

水库汛期运行水位动态控制风险和效益分析

张验科, 张建新, 武文龙, 王远坤*

华北电力大学, 水利与水电工程学院, 北京

收稿日期: 2023年3月2日; 录用日期: 2023年4月11日; 发布日期: 2023年4月26日

摘要

汛期运行水位动态控制可通过挖掘利用预报信息提高水库兴利效益, 但需合理评估可能面临的防洪风险。在提出水库和下游防洪保护对象附加防洪风险概念的基础上, 建立了水库面临不同量级预报入库洪水时的运行水位动态控制优化模型, 并以三峡水库为例, 分别选取丰、平、枯三个典型年进行了验证分析, 结果表明: 1) 丰水年可以增加发电量约4%, 枯水年和平水年汛期最大可以增加发电量约8%和9%; 2) 当水库预报入库洪峰流量小于66,000 m³/s, 运行水位控制在151 m及以下时, 城陵矶地区附加防洪风险率小于0.5%。给出的汛期运行水位、预报洪峰流量和城陵矶地区下游附加防洪风险之间的关系, 可以为三峡水库的调度决策提供更为丰富的参考信息。

关键词

中小洪水, 汛期运行水位, 动态控制, 附加风险, 三峡水库

Risk and Benefit Analysis of Dynamic Control of Reservoir Operation Water Level during Flood Season

Yanke Zhang, Jianxin Zhang, Wenlong Wu, Yuankun Wang*

School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Mar. 2nd, 2023; accepted: Apr. 11th, 2023; published: Apr. 26th, 2023

Abstract

The dynamic control of operating water level during the flood season can improve the benefit of reser-

作者简介: 张验科(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水资源与能源科学、风险管理与决策理论等研究。Email: ykzhang2008@163.com
*通讯作者 Email: yuankunw@ncepu.edu.cn

文章引用: 张验科, 张建新, 武文龙, 王远坤. 水库汛期运行水位动态控制风险和效益分析[J]. 水资源研究, 2023, 12(2): 117-125. DOI: 10.12677/jwrr.2023.122014

voir by exploiting the forecast information, but it is necessary to reasonably assess the possible flood risks. Based on the concept of additional flood control risks for reservoirs and downstream flood protection objects, an optimization model of operating water level dynamic control when reservoirs face different magnitudes of forecasted incoming floods is established. Then taking Three Gorges Reservoir as an example, three typical years of high, normal, and low were selected for verification analysis. The results showed that: 1) The generation capacity can be increased by about 4% in high flow years, and the maximum increase of power generation capacity can be about 8% and 9% during the flood season in normal and low flow years; 2) when the forecasted incoming flood flow of the reservoir is less than 66,000 m³/s and the operating water level is controlled at 151 m and below, the additional flood protection risk rate of Chenglingji area is less than 0.5%. The given relationships between the operating water level, the forecast flood flow and the additional flood risk in the downstream of the Chenglingji area can provide more reference information for the operation decision of the Three Gorges Reservoir.

Keywords

Medium and Small Floods, Flood Operation Water Level, Dynamic Control, Additional Risk, Three Gorges Reservoir

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,受全球气候变化和人类活动等因素影响,洪涝旱灾频发,水利工作者不但要尽力利用水利工程疏导洪水,减免洪灾损失,同时又要预防极端干旱事件发生,如何充分利用气象水情信息,高效发挥水库的综合利用效益,一直是水利工作面临的重要课题。随着预报技术的发展,入库洪水预报的精度越来越高,将预报成果应用到水库防洪调度中,开展预报调度一体化的水库汛期运行水位动态控制,在充分考虑预报误差的前提下,尽可能规避防洪风险,提高水库的兴利效益,已成为普遍关注的问题。目前关于水库汛期运行水位动态控制的研究成果主要集中于分期汛限水位[1][2][3][4][5]、汛期运行水位动态控制域分析[6][7][8][9][10]、汛期运行水位动态控制效益和风险的多目标协调分析[11][12][13][14][15]和梯级水库群汛期运行水位动态控制[16][17][18]等方面。本文基于已有研究成果,重点关注设计阶段的防洪风险和水库汛期运行水位动态控制带来的附加防洪风险的区别,在考虑入库洪水预报误差的基础上,对水库汛期运行水位动态控制带来的附加防洪风险和效益开展研究,以期改善水库的调度决策。

