

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.04.004

# 基于小量级降雨预报的水库汛限水位 动态控制风险分析

黄灵芝, 李守义, 司 政

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 建立基于降雨预报的汛限水位动态控制风险模型,以定量评估动态控制给水库防洪管理带来的风险。统计分析了“无雨”或“小雨”预报的精准性,建立了考虑“无雨”或“小雨”漏报、校核洪水发生的频率、汛限水位控制值域、洪水调度方式等条件下的汛限水位动态控制风险模型,并以近似的频率分布曲线族替代概率分布函数进行模型求解。以汉中市石门水库为例,分析了石门水库的蓄泄能力,提出了流域24小时预报“无雨”时抬高汛限水位至617.5 m,预报“小雨”时抬高至617.0 m,且“无雨”或“小雨”漏报时采用动态控制的调度方式,其最高洪水位超过水库设计洪水位的理论风险均在可接受范围内。汛限水位动态控制可有效提高雨洪资源的利用率,建立基于降雨概率的调度风险分析模型可定量估计可能发生的风险,为决策者提供参考依据。

**关键词:** 降雨预报; 汛限水位; 动态控制; 风险

**中图分类号:** TV697.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2018)04-0401-06

## Risk analysis of the dynamic control of reservoir flood limited level based on small scale rainfall forecast

HUANG Lingzhi, LI Shouyi, SI Zheng

(School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The risk control model for the dynamic control of flood limited level based on rainfall forecast is established to quantitatively evaluate the risks brought by dynamic control by which to reservoir flood control management. The paper analyzes the precision of “no rain” or “light rain” forecast, and establishes the risk model for the dynamic control of flood limited level under the conditions of considering the missing report of “no rain” or “light rain”, checking the frequency of flood, flood control level range, flood regulation mode and so on, with the model solved by using the approximate frequency distribution curve instead of the probability distribution function. Taking the Shimen Reservoir in Hanzhong City as an example, this paper analyzes the storing and discharging capacity of Shimen reservoir, suggesting that according to the dispatching mode watershed 24 hours forecast “no rain” can raise the flood limited water level to 617.5 m, that forecast “light rain” can be raised to 617.0 m, that “no rain” or “light rain” omission when using dynamic control, and that the risk of the maximum flood level exceeding the reservoir design flood level is acceptable. The dynamic control of flood limited level can effectively improve the utilization rate of rainwater resources, establishing a dispatching risk analysis model based on rainfall probability can quantitatively estimate the possible risks and provide reference for decision makers.

**Key words:** rainfall forecast; flood limited level; dynamic control; risk

收稿日期: 2017-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51609200, 51879217); 陕西省水利厅科技计划资助项目(2014slkj-16)

作者简介: 黄灵芝, 女, 讲师, 博士, 研究方向为水工结构及水库调度安全等。E-mail: hlzsz@126.com

汛限水位的动态控制是洪水资源化的一种方式<sup>[1]</sup>。我国大部分水库兴建于上世纪五、六十年代,当时洪水灾害严重,因此,防洪安全作为兴建和运行水库的主要依据之一,大部分水库采用固定的汛限水位,即:洪水季节一旦水库库水位超过汛限水位,则尽快宣泄汛限水位以上的水库蓄水,严格保证库水位在设计汛限水位以下,从而预留出较大的防洪库容应对可能出现的设计洪水和校核洪水。但是随着社会的发展,水资源短缺问题日益加剧,汛期不蓄水,汛后却又往往无水可蓄,导致水库常年只能低水位运行,尤其对于北方地区的水库,汛期以后的来水量明显减少,所以汛后往往很难再蓄上水,库水位甚至低于正常蓄水位,严重影响了水库的兴利,造成了在水库调度中防洪与兴利的矛盾<sup>[2]</sup>。

