$,即根据防洪早期预警,其此次洪水的预警灯号为“Y 黄色”,即为黄色预警。此时,应保证兰州断面 $350\ \text{m}^3/\text{s}$ 的生态流量。

2012 年黄河上游洪水洪峰流量大、持续时间长、洪水量大,经过龙、刘两库的调节,进入宁蒙河段的洪峰流量为 $2\ 710 \sim 3\ 520\ \text{m}^3/\text{s}$,兰州站实测洪峰流量为 $5\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$,经过龙羊峡与刘家峡水库的联合防洪调度,其实测的洪峰流量为 $3\ 670\ \text{m}^3/\text{s}$,计算得到当前洪水的观测状态为“严重影响”级别(即 $F=4$)。而在未来 6 小时降雨中,龙、刘两库的联合调度,消减了兰州洪峰流量的 $1\ 930\ \text{m}^3/\text{s}$,未来的洪水等级为 $R=3$,根据(14)式及表 8 得到 $FAI=2.09$,即根据防洪早期预警,其此次洪水的预警灯号为“R 红色”,即为红色预警。此时,应做好生态保护工作,减轻洪水对库区下游河道流量、水质以及水环境等生态影响。

应用矩形方阵对洪水预警系统准确度进行分析^[15],其分布及 1980—2018 年间水库发生不同程度洪水灾害统计情况如表 9 所示(表中数字表示发生不同级别洪水的统计次数)。

表 9 1980—2018 年间水库发生不同程度洪水灾害统计情况及矩形方阵分布表

Tab. 9 Statistics and rectangular square distribution table of reservoirs with different degrees of flood disasters during 1980—2018

(计算)预测灯号 i	实际灯号 j			$CA_i/\%$	(计算)预测灯号 i	实际灯号 j			$CA_i/\%$
	G	Y	R			G	Y	R	
G	482(*)	367(UR)	0(UR)	56.77	R	0(OR)	120(OR)	12(*)	9.09
Y	126(OR)	93(*)	8(UR)	40.97	$PA_j/\%$	79.28	16.03	60.00	

注: CA_i 指第 i 个灯号的准确度(Calculation accuracy); PA_j 指第 j 个灯号的准确度(Produce accuracy)。

此方形矩阵中,计算的预警灯号以 i 表示,实际灯号以 j 表示,其中 $i=1,2,3$; $j=1,2,3$,分别代表灯号 G, Y, R。显然当 $i=j$ 时,表明计算灯号与实际情况相符(*) ; 当 $i < j$ 时,表明计算的预测灯号过于理想化,实际的洪水程度比较高,低估误差(Underestimate rate, UR); 当 $i > j$ 时,表明计算的预测灯号过于保守,实际比预期的洪水程度轻,高估误差(Overestimate rate, OR)。

本文防洪预警的研究是根据决策者的风险偏好,做出决策。根据 1980—2018 年间水库发生洪水灾害预警结果的准确性及错估率在不同重现期的变化,绘制图 5。由于防洪预警的不确定性,产生了低估或高估误

差,为决策者防洪调度提供依据。

由图5可知,防洪预警的整体准确度均为70%以上,重现期小于20 a的低估误差较大,重现期大于20 a的高估误差较大。无论高估或低估,均由决策者的风险态度所决定。

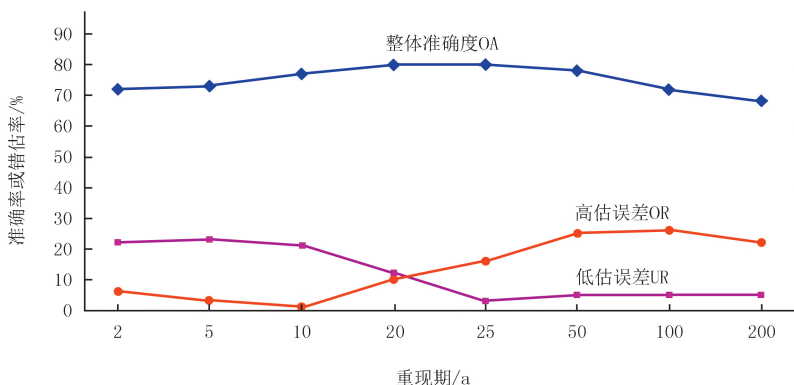


图5 水库防洪预警准确度分析

Fig.5 Accuracy analysis of early warning for reservoir flood control

3 结 语

水库洪水预警研究的不确定因素众多,由于降雨等水文条件的不确定性,决策者很难确定洪水程度及应急措施。在众多不确定性因素的合力作用下,置调度决策者于各种风险之中,如何对不确定性因素进行风险过程描述与辨识,规避水库群洪水调度决策风险,是本文关注的主要问题。在汛期,平衡防洪与生态保护间的关系是水库防洪与生态协调调度的关键。以不同的灯号对洪水进行预警,针对大洪水具有不可控性的特征,在大洪峰到来之前为合理防控风险,防洪调度应优先于生态调度以及其他调度,当大洪水处于退水阶段且蓄泄平衡点逐步下降时,可利用此时水库的下泄流量对库区淤积的泥沙实施生态调度等。以黄河流域上游龙羊峡水库及刘家峡水库联合防洪调度为研究对象,对水库防洪的风险预警及对生态的影响进行研究,以期提高黄河流域防洪管理与生态调度水平,实现黄河安澜,为黄河流域生态保护和高质量发展提供决策支持。