2. 水库汛期运行水位动态控制域

汛期运行水位动态控制域是水库在无洪水或者面临中小洪水时进行水位控制的范围,下限一般采用原汛限水位,上限则通过预泄能力约束法及其改进方法[19]、库容补偿法[20]等方法确定。预泄能力约束法是使用较为广泛的确定水位动态控制域上限的方法之一,其基本思想是在留有一定余地的情况下和在有效预见期内,水库能够额外的下泄多少水量就将库水位向上抬升多少;其主要影响因素包括:有效预见期、有效预见期内的入库水量、水库预泄能力、下游河道安全泄量等。根据水库的历史流量数据和下游河道的安全泄量,按照预泄能力约束法的原理进行动态控制域上限的计算,假设水库的有效预见期为 T ,下游河道的安全泄量为 q_0 ,则水位上限为:

$$\begin{cases} V_{\text{上限}} = V_{\text{汛限}} + (q_0 - \Delta q - \overline{Q_c}) \times T \\ Z_{\text{上限}} = f_{in}(V_{\text{上限}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $V_{\text{上限}}$ 为动态控制域上限水位对应的库容， m^3 ； $V_{\text{汛限}}$ 为汛限水位对应的库容， m^3 ； Δq 为保障安全而保留的裕度，保证在洪水来临时不会因预见期内的入库流量可能会大于汛期平均入库流量而导致下泄流量加大造成人为的洪灾， m^3/s ； $\overline{Q_c}$ 为根据水库历史汛期流量资料统计的水库汛期平均入库流量， m^3/s ，以此代表预见期内水库的入库流量； $f_{in}(V_{\text{上限}})$ 为根据水库库容关系曲线上查找得到的 $V_{\text{上限}}$ 相应的水位值， m 。

3. 水库汛期运行水位动态控制附加风险和效益分析

3.1. 入库洪水预报误差

洪水预报一般分河道洪水预报法和流域降雨径流法两类，汛期运行水位动态控制是以入库洪水预报为前提的，入库洪水预报误差是水库汛期调度的主要风险要素之一。因此，充分把握入库洪水预报误差的分布规律是进行汛期运行水位动态控制的关键。

假设某入库洪水预报过程为 $Q_c(i) (i=1,2,\dots,n)$ ，实测入库洪水过程为 $Q_0(i) (i=1,2,\dots,n)$ ，预见期为 T (假定小于流域最大汇流时间)，其中 n 为洪水过程节点数； $Q_{c-\text{max}}$ ， $Q_{0-\text{max}}$ 分别为预测洪峰与实测洪峰值； t_{max} ， t'_{max} 分别为预测洪峰出现时间与实测洪峰出现时间。根据《水文情报预报规范(GB/T 22482-2008)》(下文简称《规范》)[21]，洪水预报误差可采用绝对误差、相对误差和确定性系数来衡量，其中洪峰流量、洪峰流量出现时间、洪量的预报误差一般可以用前两个来衡量，而洪水预报过程的误差一般用如下确定性系数来表示：

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_c(i) - Q_0(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_0(i) - \overline{Q_0}]^2} \quad (2)$$

式中： DC 为确定性系数(取两位小数)； $Q_0(i)$ 为入库洪水实测值， m^3/s ； $Q_c(i)$ 为入库洪水预报值， m^3/s ； $\overline{Q_0}$ 为入库洪水实测值的均值， m^3/s ； n 为预报洪水过程资料系列长度。

3.2. 汛期运行水位动态控制附加风险

现有规程规范在确定水库汛限水位时并未考虑水文预报技术及其误差，而汛期运行水位动态控制则是利用水文预报信息使汛期不必严格控制在汛限水位，这难免会导致实际功能与设计标准的差异，从而带来一定的防洪风险，因此，汛期运行水位动态控制附加防洪风险可以理解为水库在汛期没有严格维持汛限水位运行时带来的超越设计标准的防洪风险。