为了更好地解决上述矛盾,实现洪水资源化,很多专家和学者进行了汛限水库动态控制研究,即在确保水库防洪安全的前提下,建立在一定预见期内的汛限水位上下控制的约束域,合理调节水库防洪与兴利库容。冯平等<sup>[3]</sup>依据风险决策理论,结合概率组合的方法计算了提高岗南水库汛限水位可能导致的防洪风险。郭生练等<sup>[4-6]</sup>建立了基于“大系统聚合思想”的梯级水库长期优化调度图模型,采用逐次优化法优化得到清江梯级水库汛限水位动态控制方案。袁晶瑄等<sup>[7]</sup>则以白龟山水库为计算实例,建立了以全区累积净雨为主要决策指标的预报调度模式,并定量计算了该调度模式下的防洪风险。曲寿飞等<sup>[8]</sup>以单一水库汛限动态控制的成果为基础,提出建立有冲突的多目标群决策模型来获取水库群汛期水位动态控制决策“满意”解的设想。何晓燕等<sup>[9]</sup>提出了水库汛限水位动态控制风险的概念,确定了大坝安全风险率,并重点给出该风险率的评估指标体系。王本德等<sup>[10]</sup>针对丹江口水库利用贝叶斯定理分析了其流域降雨预报的精确性,并建立了基于分级预报的防洪优化调度方案。王通等<sup>[11]</sup>采用Fish最优分割法、峰量综合控制法,分别推求了龙角山水库在前汛期、主汛期、后汛期应实施的不同汛限水位,以最大程度地多蓄水,充分利用雨洪资源。谭乔凤等<sup>[12]</sup>从上游入库洪水的不确定性描述出发,以不同的地区组成方式作为下游水库汛限水位动态控制域求解的输入,求解下游水库汛限水位控制的上限值。学者们主要在建立动态控制调度方案和分析动态控制造成的风险方面进行了很多有益的尝试,试图借助各种数学理论或模型来刻画并评价这种风险调度模式。但由于洪水发生的随机性太强,影响因素众多,考虑全部影响因子则数学模型特别

复杂,求解困难;部分考虑则又难以保障分析结果的准确性。因此,本文提出按可能洪水的量级将其分解为不同模型,本篇论文主要针对小量级降雨导致洪水的情况。

事实上,水库遭遇超设计或校核标准洪水只是偶发事件,大多数情况下的小量级降雨并不会对水库造成安全威胁,实施动态控制是完全可行的。本文建立了24小时“无雨”或“小雨”预报下实施汛限水位动态控制的风险模型,为决策者在小量级降雨预报下实施动态调控提供参考。

## 1 基于降雨预报信息的汛限水位动态调控

### 1.1 利用降雨预报实施汛限水位动态控制的可行性

随着天气学、动力学、统计学等基础学科的发展,基于大气环流与天气形势数值分析以及卫星、雷达等先进工具观测成果所预报的一定预见期内的降雨量级是基本可靠的,或者说即使降雨天气预报有一定偏差,但是已经具有一定的可信度,甚至分级预报信息已达到可利用程度。尤其针对面临时刻若预报未来24h或48h“无雨”,则遭遇校核标准洪水或下游防洪标准的可能性趋于零。刘招等<sup>[13]</sup>对国内大连碧流河、吉林丰满、河南白龟山、湖北丹江口等4座水库库区气象站“无雨”预报时实际降雨的概率进行了统计分析,结果表明,未来24h“无雨”预报后发生漏报降雨的频率约20%,但发生大量级降雨的概率极小。其中,漏报后降小雨及以上( $\geq 10$  mm)频率为2%,降中雨及以上( $\geq 25$  mm)频率约0.5%,降暴雨及以上频率则仅约0.1%。即使漏报后出现降雨,该降雨量也远小于大坝设计的防洪标准所对应的暴雨量,更远远小于大坝设计与校核标准洪水对应的暴雨量。因此,预报无雨或发生小量级降雨时,根据预报信息进行汛限水位的动态控制是完全可行的。

