

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.003

飞来峡水库洪水资源化利用与风险分析

刘 达^{1,2,3,4}, 黄本胜^{1,2,3,4}, 赵璧奎^{1,2,3,4}, 谭 超^{1,2,3,4}, 邱 静^{1,2,3,4}, 李 明^{1,2,3,4}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510635; 3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510635; 4. 广东省水安全科技协同创新中心, 广东 广州 510635)

摘要:针对北江流域河道型水库飞来峡水库洪水资源化利用问题,基于多约束的河道型水库水资源高效利用原则,构建了水库防洪调度模型。基于决策树法分析了加快汛末回蓄和提高正常蓄水位两种优化调度方案下飞来峡水库洪水资源可利用量的变化规律,并采用随机洪水过程方法模拟计算了两种方案下洪水资源利用的风险概率。结果表明:抬高飞来峡水库正常蓄水位至24.8 m时属于风险边际增量较小的推荐方案,可年均增加水资源利用量6.46亿m³,对于缓解供水紧张局面具有显著效果。

关键词:洪水资源化利用;河道型水库;水库防洪调度模型;北江流域;飞来峡水库

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0018-07

Flood resource utilization and risk analysis of Feilaixia Reservoir//LIU Da^{1,2,3,4}, HUANG Bensheng^{1,2,3,4}, ZHAO Bikui^{1,2,3,4}, TAN Chao^{1,2,3,4}, QIU Jing^{1,2,3,4}, LI Ming^{1,2,3,4} (1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamic Research, Guangzhou 510635, China; 3. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510635, China; 4. Guangdong Provincial Science and Technology Collaborative Innovation Center for Water Safety, Guangzhou 510635, China)

Abstract: In response to the issue of flood resource utilization of the Feilaixia Reservoir, a river-type reservoir in the Beijiang River Basin, a reservoir flood control operation model was constructed based on the principle of efficient utilization of water resources in river-type reservoirs with multiple constraints. Based on the decision tree method, the variation law of the available amount of flood resources under two optimization scheduling schemes of accelerating re-storage in end of flood season and raising normal water storage level was analyzed. The stochastic flood process method was used to simulate and calculate the risk probability of flood resource utilization under both schemes. The results show that raising normal storage level of Feilaixia Reservoir to 24.8 meters is a recommended solution with a small marginal increase in risk, which can increase the annual water resource utilization by 646 million cubic meters and has a significant effect on alleviating water supply shortages.

Key words: flood resources utilization; river-type reservoir; reservoir flood control operation model; Beijiang River Basin; Feilaixia Reservoir

全球气候条件变化导致极端天气出现频率增加,涝旱急转已经成为一种新情势。以长江流域为例,2022年汛期后持续高温少雨,从防汛很快转入抗旱,极端气候情势叠加用水需求的不断增长,导致非汛期水资源短缺的矛盾愈发突出^[1]。如何通

过非工程措施更安全地利用洪水资源,成了抗旱保供水的重要途径,也是当下研究的前沿热点问题。洪水资源化是指在保障防洪安全前提下,尽量利用水库、拦河闸坝、自然洼地、人工湖泊、地下水库等蓄水工程拦蓄洪水,以及延长洪水在河道、水库、蓄滞

基金项目:广东省自然科学基金项目(2021A1515012077);粤港水安全保障联合实验室资金支持项目(2020B1212030005);广东省水利科技创新项目(2022-01,2021-01,2017-13);广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515010898);广州市科技计划项目(202201011541);省属科研机构稳定性支持专项资金院自设课题项目(2021L027,221016)

作者简介:刘达(1981—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水库优化调度研究。E-mail:12196199@qq.com

通信作者:赵璧奎(1985—),男,正高级工程师,博士,主要从事水库优化调度研究。E-mail:674860282@qq.com

洪区等的滞留时间,并将洪水资源利用于生产生活、恢复河流及湖泊、洼地的生态环境和最大可能地补充地下水^[2-5]。洪水预报技术的迅速发展为水库动态调度的实施提供了重要的技术保障^[6-7],从而使其成为洪水资源安全利用的一个重要前提,许多学者对此进行了研究。例如:张验科等^[8]提出潘口水库利用预报预泄法实施汛期运行水位动态控制可提高洪水资源利用率;陈守煜^[9]根据模糊集合论提出了描述汛期的模糊集合论,利用模糊集合分析方法来解决汛期分期问题;侯玉等^[10]将分形理论用于洪水分期进行了初步探讨;胡四一等^[11]开展了海河流域典型水库分期汛限水位调控洪水资源的应用研究;李煜连等^[12]通过综合估算方法量化了湘江流域洪水资源;蔡旭东等^[13-14]在总结调度实践基础上,提出了针对中小洪水探讨飞来峡水库优化调度既有必要,又有潜在优化空间。近年来,国内对于洪水资源化的调度实践也越来越多,水利部淮河水利委员会协调江苏、安徽两省,将洪泽湖后汛期控制水位抬高0.5 m,多调蓄洪水4亿~12亿 m^3 ;海河流域近年来调整了岳城、潘家口、密云等水库的汛限水位,全流域30座大型水库平均每年增加兴利库容13亿~26亿 m^3 。

