

长江上游水库群非线性安全度防洪调度策略

康玲,周丽伟,李争和,惠六一

(华中科技大学水电与数字化工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:以长江上游水库群(溪洛渡、向家坝、紫坪铺、瀑布沟、亭子口)为研究对象,提出了长江上游水库群联合防洪调度系统非线性安全度策略,构建水库群防洪库容优化分配模型,深入探讨水库群系统非线性安全度策略的防洪效果。结果表明,与线性安全度策略相比,非线性安全度策略在不降低对下游防洪效果的基础上,通过增加使用其他水库的防洪库容,以减小使用溪洛渡水库的防洪库容,使得各水库防洪库容的使用相对均衡,使各水库均衡地分摊防洪区域的防洪风险,充分发挥水库群的防洪效益,保障水库群系统稳定安全运行。

关键词:防洪调度;非线性安全度;水库群;长江流域

中图分类号:TV697.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2019)03-0001-05

Nonlinear safety degree flood control strategy of multi-reservoirs in upper Yangtze River//KANG Ling, ZHOU Liwei, LI Zhenghe, HUI Liuyi (*School of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

Abstract: The reservoirs (Xiluodu, Xiangjiaba, Zipingpu, Pubugou, and Tingzikou) in the upper Yangtze River were considered as the object of study. A nonlinear safety degree strategy for the joint flood control system of the multi-reservoirs in the upper Yangtze River was proposed, based on which a flood storage capacity optimization distribution model for multi-reservoirs was constructed and an in-depth discussion for the flood control effect of the nonlinear safety degree strategy was conducted. The results show that compared with linear safety degree strategy of multi-reservoirs, the flood control capacity of Xiluodu reservoir can be less consumed by increasing the usage of the flood control capacity in other reservoirs by the nonlinear strategy in the condition that the flood control effect of the downstream is not deteriorated. The application of the nonlinear safety degree strategy can relatively balance the flood storage capacity allocation of the reservoirs, make the reservoirs share the flood risk of the flood control areas, give full play to the flood control benefits of the reservoirs, and ensure the stable and safe operation of the multi-reservoir system.

Key words: flood control operation; nonlinear safety degree; multi-reservoirs; Yangtze River Basin

我国是一个洪水灾害频发的国家,洪水灾害造成的损失及影响范围,均居我国自然灾害的前列。作为主要的防洪工程,水库通过其防洪库容调蓄洪水,达到防洪减灾的目的。近年来,随着我国水利工程的逐步完善,各大流域水库群系统已经形成,长江流域控制性水库数量不断增加,水库建设与径流之间相互影响^[1-2],长江经济带的发展对防洪安全提出了更高的要求,水库群联合防洪调度变得更加复杂^[3-6],如何科学管理和优化分配水库群的防洪库容是流域防洪安全亟待解决的核心科学问题。

2003年,钟平安等^[7]提出逐步引入约束条件的分段试算法,以避免水库防洪调度优化问题的多解难题,提高了求解效率。2004年,苏秋红等^[8]利用

区间优化方法求解水库防洪优化调度问题,与动态规划法相比,得到了较好的结果。2008年,Wei等^[9]为使水库群系统各水库防洪库容的使用保持在一个相对平衡的状态,以水位指数表征水库的风险等级,提出了水位指标平衡法,并在此基础上建立了水库群防洪库容优化分配模型,尽可能地保持各水库的风险等级一致;2012年,陈炯宏等^[10]针对梯级水库群防洪任务和其边界条件发生变化的情况,综合考虑发电、防洪效益等目标,建立了梯级水库群防洪库容分配模型,确定了防洪库容的最优分配策略;2013年,陈炯宏等^[11]研究了主汛期三峡梯级与清江梯级水库群防洪库容的投入时机问题,比较了不同投入时机梯级水库群联合调度防洪效果,并确