### 1.2 利用无雨及小量级降雨预报信息实施动态控制的风险模型

利用无雨及小量级降雨预报信息进行汛限水位动态控制的风险含义为:面临时刻在“无雨”或“小雨”预报漏报时,发生灾害性特大暴雨的条件下引发设计标准洪水。就目前降雨预报依据的手段、理论及降雨预报的精确性而言,在“无雨”或“小雨”预报条件下,漏报降雨导致设计标准洪水发生属于极小概率事件,并且随着预报周期的滚动,预见期内发生“无雨”或“小雨”的精准度将不断提高,它必将趋于“不可能事件”。因此,可以得出一些定性的结论:

1) 若“无雨”预报水平相当高,漏报频率  $P_p(X > 0) \rightarrow 0$ ,  $X$  表示漏报的降雨量,则选定汛限水位值的风险率  $P_{ZNT}(Z_d, Z_{m0}) \rightarrow 0$ ,  $Z_d$  表示选定的汛限水位,  $Z_{m0}$  表示原设计调洪最高水位,  $T$  表示降雨预报的预见期。

2) 若“无雨”预报完全不可信,漏报频率  $P_p(X > 0) \rightarrow 1$ , 则回归于现行设计理念,风险率  $P_{ZNT}(Z_d, Z_{m0}) \rightarrow P_Z(Z_d^0, Z_{m0})$ , 汛限水位值只有选择  $Z_d = Z_d^0$ ,  $Z_d^0$  表示原始设计的固定汛限水位,  $P_Z(Z_d^0, Z_{m0})$  即为水库的原始设计频率或防洪标准。

3) 就目前降雨预报依据的手段、理论和降雨预报水平而言,在“无雨”预报条件下,发生校核洪水事件基本属于不可能,故  $P_{ZNT}$  最可能的发生域是:

$$0 < P_{ZNT}(Z_d, Z_{m0}) < P_Z(Z_d^0, Z_{m0}) \quad (1)$$

应该指出,以上理论论述的风险是指当前假定条件下校核洪水发生的频率,实际中动态调度汛限水位的风险除了该发生频率,还应将调度过程中的最高洪水位及下泄流量等重要参数一并考虑为风险事件发生的影响因子。综上所述,定量计算汛限水位动态控制运行风险率时,需要分析校核洪水发生的频率、汛限水位控制值、洪水调度方式等,建立风险率计算模型<sup>[14]</sup>如下。

当频率为  $P_c$  的降雨量  $X(P_c)$  被漏报时,按照设计的动态调度方式由汛限水位  $Z_d$  起调,将致使最高洪水位为  $Z_m[Z_d, X(P_c)]$  的洪水发生,该洪水超过原设计调洪最高水位  $Z_{m0}$  的概率  $P_Z\{Z_m[Z_d, X(P_c)] \geq Z_{m0}\}$  则定义为“无雨”预报动态控制汛限水位的风险率  $P_{ZNT}(Z_d, Z_{m0})$ 。用数学表达式可描述为:

$$P_{ZNT}(Z_d, Z_{m0}) = \frac{P_Z\{Z_m[Z_d, X(P_c)] \geq Z_{m0}\}}{P_Z(Z_d^0, Z_{m0})} \leq \quad (2)$$

式中,  $X(P_c) = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot X(P_i)$ ;  $\sum_{i=1}^n \Delta P_i = 1$ ,  $\Delta P_i$  为“无雨”预报时漏报降雨发生的间距频率,即  $\Delta P_i = P(X > X_i) - P(X > X_{i-1})$ , 如  $\Delta P_1 = 0.01\%$ ,  $\Delta P_2 = (0.1 \sim 0.01)\%$ ,  $\Delta P_3 = (0.2 \sim 0.1)\%$ , ...,  $\Delta P_n = (100 \sim 10)\%$ ;  $X(P_i)$  为“无雨”预报情况下漏报的实际降雨发生频率的间距  $\Delta P_i$  对应的平均降雨量;  $n$  为漏报降雨量  $X(P_c)$  离散化的区间数量。

实际上,“无雨”预报风险率亦可选用决策目标极小化公式计算,即:

$$F(X > x, Z_m \geq Z_A) = \int_{Z_A}^{Z_{\max}} P_p(X > x) \cdot f(Z_m(Z_d)) dZ_m \quad (3)$$