1) 下游附加防洪风险率

水库下游防洪风险事件是指在水库下泄流量超过了下游防洪保护对象对应河段的安全泄量，下游防洪风险率则是指水库下泄量超过安全泄量的概率。假设水库汛限水位为 Z_0 ，在洪水来临前的时刻 t_1 运行水位为 Z_1 ，则在洪水来临时刻 t_0 必须要由 Z_1 下降到 Z_0 ，否则水库将面临无法抵御设计标准洪水的风险，因此 $(t_0 - t_1)$ 时段内水库的平均下泄流量为：

$$\overline{q_{10}} = (V(z_1) - V(z_0)) / (t_0 - t_1) + \overline{Q_c} \quad (3)$$

式中， $V(Z_1)$ 和 $V(Z_0)$ 分别为水库水位为 Z_1 和 Z_0 时对应的库容， m^3 ； $\overline{Q_c}$ 为预报 $(t_0 - t_1)$ 时段内平均入库流量， m^3/s 。

假设水库下游防洪控制点的安全泄量为 q_0 ，则运行水位动态控制所带来的下游附加防洪风险率为：

$$\begin{aligned} P_{xy} &= P[\overline{q_{10}} > q_0] - P_{xysj} \\ &= P\left[\frac{V(z_1) - V(z_0)}{t_0 - t_1} + \overline{Q_c} > q_0\right] - P_{xysj} \\ &= P\left[\overline{Q_c} > q_0 - \frac{V(z_1) - V(z_0)}{t_0 - t_1}\right] - P_{xysj} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $t_{10} = (t_0 - t_1)$ 一般就是洪水的有效预见期; P_{xyj} 为水库下游防洪设计标准对应的洪水的频率。

2) 水库附加防洪风险率

由于汛期运行水位动态控制可能导致水库在洪水来临前无法以汛限水位起调, 导致水库在面临设计标准洪水时可能存在一定的风险, 即水库本身的附加防洪风险。水库附加防洪风险率可以基于蒙特卡洛法来计算:

假设共有 m 场典型洪水资料, 根据洪峰预报误差分布情况生成随机数 r , 以这 m 场洪水为基础按照洪峰进行缩放, 得到 n 场模拟的洪水过程并分别进行防洪调度, 统计水库在 n 场模拟洪水中的调洪最高水位 Z_m , 假设 Z_m 大于水库设计水位 Z_s 的次数为 k_{zsk} , 当 n 足够大时, 可以认为 k_{zsk} 与 n 的比值即为下游防洪风险率, 则水库的附加防洪风险率为:

$$P_{sk} = \left(\frac{k_{zsk}}{n} - \frac{k_{z0sk}}{n} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中, k_{z0sk} 为汛限水位 Z_0 起调时 n 场洪水调洪结果中调洪最高水位超过水库设计水位的次数。

3.3. 汛期运行水位动态控制效益分析

汛期运行水位动态控制通过抬高水库在无洪水和中小洪水时的运行水位来获得更高的兴利效益, 主要包括发电效益、供水效益和航运效益等。本文采用发电效益来衡量汛期运行水位动态控制带来的兴利效益, 水库发电量计算公式为:

$$E = \sum_{i=1}^T k Q_{f,i} (Z_{u,i} - Z_{d,i}) \Delta t \quad (6)$$

$$Q_{f,i} = \begin{cases} Q_{in,i} & Q_{in,i} \leq q_{\max} \\ q_{\max} & Q_{in,i} > q_{\max} \end{cases}$$

式中, E 为汛期的总发电量, kW·h; T 为汛期的总天数; k 为电站的出力系数; $Q_{f,i}$ 为第 i 个时段的发电流量, m^3/s ; $Q_{in,i}$ 为第 i 个时段的入库流量, m^3/s ; q_{\max} 为满发流量, m^3/s ; $Z_{u,i}$ 为第 i 个时段水库水位, 在无洪水或者小洪水时可以认为是汛期运行水位动态控制中的运行水位上限, m ; $Z_{d,i}$ 为第 i 个时段水库下游水位, m , 可根据水库的下泄流量和下游水位曲线插值得到; Δt 为时段长度, d 。

分别计算不同运行水位对应的汛期发电量, 然后分别减去汛限水位对应的发电量, 结果即为汛期运行水位动态控制所带来的发电效益。

3.4. 汛期运行水位动态控制优化模型

在汛期运行水位动态控制过程中如何动态调整其运行水位直接关系到兴利效益的发挥, 为此, 可以建立考虑下游防洪安全的基于预报的水库汛期运行水位动态控制优化模型:

假设预报的洪水过程有 n 种可能情况发生 $Q_{1c}, Q_{2c}, \dots, Q_{nc}$, Z_1, Z_2, \dots, Z_n 为满足以下约束时的起调水位, 则最优运行水位为:

$$Z = \max(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} [q_{\max}, Z_{\max}] = f_i(Z_j, Q_{jc}) \\ q_{\max} \leq q_0 \\ Z_{\max} \leq Z_{skfh} \\ R_j \leq R_y \\ 0 < Z_j < Z_{skfh} \end{cases} \quad (7)$$

其中, q_{\max}, Z_{\max} 为调洪过程中的最大下泄流量与最高水库水位, m^3/s ; $f_i(*)$ 为调洪函数; Q_{jc} 为预报入库洪水

过程的第 j 中情况, R_j 为对应的附加防洪风险率; q_0 为下游防洪控制点安全泄量, m^3/s ; R_y 为水库管理人员可接受的附加风险率; Z_{skfh} 为防洪高水位, m 。

4. 算例分析

4.1. 水库概况

三峡水库位于湖北宜昌三斗坪, 是一座混凝土重力坝水库, 坝址控制面积达 100 万 km^2 , 占长江流域面积的 56%, 多年平均流量 14,300 m^3/s , 汛期为每年的 6 月 10 至 9 月 30 日, 汛期多年平均流量约为 23,000 m^3/s 。水库死水位 145 m , 正常蓄水位为 175 m , 汛限水位为 145 m , 设计标准为千年一遇, 设计洪水位 175 m , 校核标准为万年一遇加大 10%, 校核洪水位为 180.4 m 。三峡水库 3 d 设计洪量 247 亿 m^3 , 折合流量约为 95,000 m^3/s , 非常接近设计洪峰 98,800 m^3/s , 7 d 设计洪量 486.8 亿 m^3 , 而长江流域 1949 年以来发生的流域性的最大洪水在 1954 年, 当时的最大日平均流量也仅为 65,700 m^3/s , 3 d 洪量约为 170 亿 m^3 。由此可见对于三峡水库本身而言, 除非发生极端罕见的特大洪水, 其防洪安全是比较有保障的, 另一方面水文预报技术的快速发展也让人们对于可能到来的特大洪水能够提前预知到并做出反应, 通过预泄将库水位降低到汛限水位。实际上对于大部分洪水, 三峡水库的防洪压力主要表现在其下游城陵矶和荆江河段的防洪上, 即发挥三峡水库的削峰能力保证下游防洪安全。

4.2. 汛期运行水位动态控制域

本文采用预泄能力约束法计算汛期运行水位动态控制域上限。三峡水库汛期多年平均流量约为 23,000 m^3/s , 3 d 的水文预报精度达到了水文情报预报规范中的甲等标准, 可以用于水库调度之中, 城陵矶地区的安全泄量在 60,000 m^3/s 左右, 由于洪水来临前水库的入库流量很可能会大于 23,000 m^3/s , 并且考虑三峡水库到城陵矶地区的区间入流的影响、洪水起涨阶段入库流量可能会大于汛期多年平均流量以及为防洪留下一定的调整余地, 预泄阶段的下泄流量取 35,000 m^3/s , 则水位上限约为 150.9 m , 取 151 m 为水位上限。水位动态控制下限采用原汛限水位 145 m , 则汛期运行水位动态控制域为 [145 m , 151 m], 以 0.5 m 为步长取动态控制域内的多个运行水位, 分别计算相应的附加防洪风险。

4.3. 计算结果分析

从长期来看, 水库的发电量受到来水量的影响较大, 根据《规范》, 河川径流可以划分为枯水年、偏枯水年、平水年、偏丰水年和丰水年五个等级, 本文选取 1950~2016 年宜昌站年平均流量资料、采用距平值法[21] (即年平均流量与多年平均流量的差再除以多年平均流量) 计算各等级流量的区间并选择相应的代表年, 并计算汛期运行水位抬高到 151 m 时的增发发电量, 结果如表 1。

Table 1. Annual average flow classification results of the distance level method and the corresponding increase in power generation
表 1. 距平值法年平均流量分级结果及相应增发发电量