定了三峡梯级与清江梯级水库群防洪库容的最优分配方案;何小聪等^[12]在分析溪洛渡、向家坝和三峡现有同步拦蓄调度策略之不足的基础上,提出了基于等比例蓄水的梯级水库群联合防洪调度策略,使水库群联合防洪调度的效益更高;2015年,Hui等^[13]发现,并联水库群各水库单位库容对洪峰削减量函数的导数相等时,对共同防洪控制站的削峰率最大,并在此基础上提出了一种最大削峰率的防洪库容优化分配模型,取得了一定的成效;贾本有等^[14]以水库安全度衡量水库大坝的防洪安全,构建复杂防洪系统多目标递阶优化调度模型,最大限度获得了水库群防洪系统防洪减灾的整体效益;2016年,Zhang等^[15]针对长江中上游大规模混联水库群提出一种等比例的防洪调度策略,能够根据流域整体防洪需求判断水库的拦洪时机,避免拦洪过早;2017年,周新春等^[16]研究了长江上游水库群各水库防洪库容的互用性,并提出了基于库容互用性的水库群防洪调度方法。上述成果极大地推动了复杂水库群系统联合防洪调度的研究,但是在实际应用中仍然存在水库群各水库防洪库容使用不均衡的问题。本文以长江上游的溪洛渡、向家坝、紫坪铺、瀑布沟、亭子口5座水库组成的水库群防洪系统为研究对象,针对各水库防洪库容使用不均衡和系统线性安全度策略存在的问题,提出水库群系统非线性安全度策略,在此基础上,建立了长江上游水库群防洪库容优化分配模型,并将其应用于长江上游水库群联合防洪优化调度中。

1 水库群系统非线性安全度策略

1.1 线性安全度

水库安全度表征水库大坝在防洪调度过程的安全程度,定义水库*i*的安全度 S_i 为^[14]

$$S_i = 1 - A_{i,\max} \quad (1)$$

其中 $A_{i,\max} = \max\{A_{i,t}, t \in [1, T]\}$ =

$$\max\left\{\frac{V_{i,t} - V_{i,\text{low}}}{V_{i,\text{up}} - V_{i,\text{low}}}, t \in [1, T]\right\}$$

式中: $A_{i,t}$ 为*i*水库*t*时刻防洪库容的使用比例; $A_{i,\max}$ 为调度期内*i*水库防洪库容的最大使用比例; $V_{i,t}$ 为*i*水库在*t*时段末的库容,亿 m^3 ; $V_{i,\text{low}}$ 为*i*水库汛限水位对应的库容,亿 m^3 ; $V_{i,\text{up}}$ 为*i*水库防洪高水位对应的库容,亿 m^3 ; T 为调度期总时段数。

式(1)中 S_i 随 $A_{i,\max}$ 的增大线性减小,因此称为水库*i*的线性安全度。根据水库线性安全度的定义,靠近水库汛限控制水位处与靠近水库防洪高水位处单位防洪库容的使用对大坝安全的影响程度相同,这与实际情况不符。实际上,靠近汛限控制水位

处单位防洪库容的使用要比靠近防洪高水位处单位防洪库容的使用对水库大坝安全的影响小,即随着水库防洪库容最大使用比例的增加,水库的安全度逐渐降低,且水库安全度的降低将逐渐加快,因此,现有的线性安全度计算方法有一定的缺点。

1.2 非线性安全度

针对上述线性安全度计算方法的缺点,提出一种非线性安全度的计算方法:

$$S_i = \sqrt{1 - A_{i,\max}^2} \quad (2)$$

式(2)中 S_i 同样随 $A_{i,\max}$ 的增大而减小,但减小的速率逐渐增大。当水库防洪库容使用比例较小时,非线性安全度下增加单位防洪库容使用比例造成其安全度的减少量,要小于线性安全度下增加单位防洪库容使用比例造成的安全度的减少量;当水库防洪库容使用比例较大时,非线性安全度下增加单位防洪库容使用比例造成其安全度的减少量,要大于线性安全度下增加单位防洪库容使用比例造成的安全度的减少量。

2 水库群防洪库容优化分配模型

2.1 目标函数

基于系统非线性安全度策略建立长江上游水库群防洪库容优化分配模型,需要考虑以下两个目标函数:①使水库群共同防洪控制站的超标洪量最小;②水库群系统非线性安全度最大。水库群共同防洪控制站流量超过其安全流量的部分即为其超标流量,因此目标函数 f_1 为

$$\min f_1 = \min W = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T w_j \max(q_{j,t} - q_{j,c}, 0) \Delta t \quad (3)$$

式中: W 为调度期所有共同防洪控制站的超标洪量,亿 m^3 ; $q_{j,t}$ 为*j*共同防洪控制站*t*时段的断面流量, m^3/s ; $q_{j,c}$ 为*j*共同防洪控制站的安全流量, m^3/s ; w_j 为*j*共同防洪控制站超标洪量的权重系数; Δt 为单位调度时长; n 为共同防洪控制站的个数。