参 考 文 献

- [1] 刘招,黄文政,黄强,等.基于水库防洪预报调度图的洪水资源化方法[J].水科学进展,2009,20(4):578-583.
LIU Z, HUANG W Z, HUANG Q, et al. Floodwater resources utilization based on flood forecast information of reservoir operation chart [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 578-583.
- [2] 顿晓晗,周建中,张勇传,等.水库实时防洪风险计算及库群防洪库容分配互用性分析[J].水利学报,2019,50(2):209-217.
DUN X H, ZHOU J Z, ZHANG Y C, et al. Real-time flood control risk estimation of reservoir and analysis on the interoperability of storage capacity of multi-reservoir regulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(2): 209-217.
- [3] TUNCOK I K. Transboundary River Basin flood forecasting and early warning system experience in Maritza River basin between Bulgaria and Turkey [J]. Natural Hazards, 2015, 75(1): 191-214.
- [4] BLÁZQUEZ L, GARCÍA J A, BODOQUE J M. Stakeholder analysis: mapping the river networks for integrated flood risk management [J]. Environmental Science & Policy, 2021, 124: 506-516.
- [5] 姜丽,於家,温家洪,等.土地利用变化情景下杭州湾北岸极端洪灾风险评估[J].地理科学进展,2021,40(8):1355-1370.
JIANG L, YU J, WEN J H, et al. Risk assessment of extreme flood in the north bank of the Hangzhou Bay under land use change scenarios [J]. Progress in Geography, 2021, 40(8): 1355-1370.
- [6] 刘克琳,王宗志,程亮,等.水库防洪错峰调度风险分析方法及应用[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(6):43-48.
LIU K L, WANG Z Z, CHENG L, et al. Risk analysis method and application of reservoir flood peak staggered regulation [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2016, 37(6): 43-48.
- [7] 魏小村,李院堂.基于 DPSIR 模型的西北干旱风沙区旅游生态安全预警研究:以宁夏回族自治区中卫市为例[J].生态经济,2021,37(6): 134-139.

- WEI X C, LI L T. Study on early warning of tourism ecological security in northwest arid and windy sand area based on DPSIR model: taking Zhongwei City of Ningxia Hui autonomous region as an example[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(6): 134-139.
- [8] ZHANG Q, ZHANG J Q, WANG C Y, et al. Risk early warning of maize drought disaster in Northwestern Liaoning Province, China[J]. *Natural Hazards*, 2014, 72(2): 701-710.
- [9] LIU Z, HUANG W C. Drought early warning in irrigation area by integrating surface water and groundwater[J]. *Paddy and Water Environment*, 2015, 13(2): 145-157.
- [10] SPIRIDONOV V, CURIC M. A storm modeling system as an advanced tool in prediction of well organized slowly moving convective cloud system and early warning of severe weather risk[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 51(1): 61-75.
- [11] DIKSHIT A, PRADHAN B, HUETE A. An improved SPEI drought forecasting approach using the long short-term memory neural network[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 283: 111979.
- [12] 黄强, 万芳, 邱林, 等. 水库群供水调度预警系统研究及应用[J]. *水利学报*, 2011, 42(10): 1161-1167.
HUANG Q, WAN F, QIU L, et al. Early warning system of reservoirs for water supply dispatching and its application[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(10): 1161-1167.
- [13] 孙可可, 陈青青, 陈超群, 等. 基于水资源干旱指数的阿克苏绿洲干旱预警模式及其应用[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(5): 84-89.
SUN K K, CHEN Q Q, CHEN C Q, et al. A drought index-based model and its application to Aksu oasis[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(5): 84-89.
- [14] 张振海, 李士宁, 李志刚, 等. 一类基于信息熵的多标签特征选择算法[J]. *计算机研究与发展*, 2013, 50(6): 1177-1184.
ZHANG Z H, LI S N, LI Z G, et al. Multi-label feature selection algorithm based on information entropy[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2013, 50(6): 1177-1184.
- [15] 万芳, 原文林, 黄文政, 等. 基于分级预警的水库供水风险及准确度研究[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(5): 48-55.
WAN F, YUAN W L, HUANG W Z, et al. Study on risk estimation and its accuracy in early warning system of reservoir water-supply dispatching[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(5): 48-55.

Research and application of reservoir flood risk early warning and ecological dispatching

Wan Fang¹, Wang Mingshan², Han Yuping¹, Chai Qihui¹, Xiao Lingfeng¹

(1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. Second Geo-environment Survey Institute, Institute of Geo-environment Survey of Henan, Zhengzhou 450012, China)

Abstract: The uncertainty and real-time of reservoir flood control operation, when and how much flood discharged are not only related to flood control safety, but also a great challenge to ecological protection. Therefore, the early warning index of reservoir flood control operation risk is proposed in this paper. At different flood levels, reasonable ecological flow and ecological protection strategy are determined. On the basis of analyzing the operation rules of reservoir flood control, the flood inflow situation and the current reservoir level and the future flood situation are considered, to monitor the flood. Through analysing the current flood index and the flood situation in the next 6 hours, the order of importance between flood control and ecological scheduling is determined in different stages of flood season. Taking the joint flood control operation of Longyangxia reservoir and Liujiaxia reservoir in the upper reaches of the Yellow River as the research object, the flood early warning model was studied and applied. The risk degree of reservoir flood control operation is determined to guide flood control and ecological operation of multi-objective reservoirs, providing decision-making support for ensuring the safety of the Yellow River. The ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin are supported, which is of great significance.

Keywords: flood control dispatching; ecological protection; flood warning indicators; fuzzy set theory; the upper Yellow River

[责任编辑 赵晓华 陈留院]