分级	枯	偏枯	正常	偏丰	丰
距平值/%	<-20	[-20, -10)	[-10, 10]	(10, 20]	>20
年平均流量区间/ (m^3/s)	<10,900	[10,900, 12,300)	[12,300, 15,000]	(15,000, 16,400]	>16,400
典型年	2006	1997	1973	1965	1954
平均流量/ (m^3/s)	9030	1150	1360	15,600	16,600
汛期增发发电量/亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$	18.79	29.26	38.29	44.07	19.06
增加率/%	8	8	9	9	4

从表 1 可以看出, 除丰水年以外, 其余水平年的汛期增发电量随来水量增加而增加, 增加率约为 8%~9%, 丰水年增发电量明显减少, 仅为 4%, 这是由于丰水年来水量过大, 入库流量大于满发流量的天数较多, 此时运行水位增加只能带来水头效益, 并不能增加发电用的水量, 故增发电量相较于其余年份较少。

三峡水库的平均上网电价约为 0.25 元/kW·h, 计算平水年(即 1973 年)不同运行水位下的三峡水库的发电量、增发电量和增发效益, 结果如表 2。从表 2 可以看出, 随着运行水位的增加, 三峡水库汛期的发电效益增加, 相较于 145 m, 将库水位维持在 151 m 能够使三峡水库汛期的发电量增加 38.29 亿 kW·h, 发电量增加了约 9%, 发电效益增加约 9.57 亿元。

Table 2. Power generation and benefits for different operating water levels in normal flood years
表 2. 平水年不同运行水位的发电量和效益

运行水位/m	发电量/亿 kW·h	增发电量/亿 kW·h	增发效益/亿元
145.0	414.45	0.00	0.00
145.5	417.64	3.19	0.80
146.0	420.81	6.35	1.59
146.5	423.98	9.52	2.38
147.0	427.15	12.70	3.18
147.5	430.33	15.88	3.97
148.0	433.49	19.04	4.76
148.5	436.66	22.21	5.55
149.0	439.84	25.38	6.35
149.5	443.02	28.57	7.14
150.0	446.19	31.74	7.93
150.5	449.47	35.01	8.75
151.0	452.75	38.29	9.57

以 1973 年汛期流量过程为基础, 根据三峡水库的设计洪峰和 3 d、7 d、15 d 以及 30 d 洪量对该过程进行缩放, 得到设计洪水, 再对设计洪水按照洪峰进行缩放, 得到不同大小的入库洪水过程。按照《规范》, 洪峰的预报误差允许范围为[-0.2, +0.2], 以此生成随机数模拟入库洪峰的预报误差, 计算不同运行水位以及不同洪峰下城陵矶地区的附加防洪风险, 城陵矶地区的风险事件为调洪过程中三峡水库最大下泄流量超过相应的控制泄量 53,900 m³/s。计算结果如表 3。

Table 3. Additional flood risk rate at Chenglingji area with different operating levels and forecasted in flow flood peaks
表 3. 不同运行水位和预报入库洪峰下城陵矶地区的附加防洪风险率

运行水位/m	不同洪峰下的附加防洪风险率/%						
	62,000	64,000	66,000	68,000	70,000	72,000	74,000
145.0	0	0	0	0	0	0	0
145.5	0	0	0	0.16	0.26	0.32	0.80
146.0	0	0	0.02	0.12	0.40	0.99	1.58
146.5	0	0	0.05	0.19	1.06	1.59	3.99
147.0	0	0	0.07	0.44	1.12	2.69	4.47

Continued

147.5	0	0.01	0.15	0.62	1.73	3.29	5.45
148.0	0	0.02	0.15	0.69	1.82	3.59	7.04
148.5	0	0.05	0.22	0.79	2.06	5.31	9.34
149.0	0	0.05	0.30	1.20	3.41	6.57	11.14
149.5	0	0.07	0.46	1.34	3.75	8.21	13.63
150.0	0	0.08	0.46	1.48	4.29	8.48	13.64
150.5	0	0.08	0.47	2.16	5.05	10.83	17.29
151.0	0	0.10	0.48	2.23	5.36	10.94	17.60