对于由多个水库构成的水库群防洪系统,以所有水库安全度的平均值作为水库群系统的安全度,则目标函数 f_2 的数学表达式为

$$\max f_2 = \max S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i \quad (4)$$

式中: S 为水库群系统的安全度; m 为水库的个数。

根据系统非线性安全度的定义,在水库群联合防洪优化调度中,本文采用的水库群系统安全度计算方法倾向于使用安全度较大水库的防洪库容,使得各水库防洪库容的使用相对均衡。因为安全度较大水库使用的防洪库容较小,使得在后续使用其防

洪库容时,其安全度增加趋势较小。

W 和 S 量级差异大,产生不可公度性,并且两个目标式之间相互竞争,造成联合优化调度具有多目标属性。采用无量纲法和权重法相结合的处理方法,建立水库群防洪库容优化分配模型的总目标函数为

$$\min f = \alpha_1 \left(\frac{W}{W_{\max}} \right) - \alpha_2 S \quad (5)$$

式中: W_{\max} 为调度期所有共同防洪控制站的天然超标洪量,亿 m^3 ; α_1 和 α_2 分别为 f_1 和 f_2 的权重系数,由决策者选定权重系数进行优化调度计算。

2.2 约束条件

a. 水库水量平衡约束为

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + (Q_{i,t} - Q'_{i,t}) \Delta t \quad (6)$$

式中: $V_{i,t-1}$ 和 $V_{i,t}$ 分别为 i 水库 t 时段初、末的库容,亿 m^3 ; $Q'_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的出库流量, m^3/s ; $Q_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的入库流量, m^3/s 。

b. 水库库容约束为

$$V_{i,\text{low}} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\text{up}} \quad (7)$$

c. 水库出库流量约束为

$$q_{i,\text{min}} \leq Q'_{i,t} \leq q_{i,\text{max}} \quad (8)$$

式中: $q_{i,\text{min}}$ 为 i 水库出库流量的下限, m^3/s ; $q_{i,\text{max}}$ 为 i 水库出库流量的上限, m^3/s 。

d. 水库出库流量变幅约束为

$$|Q'_{i,t+1} - Q'_{i,t}| \leq R_i \quad (9)$$

式中: R_i 为 i 水库出库流量变幅上限, m^3/s 。

e. 水库自身防洪控制对象安全流量约束为

$$Q'_{i,t} \leq q_{i,c} \quad (10)$$

式中: $q_{i,c}$ 为 i 水库自身防洪控制对象安全流量, m^3/s 。

f. 河道流量演进约束为

$$q'_{r,t} = I_{r,t} + \sum_{k \in \Phi(r)} q''_{k,t-\tau(k)} \quad (11)$$

式中: $q'_{r,t}$ 为 r 河段 t 时段的来流量, m^3/s ; $I_{r,t}$ 为 r 河段 t 时段区间流量, m^3/s ; $q''_{k,t}$ 为 r 河段第 k 个人流 t 时段入流流量, m^3/s ; $\tau(k)$ 为 k 水库到下游连接水库/防洪控制站的水流滞时; $\Phi(r)$ 为 r 河段入流的集合。

考虑到水库群防洪调度实时计算的时限要求,并结合水库群个数和调度时段个数导致计算的复杂程度,尽量避免“维数灾”等问题,本文先对模型中非线性的目标函数和约束条件进行线性化处理,然后采用单纯形法求解建立的长江上游水库群防洪库容优化分配模型。

3 长江上游水库群联合防洪优化调度

3.1 研究区域概况

长江流域的洪水基本上都由暴雨形成,除青藏高原外,流域内其余地区都可能发生暴雨。上游直

门达水文站到宜宾为金沙江,其洪水由暴雨和冰雪融水共同组成。宜宾至宜昌河段,有川西暴雨区和大巴山暴雨区,暴雨频繁,岷江、嘉陵江两支流分别流经这两个暴雨区,洪峰流量甚大,暴雨走向大多和河流流向一致,使岷江、沱江和嘉陵江洪水相互遭遇,易形成寸滩站峰高量大的洪水^[17]。本文以溪洛渡、向家坝、紫坪铺、瀑布沟和亭子口 5 座水库和寸滩防洪控制站组成的水库群防洪系统为研究对象,其概化结构示意图如图 1 所示,5 座水库的特性数据如表 1 所示。水库群下游共同防洪控制站为寸滩站,以寸滩站保证水位 183.9 m 对应的流量 57 800 m^3/s 为寸滩站的安全流量。