式中,  $x$  为预报降雨量;  $Z_m$  为对应动态控制的汛限

水位  $Z_d$  的调洪最高水位;  $Z_A$  为校核洪水位(或淹没高程);  $Z_{\max}$  为极限容许的高程(如坝顶或防浪墙顶、极限淹没高程);  $f(\cdot)$  表示括弧中事件发生的概率密度分布函数;  $F(\cdot)$  则表示括弧中事件发生的累计概率分布函数。式(3)中,  $P_p(X > x) \cdot f(Z_m(Z_d))$  为基于“无雨”预报漏报频率  $P_p(X > x)$  条件下,动态控制汛限水位  $Z_d$  的调洪最高水位  $Z_m$  的概率分布函数:

$$Z > Z_d > Z_d^0 - \Delta Z_2 \quad (4)$$

式中,  $Z$  表示水库的正常蓄水位;  $\Delta Z_2$  为根据水库洪水退水余量可回充的水位,即预泄水位与设计批准的水库汛限水位之差。

不难看出,核心问题仍是确定概率分布函数族  $f(Z_m(Z_d))$ 。若已知概率分布函数族,则  $P_p(X > x) \cdot f(Z_m(Z_d))$  可求出,进而由式(3)求出风险率  $F(X > x, Z_m \geq Z_A)$ 。

将概率分布函数族用近似的频率分布曲线族来代替,则可采用离散化期望公式描述风险率为:

$$P_{ZNF}(Z_d, Z_{m0}) = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot P_{ZNi}\{Z_d, Z_{m0}\} \quad (5)$$

式中,  $P_{ZNi}\{Z_d, Z_{m0}\}$  为对应“无雨”预报降雨发生频率间距  $\Delta P_i$  的平均频率。

同理,可以建立“小雨”预报下动态控制汛限水位的风险模型。

## 2 实例分析

根据上述建立的风险模型,以汉中市石门水库为例,分析该水库“无雨”和“小雨”预报下实施汛限水位动态控制的风险。

石门水库建于 20 世纪 60 年代,位于汉江上游左岸一级支流褒河的下流,设计洪水位 618.0 m,设计洪水标准百年一遇,校核洪水标准千年一遇,校核洪水位 619.5 m。正常蓄水位与设计洪水位相同,兴利库容 0.607 亿  $m^3$ ,死库容 0.443 亿  $m^3$ ,总库容 1.098 亿  $m^3$ 。水库兼有灌溉、发电、防洪等多项综合效益,设计灌溉面积 51.5 万亩,总装机容量 4.05 万 kW,是一座大(二)型水利枢纽。石门水库原设计采用固定汛限水位进行洪水管控,固定汛限水位 615.0 m。近年来,褒河流域径流量呈现下降趋势,并且洪水过后往往长历时干旱,灌溉供水水源短缺,难以发挥预期效益,有必要改进水库的调度方式,实现洪水资源化。

石门水库的泄水建筑物主要包括左岸泄洪洞、1 孔底孔和 6 孔泄洪中孔,泄洪能力较强。经计算,只有当遭遇 500 年一遇以上的洪水时,才需要六孔并

开泄洪,而这个流量近年来并没有发生过,因此,一般洪水考虑适度抬高汛限水位以获取效益。文献[15]经过详细的论证及计算,提出选用降雨量作为关键管控指标时,石门水库汛限水位动态控制的执行方案如表1所示。

表1 根据流域降雨动态控制汛限水位方案

Tab.1 Dynamic control of flood limited level according to the rainfall

流域平均降雨量 $P/\text{mm}$	汛限水位 $H/\text{m}$
$P < 50$	617.5~617
$50 \leq P < 100$	616
$100 \leq P < 200$	615
$P \geq 200$	615~610