从表 3 可以看出, 当预报入库洪峰流量在 $62,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右时, 不同运行水位的附加防洪风险率均为 0, 即使三峡水库以 151 m 水位起调不会额外增加城陵矶地区的防洪压力; 当预报入库洪峰流量在 $72,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 经计算, 三峡水库虽然以 145 m 水位起调城陵矶地区的附加防洪风险率为 0, 但仍存在较大的防洪风险(防洪风险率约为 3.88%), 此时就不适合再考虑城陵矶地区的防洪安全, 应当及时开闸预泄, 将库水位控制在 145 m; 当预报入库洪峰流量在两者之间时, 根据决策者主观上可以接受的风险率, 可以选择不同的运行水位, 例如假设决策者能接受的附加风险率在 1% 及以下, 预报入库洪峰在 $68,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上时, 水库最优运行水位在 148.5 m 以下。

5. 结论

给出了汛期运行水位动态控制的附加防洪风险的概念和计算方法, 通过对三峡水库不同运行水位的发电效益和城陵矶地区附加防洪风险分析, 得出了以下结论:

1) 采用距平值法对三峡水库的年平均流量进行分级计算, 分别选择 1954 年、1973 年和 2006 年作为丰水年、平水年和枯水年的典型年, 经计算, 汛期运行水位动态控制可以使三峡水库丰水年汛期发电量增加约 4%, 枯水年和平水年汛期增加发电量约 8% 和 9%。

2) 在考虑预报入库洪峰流量误差的基础上, 以三峡水库下游防洪保护对象之一的城陵矶地区防洪安全为主, 分析了三峡水库运行水位、预报洪峰流量和城陵矶地区附加防洪风险率的关系, 结果表明: 当预报洪峰流量小于 $66,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 库水位可以维持在 151 m 而不会明显增加城陵矶地区的附加防洪风险(约为 0.48%)。本文结果可为三峡水库运行水位决策提供参考。

基金项目

感谢国家自然科学基金项目 52279064 和 52109016 对本研究的支持。

参考文献

- [1] 郭生练, 汪芸, 周研来, 等. 丹江口水库洪水资源调控技术研究[J]. 水资源研究, 2015, 4(1): 1-8.
GUO Shenglian, WANG Yun, ZHOU Yanlai, et al. Optimal control of flood water resources for the Danjiangkou Reservoir. Journal of Water Resources Research, 2015, 4(1): 1-8. (in Chinese)
- [2] 陈立华, 潘子豪, 刘为福, 等. 龙滩水电站汛期分期及合理性检验[J]. 水力发电, 2019, 45(5): 17-21.
CHEN Lihua, PAN Zihao, LIU Weifu, et al. Flood season staging and its rationality verification for Longtan hydropower station. Water Power, 2019, 45(5): 17-21. (in Chinese)
- [3] 王家彪, 廖卫红, 付晓杰, 等. 基于熵权法的万安水库汛期分期计算[J]. 水利水电技术, 2018, 49(1): 36-41.
WANG Jiabiao, LIAO Weihong, FU Xiaojie, et al. Entropy weight method-based calculation on phase-division of flood season for Wan'an Reservoir. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(1): 36-41. (in Chinese)