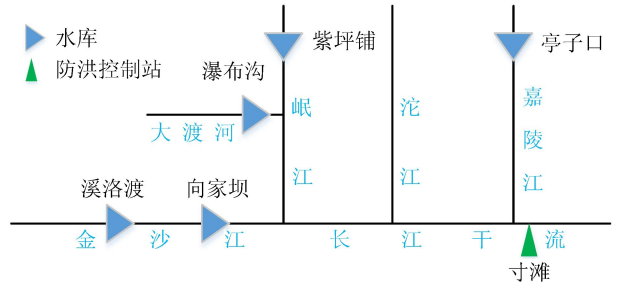


图 1 研究对象概化结构示意图

表 1 水库特性数据

水库名称	控制面积/ 万 km^2	汛限 水位/m	防洪高 水位/m	设计防洪库容/ 亿 m^3	总库容/ 亿 m^3
溪洛渡	45.44	560.0	600	46.51	129.70
向家坝	45.88	370.0	380	9.03	51.63
紫坪铺	2.27	850.0	877	1.67	11.12
瀑布沟	6.85	836.2	850	10.97	53.32
亭子口	6.10	447.0	458	10.58	40.67

3.2 计算结果及分析

以长江流域 1961 年、1981 年、1991 年和 1998 年 4 场不同类型的典型洪水按同倍比放大为 50 年一遇设计洪水作为模型输入,对溪洛渡、向家坝、紫坪铺、瀑布沟和亭子口 5 座水库组成的长江上游水库群进行联合防洪优化调度。其中,1961 年典型洪水为区间型洪水,寸滩站区间洪水占比较大;1981 年典型洪水为流域型洪水;1991 年典型洪水和 1998 年典型洪水为干流型洪水,溪洛渡水库上游洪水占比较大。为了对比分析,设置两种调度策略:水库群系统线性安全度策略(策略 1)和水库群系统非线性安全度策略(策略 2),不同策略下的优化调度计算结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,经策略 1 和策略 2 优化调度后寸滩站的超标洪量(即 f_1) 相同;在遭遇 1991 年和 1998 年设计洪水时,寸滩站均没有超标洪量;而在遭遇 1961 年和 1981 年设计洪水时,寸滩站分别产生了 11.46 亿 m^3 和 0.47 亿 m^3 的超标洪量,这表明

表2 不同策略下的优化调度计算结果

设计洪水	调度策略	寸滩站超标洪量/亿 m ³	各水库防洪库容的最大使用比例/%				
			溪洛渡	向家坝	紫坪铺	瀑布沟	亭子口
1961 年型	策略1	11.46	32.04	5.74	100	100	100
	策略2	11.46	32.00	5.94	100	100	100
1981 年型	策略1	0.47	54.53	6.58	100	100	100
	策略2	0.47	53.48	12.00	100	100	100
1991 年型	策略1	0	48.29	0	46.40	100	0
	策略2	0	42.77	9.00	46.40	100	11
1998 年型	策略1	0	60.59	0	4.92	27.39	3.73
	策略2	0	49.81	11.00	4.92	27.39	23.00

策略1和策略2对防洪控制站寸滩站超标洪量的削减效果相同。由于1961年和1981年设计洪水寸滩站区间洪水较大,各水库对寸滩站区间洪水不能进行有效的拦蓄,寸滩站产生了超标洪量,而1991年和1998年设计洪水主要发生在溪洛渡上游,水库基本能对洪水进行有效拦蓄,寸滩站没有产生超标洪量。从表2中还可以看出,经策略1和策略2优化调度后各水库防洪库容的使用情况不同。在遭遇1961年和1981年设计洪水时,策略1和策略2下紫坪铺、瀑布沟和亭子口3座水库的防洪库容均全部使用完,但策略2下溪洛渡防洪库容的使用比例减小,向家坝防洪库容的使用比例增大;在遭遇1991年和1998年设计洪水时,紫坪铺和瀑布沟2座水库防洪库容使用比例相同,但策略2下溪洛渡防洪库容的使用比例减小,向家坝和亭子口防洪库容的使用比例增大。因此,与策略1相比,策略2通过增加使用其他水库的防洪库容,减少使用溪洛渡水库的防洪库容,使各水库防洪库容的使用相对均衡。