对应气象部门对降雨量等级的划分<sup>[16]</sup>,即预报降雨为“小雨”或“无雨”时,可考虑将石门水库的汛限水位提高至617.0~617.5 m。另外,据石门水库库区的天气预报资料,基于信息扩散方法估算“无雨”和“小雨”预报时实际可能的降雨量及对应的频率,如表2所示,并且对“无雨”、“小雨”预报时,实际可能降雨量超越风险率进行了分析,如图1、图2所示。统计采用24 h“无雨”预报样本序列长79,“小雨”预报样本序列长68。

表2 石门水库“无雨”和“小雨”预报的实际可能发生降雨值的频率分布

Tab.2 Possible rainfall and its frequency with Shimen reservoir forecasted to be “no rain” and “light rain”

发生频率/%	雨量/mm	
	预报“无雨”	预报“小雨”
10	1.03	9.92
5	3.61	13.23
2	5.71	16.28
1	7.64	17.32
0.5	8.82	18.59
0.2	9.53	18.71
0.1	10.18	19.52
0.01	13.5	23.13

注:表中数据统计自汉中市气象局2010—2014年间每年6月的部分预报信息。

综合图1和图2的结果,“无雨”预报时,漏报降雨量超过10 mm的风险率远低于0.2%,也就是漏报的实际降雨量达到中雨的风险率远小于0.2%;“小雨”预报时,漏报降雨量超过25 mm的风险率不

到0.01%,也就是漏报的实际降雨量达到大雨的风险率小于0.01%。该结果也验证了“无雨”和“小雨”的气象预报可信度是非常高的。

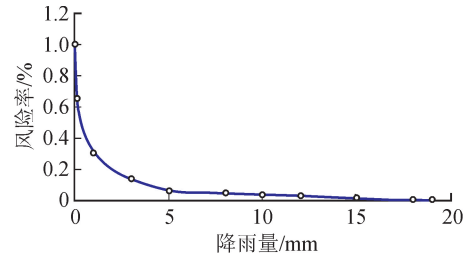


图1 “无雨”预报时实际可能降雨量超越风险率  
Fig.1 Probability of actual excess rainfall exceeding risk when forecasting “no rain”

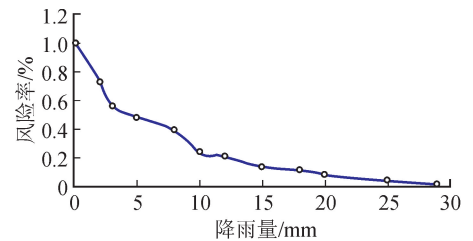


图2 “小雨”预报时实际可能降雨量超越风险率  
Fig.2 Probability of actual excess rainfall exceeding risk when forecasting “light rain”

石门水库库区未来24小时预报“无雨”和“小雨”的实际降雨量频率分布如表3所示。表3中洪峰采用1981年洪水过程为典型洪水过程,对其按水量进行同倍比放大。“无雨”预报时以617.5 m为起调水位,“小雨”预报时以617 m为起调水位,以上下游防洪安全为约束进行调洪演算,求得各种误差频率下调洪高水位,判断是否出现漫坝危险。

由表3调洪结果可看出,“无雨”预报下,所有的调洪高水位都不超过设计洪水位618.0 m;“小雨”预报下,仅当漏报降雨量超过20 mm,发生概率约0.01%,才会发生风险事件。因此,按照式(5)离散求解动态控制汛限水位的风险率得:

$$P_{ZNF}(Z_d, Z_{m0}) = 0$$

$$P_{ZSF}(Z_d, Z_{m0}) = 6.12 \times 10^{-6}$$

“无雨”预报下风险率  $P_{ZNF}$  为0,“小雨”预报下的风险率  $P_{ZSF}$  为  $6.12 \times 10^{-6}$ ,均在可接受风险范围内<sup>[17]</sup>,且以上计算是基于流域下垫面已蓄满,发生水量损失,实际洪水在截流损失下会比当前偏小,风险更低。因此,对于石门水库,预报“无雨”时抬高汛限水位至617.5 m,预报“小雨”时抬高至617.0 m的方案是可行的。