- [4] 谭一帆. 水库汛期运行水位动态控制及风险分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2018.
TAN Yifan. Dynamic control and risk analysis of operating water level in reservoir flood season. Master's Thesis, Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)
- [5] 王声扬, 周研来, 朱迪, 陈华. 洞庭湖流域水系汛期分期研究[J]. 水资源研究, 2022, 11(4): 366-379.
WANG Shengyang, ZHOU Yanlai, ZHU Di and CHEN Hua. Study on flood season segmentation of Dongting Lake basin. Journal of Water Resources Research, 2022, 11(4): 366-379. (in Chinese)
- [6] 郑玉婷, 王丽萍, 谢宇韬, 等. 改进的 VIKOR 决策模型在大隆水库汛期水位动态控制中的应用[J]. 水电能源科学, 2020, 38(6): 38-41.
ZHENG Yuting, WANG Liping, XIE Yutao, et al. Application of improved VIKOR decision model in water level dynamic control of Dalong Reservoir in flood season. Water Resources and Power, 2020, 38(6): 38-41. (in Chinese)
- [7] 雷苏琪, 胡振鹏, 熊斌, 等. 水库汛限水位动态控制预泄能力约束法的必要条件[J]. 水利水电技术, 2022, 53(6): 146-154.
LEI Suqi, HU Zhenpeng, XIONG Bin, et al. Necessary condition of constrained pre-discharge capacity method for dynamic control of reservoir flood limit water level. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(6): 146-154. (in Chinese)
- [8] 李英海, 夏青青, 常文娟, 等. 水库汛限水位确定方法研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(5): 127-134.
LI Yinghai, XIA Qingqing, CHANG Wenjuan, et al. Review of the methods of reservoir's limiting water level during flood season. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(5): 127-134. (in Chinese)
- [9] 王俊, 郭生练. 三峡水库汛期控制水位及运用条件[J]. 水科学进展, 2020, 31(4): 473-480.
WANG Jun, GUO Shenglian. On Three Gorge Reservoir control water level and operating conditions in flood season. Advances in Water Science, 2020, 31(4): 473-480. (in Chinese)
- [10] 朱昊阳, 黄炜斌, 瞿思哲, 等. 水库汛限水位动态控制域风险分析及方案优选[J]. 水利水电技术, 2018, 49(12): 134-140.
ZHU Haoyang, HUANG Weibin, QU Sizhe, et al. Risk analysis on dynamic control domain of reservoir flood limited water level and its scheme optimization. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(12): 134-140. (in Chinese)
- [11] 张晓琦, 刘攀, 陈进, 等. 基于两阶段风险分析的水库群汛期运行水位动态控制模型[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(5): 141-148.
ZHANG Xiaoqi, LIU Pan, CHEN Jin, et al. Dynamic control model of multi-reservoir flood limited water levels during flood seasons based on the two-stage flood risk analysis. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(5): 141-148. (in Chinese)
- [12] 李晓英, 张琰, 童泽淳. 水库汛限水位控制多目标协同决策研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(2): 31-42.
LI Xiaoying, ZHANG Yan and TONG Zechun. Study on multi-objective cooperative decision making of flood control water levels of reservoirs. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(2): 31-42. (in Chinese)
- [13] PAN, J., XIE, Y., LIU, M., et al. Dynamic control of water level in flood limited reservoir based on intelligent calculation. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 1-10. <https://doi.org/10.1155/2022/3683122>
- [14] LIU, G., et al. Multi-objective optimal scheduling model of dynamic control of flood limit water level for cascade reservoirs. Water, 2019, 11(9): 1818-1836. <https://doi.org/10.3390/w11091836>
- [15] ZHANG, Y., WANG, G., PENG, Y., et al. Risk analysis of dynamic control of reservoir limited water level by considering flood forecast error. Science China Technological Sciences, 2011, 54(7): 1888-1893. <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4392-2>
- [16] MU, Z., AI, X., DING, J., et al. Risk analysis of dynamic water level setting of reservoir in flood season based on multi-index. Water Resources Management, 2022, 36(9): 3067-3086. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03188-z>
- [17] 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. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(1): 60-69. (in Chinese)
- [18] 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, 224.
DUN Xiaohan, ZHOU Jianzhong, ZHANG Yongchuan, et al. Real-time flood control risk estimation of reservoir and analysis on the interoperability of storage capacity of multi-reservoir regulation. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(2): 209-217, 224. (in Chinese)
- [19] 任明磊, 何晓燕, 丁留谦, 等. 水库汛限水位动态控制域确定方法研究发展动态综述[J]. 水力发电, 2016, 42(6): 61-65.
REN Minglei, HE Xiaoyan, DING Liuqian, et al. Review on the methods of fixing dynamic control range of reservoir water level in flood season. Water Power, 2016, 42(6): 61-65. (in Chinese)
- [20] 马一鸣, 邱林, 常思源, 等. 潘家口水库群汛限水位动态控制分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(1): 46-50.
MA Yiming, QIU Lin, CHANG Siyuan, et al. Dynamic control analysis of flood limit water level of Panjiakou Reservoir group.

China Rural Water and Hydropower, 2019(1): 46-50. (in Chinese)

- [21] 中华人民共和国水利部. GB/T 22482-2008 水文情报预报规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 22482-2008 standard for hydrological information and hydrological forecasting. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)