以1998年设计洪水为例,运用策略1和策略2优化后寸滩站的流量过程如图2所示(图中时段长为6h,下同),优化后寸滩站的流量均在安全流量之下,没有产生超标洪量。策略1和策略2下各水库防洪库容使用比例变化过程如图3所示。策略1各水库防洪库容的使用呈现两极分化的现象,而策略2各水库防洪库容的使用较为均衡。从图3(a)可以看出,策略1下使用防洪库容最大的溪洛渡水库动用了60.59%的防洪库容,瀑布沟水库动用了

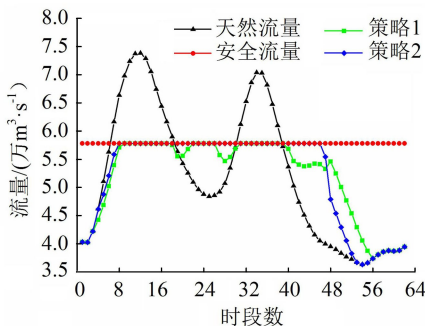


图2 优化前后寸滩站流量变化过程

27.39%的防洪库容,而其它水库的防洪库容几乎没有动用。从图3(b)可以看出,与策略1相比,策略2下溪洛渡水库的防洪库容使用比例减少(使用了49.81%的防洪库容),紫坪铺水库和瀑布沟水库的防洪库容使用比例不变,向家坝水库和亭子口水库的防洪库容使用比例均增加。因此,本文提出的水库群系统非线性安全度策略使各水库防洪库容的使用相对均衡,各水库分摊了防洪区域的防洪风险,防洪库容在各水库之间得到了更合理的分配。

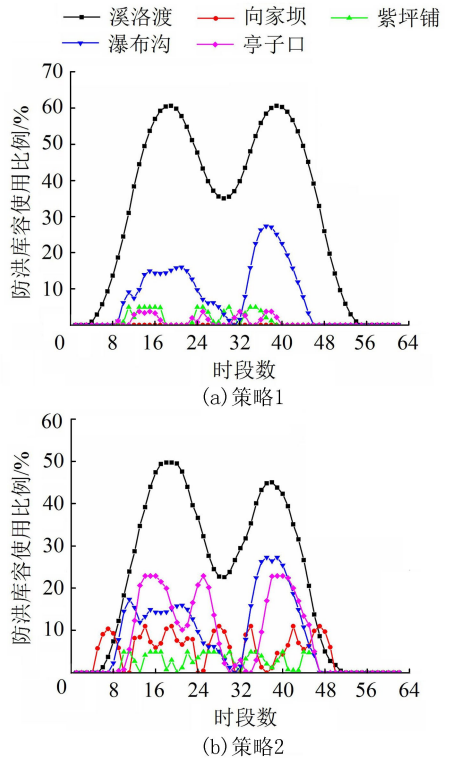


图3 各水库防洪库容使用比例变化过程

4 结语

本文针对线性安全度策略在调度中会造成单个水库防洪库容使用比例较高,导致系统防洪风险较大的问题,提出了水库群系统非线性安全度策略,以长江上游溪洛渡、向家坝、紫坪铺、瀑布沟和亭子口等5座水库组成的防洪系统为研究对象,构建基于系统非线性安全度策略的水库群防洪库容分配模型,并对调度结果进行对比分析。研究表明,与线性安全度策略相比,在不降低对下游防洪效果的基础上,非线性安全度策略通过增加使用其他水库的防洪库容,以减少使用溪洛渡水库的防洪库容,使得各水库防洪库容的使用相对均衡,有效降低水库群系统防洪风险,充分发挥水库群的防洪效益。

参考文献:

[1] 万新宇,管秀峰,钟平安,等.大型水库群对流域洪水过

- 程影响分析[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 66-71. (WAN Xinyu, GUAN Xiufeng, ZHONG Ping' an, et al. Impact of large-scale multiple reservoirs on basin flood hydrograph[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 66-71. (in Chinese))
- [2] 陈甜, 董增川, 贾本有, 等. 考虑上游梯级水库群调度的小南海水电站坝址设计洪水分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 476-480. (CHEN Tian, DONG Zengchuan, JIA Benyou, et al. Analysis of design flood of dam site of Xiaonanhai Hydropower Station considering flood control operation of upstream cascade reservoir group[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(6): 476-480. (in Chinese))
- [3] 陈娟, 钟平安, 徐斌. 基于随机微分方程的水库防洪调度风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 24-28. (CHEN Juan, ZHONG Ping' an, XU Bin, et al. Risk analysis of reservoir flood control operation based on stochastic differential equations[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(5): 24-28. (in Chinese))
- [4] 田雨, 周洋, 雷晓辉, 等. 西大洋水库防洪预报预泄调度风险问题研究[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(增刊1): 13-15. (TIAN Yu, ZHOU Yang, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Study on risk issues of pre-discharge dispatching of flood control forecast for Xidayang Reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(Sup1): 13-15. (in Chinese))
- [5] 王军, 梁忠民, 施晔. 基于 GIS 的水库洪水风险图编制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 20-25. (WANG Jun, LIANG Zhongmin, SHI Ye. Mapping of flood risk of reservoirs using GIS technology [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(1): 20-25. (in Chinese))
- [6] 郑雄伟, 马海波, 张真奇. 支流水库防洪功能定位及防洪库容设置探讨[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(4): 51-54. (ZHENG Xiongwei, MA Haibo, ZHANG Zhenqi. Flood control function and capacity of tributary reservoirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(4): 51-54. (in Chinese))
- [7] 钟平安, 邹长国, 李伟, 等. 水库防洪调度分段试算法及应用[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(6): 21-23. (ZHONG Ping' an, ZOU Changguo, LI Wei, et al. Segmentation test algorithm and application of reservoir flood control dispatching [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(6): 21-23. (in Chinese))
- [8] 苏秋红, 董增川. 区间优化方法在水库调度中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 384-386. (SU Qiuhong, DONG Zengchuan. Interval optimization and its application to reservoir regulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(4): 384-386. (in Chinese))
- [9] WEI C, HSU N. Multi-reservoir real-time operations for flood control using balanced water level index method[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(4): 1624-1639.
- [10] 陈炯宏, 郭生练, 丁毅. 梯级水库防洪库容分配策略研究[J]. 水资源研究, 2012, 1(4): 262-266. (CHEN Jiongong, GUO Shenglian, DING Yi. Storage allocation strategy for flood control of cascade reservoirs [J]. Journal of Water Resources Research, 2012, 1(4): 262-266. (in Chinese))
- [11] 陈炯宏, 丁毅, 张先平. 清江梯级和三峡梯级防洪库容投入时机方案研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 80-82. (CHEN Jiongong, DING Yi, ZHANG Xianping. Opportunity study of flood control capacity for Three Gorges and Qingjiang Cascade Reservoirs [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(2): 80-82. (in Chinese))
- [12] 何小聪, 丁毅, 李书飞. 基于等比例蓄水的长江中上游三座水库群联合防洪调度策略[J]. 水电能源科学, 2013, 1(1): 38-41. (HE Xiaocong, DING Yi, LI Shufei. Joint flood control operation strategy of three reservoirs in middle and upper reaches of Yangtze River based on equal proportion water storage [J]. Water Resources and Power, 2013, 1(1): 38-41. (in Chinese))
- [13] HUI R, LUND J R. Flood storage allocation rules for parallel reservoirs [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 141(5): 1876-1885.
- [14] 贾本有, 钟平安, 陈娟, 等. 复杂防洪系统联合优化调度模型[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 560-571. (JIA Benyou, ZHONG Ping' an, CHEN Juan, et al. Coordinated optimal operation model of complex flood control system [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(4): 560-571. (in Chinese))
- [15] ZHANG S, KANG L, HE X. Equal proportion flood retention strategy for the leading multi-reservoir system in Upper Yangtze River [C]. International Conference on Water Resources and Environment, WRE 2015, London: CRC Press/Balkema Taylor & Francis Group, 2016: 109-114.
- [16] 周新春, 许银山, 冯宝飞. 长江上游干流梯级水库群防洪库容互用性初探[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 421-428. (ZHOU Xinchun, XU Yinshan, FENG Baofei. An exploration on the interoperability of the flood control capacities of cascade reservoir groups in the upper reaches of Yangtze River [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(3): 421-428. (in Chinese))
- [17] 游中琼. 溪洛渡水库对川江河段防洪调度方式初步研究[C]//中国水力发电工程学会水水泥沙专业委员会. 中国水力发电工程学会水水泥沙专业委员会第四届学术讨论会论文集. 北京: 中国水力发电工程学会水水泥沙专业委员会, 2003: 454-459.

(收稿日期: 2018-05-09 编辑: 郑孝宇)