表3 利用降雨预报信息动态控制汛限水位的调度结果

Tab.3 Dispatching results of dynamic flood water level control according to the rainfall forecast

发生频率/ %	预报“无雨”				预报“小雨”			
	雨量/ mm	折总水量/ 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	洪峰/ (m <sup>3</sup> /s)	调洪最高水位/ m	雨量/ mm	折总水量/ 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	洪峰/ (m <sup>3</sup> /s)	调洪最高水位/ m
10	1.03	7.9	680	617.5	9.92	22.4	2 040	617.0
5	3.61	14.6	1 060	617.5	13.23	27.3	2 320	617.0
2	5.71	17.1	1 340	617.5	16.28	32.7	2 460	617.0
1	7.64	19.3	1 670	617.5	17.32	34.2	2 570	617.0
0.5	8.82	20.8	1 830	617.5	18.59	35.1	2 630	617.2
0.2	9.53	21.1	1 980	617.5	18.71	35.6	2 690	617.4
0.1	10.18	23.8	2 100	617.6	19.52	37.1	2 850	617.9
0.01	13.5	28.7	2 330	617.8	23.13	42.9	3 110	618.1

注:表中计算折总水量时,假定全流域为蓄满产流,忽略了产流过程中的水量损失。

值得说明的是,以上对石门水库汛限水位动态控制的风险率计算在时效方面仅考虑了24小时“无雨”或“小雨”预报,对24小时以后的降雨预报未加考虑。事实上,当前技术已推行天气预报12小时滚动,特殊情况或灾害天气下甚至6小时滚动预报,因此即使偶遇强降雨,也有修正预报的机会,并且对于水库而言,有6~12小时的预泄时间,应结合水库的泄流设施核算水库的泄洪能力,规划预泄调度,下调初始库水位,腾空库容以迎接大洪水。

### 3 结 语

汛限水位是为水库迎接设计洪水而设置的起调水位,决定了水库在汛期运行时的最大接受水量,但对于绝大多数水库而言,设计洪水发生概率极小,如果仅为了防御设计洪水,则必然导致宝贵水资源的浪费。随着科学技术的发展,天气及洪水预报的精度、准度都大幅度提升,以传统的调洪演算和防洪风险调度为基础,以气象或水情预报为依据实施的水库汛限水位动态控制,将在更大程度上实现兴水利除水害。本文建立了基于24小时“无雨”或“小雨”预报时的汛限水位动态控制风险模型,定量评估小量级降雨时实施动态控制的风险,是对水库风险调度的一次有益尝试。随着气象学的发展,天气预报周期将进一步缩短,预报精准率会大幅提高,实施汛限水位动态控制会拥有更坚实的基础信息,如何建立更具有通用性的风险评估模型是后续研究的重点。

#### 参考文献:

[1] 郑德凤,王本德. 水库防洪与补源优化调度及其风险分析

析[J]. 水利学报,2005,36(7):772-779.

ZHENG Defeng, WANG Bende. Optimal dispatch of reservoir flood control combining with groundwater recharge and its risk analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,36(7):772-779.

[2] 叶正伟. 淮河流域洪水资源化的理论与实践探讨[J]. 水文,2007,27(4):15-19.

YE Zhengwei. Discussion on flood resources utilization in Huaihe River basin [J]. Journal of China Hydrology, 2007,27(4):15-19.

[3] 冯平,徐向广,温天福,等. 考虑洪水预报误差的水库防洪控制调度的风险分析[J]. 水力发电学报,2009,28(3):47-51.

FENG Ping, XU Xiangguang, WEN Tianfu, et al. Risk analysis of reservoir operation with considering flood forecast error [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009,28(3):47-51.

[4] 郭生练,陈炯宏,栗飞,等. 清江梯级水库汛限水位联合设计与运用[J]. 水力发电学报,2012,31(4):6-11.

GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LI Fei, et al. Joint design and operation of flood limited water levels for Qingjiang cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 6-11.

[5] 陈炯宏,郭生练,刘攀,等. 梯级水库汛限水位联合运用和动态控制研究[J]. 水力发电学报,2012,31(6):55-61.

CHEN Jionghong, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Joint operation and dynamic control of flood limited water levels for cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(6): 55-61.

[6] 周研来,郭生练,段唯鑫,等. 梯级水库汛限水位动态控制[J]. 水力发电学报,2015,34(2):23-30.

ZHOU Yanlai, GUO Shenglian, DUAN Weixin, et al. Dynamic control of flood limited water level for cascade

- reservoirs [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(2):23-30.
- [7] 袁晶瑄,王本德,田力.白龟山水库防洪预报调度方式研究及风险分析[J].*水力发电学报*,2010,29(2):132-138.  
YUAN Jingxuan, WANG Bende, Tian Li. Research of flood control operation mode based on forecast information and risk analysis for Baiguishan reservoir [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010,29(2):132-138.
- [8] 曲寿飞,阎林,王国利.水库群汛限水位实时动态控制关键问题的解决方法[J].*水电能源科学*,2015,33(12):55-58.  
QU Shoufei, YAN Lin, WANG Guoli. Solution for key problems of real-time dynamic control of limited water level of reservoir group in flood period [J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(12):55-58.
- [9] 何晓燕,黄金池.对水库汛限水位动态控制风险分析的认识[J].*大坝与安全*,2010,(6):27-30.  
HE Xiaoyan, HUANG Jinchi. Risk analysis for dynamic flood level control of reservoirs [J]. *Dam & Safety*, 2010, (6):27-30.
- [10] 王本德,张艳平,李敏,等.丹江口水库流域降雨预报漏报风险分析[J].*水电能源科学*,2010,28(1):6-8,126.  
WANG Bende, ZHANG Yanping, LI Min, et al. Risk analysis of missing report of rainfall forecast in Danjiangkou basin [J]. *Water Resources and Power*, 2010,28(1):6-8, 126.
- [11] 王通,徐征和,孔珂,等.龙角山水库采用动态汛限水位对雨洪资源的利用研究[J].*中国农村水利水电*,2016,(3):38-42.  
WANG Tong, XU Zhenghe, KONG Ke, et al. Research on the utilization of resources by using dynamic flood limit water level in Longjiaoshan reservoir [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016, (3):38-42.
- [12] 谭乔凤,雷晓辉,王浩,等.考虑梯级水库库容补偿和设  
计洪水不确定性的汛限水位动态控制域研究[J].*工程科学与技术*,2017,49(1):60-69.  
TAN Qiaofeng, LEI Xiaohui, WANG Hao, et al. Dynamic control bound of flood limited water level considering capacity compensation regulation and design flood uncertainty of cascade reservoirs [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(1):60-69.
- [13] 刘招.水库的洪水资源化理论和方法研究[D].西安:西安理工大学,2008.  
LIU Zhao. Study on theory and method of the flood resources utilization based on reservoir [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [14] 王本德,周惠成.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.
- [15] 黄灵芝,李守义,司政.汛限水位动态控制在石门水库主汛期调度中的应用研究[J].*水资源与水工程学报*,2017,28(3):146-150,157.  
HUANG Lingzhi, LI Shouyi, SI Zheng. Research on limited water level dynamic control of Shimen reservoir dispatch in the main flood season [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2017, 28(3):146-150,157.
- [16] 邱辉,李春龙,张方伟.长江流域多模式降雨预报效果检验[J].*水利水电快报*,2017,38(6):39-42,46.  
QIU Hui, LI Chunlong, ZHANG Fangwei. Effect test of multi-mode rainfall forecast in the Yangtze River basin [J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2017,38(6):39-42,46.
- [17] 周兴波,周建平,杜效鹄,等.我国大坝可接受风险标准研究[J].*水力发电学报*,2015,34(1):63-72.  
ZHOU Xingbo, ZHOU Jianping, DU Xiaohu, et al. Study on risk acceptance criteria for dams in China [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(1):63-72.

(责任编辑 周 蓓)