本文以北江流域飞来峡水库为研究对象,通过构建基于动库容模拟及库区淹没安全约束的水库防洪调度模型,以洪水资源安全利用为研究目标,探索河道型水库调度方式优化和改进,采用蒙特卡洛随机洪水过程模拟洪水资源利用的风险概率,提出收益较优且风险较低的优化调度方案,以期为北江流域洪水资源安全利用提供参考。

1 研究区概况

北江是珠江流域的第二大水系,是广东省最重要的河流之一,全长约470 km,流域面积42930 km^2 ,概况见图1。目前,北江流域人多水少、水资源时空分布不均的基本水情和工业化、城市化进程引起的水资源与水环境问题成了流域内经济社会可持续发展的重要制约因素^[15]。北江流域洪水资源的安全利用研究对缓解流域水资源供需紧张情势、提升粤港澳大湾区水资源保障能力具有重要的意义^[16]。飞来峡水库位于北江干流中游,是一座典型的河道型水库。飞来峡水库具有全流域最大的调洪库容,是以防洪为主,兼有航运、发电等功能的大型综合性水利枢纽工程^[17],为北江下游及珠江三角洲提供了可靠的防洪安全保障。

2 防洪调度模型构建与求解

飞来峡水利枢纽防洪调度模型需要统筹考虑上

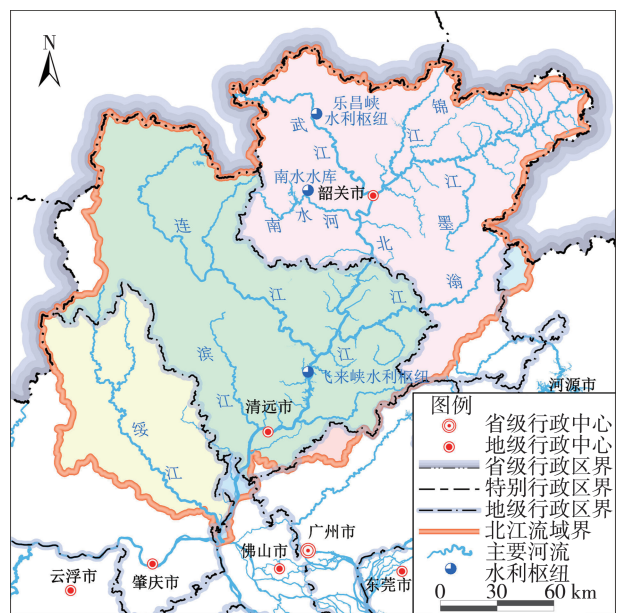


图1 北江流域概况

Fig. 1 Overview of Beijiang River Basin

游库区淹没控制、下游北江大堤防洪安全、水电站发电、河道航运等约束条件。飞来峡水库是典型的河道型水库,其调洪演算需要考虑动库容影响^[18-19],本文选择基于河道水力学模型的非恒定流方法计算河道洪水演进过程及水面线变化,并以此推求河道型水库的库容动态变化,代替原设计静态的水位库容曲线,实现动库容调洪计算,同时利用水面线判断坝址上游49.5 km处的英德市淹没敏感断面在调洪过程中是否处于淹没状态,作为判断模型解是否可行的约束条件。

2.1 河道水动力模型构建

选取北江干流韶关水位站至三水河口长度约257 km河道,布设396个断面,利用MIKE11平台建立一维河道水动力学模型。梯级水利枢纽作为可控水工建筑物水闸工程在一维河道水动力学模型中设置调度规则,实现防洪调度规则的模拟。一维河网数学模型的基本方程采用圣维南方程组求解,方程离散采用四点加权Preissmann固定网格隐式差分格式,应用一维河网三级联解算法进行求解。

采用2002年8月10日的洪水过程进行模型率定,该场洪水北江石角水文站的洪峰流量为11700 m^3/s ;采用2002年10月31日—11月1日的洪水过程进行模型验证,该场洪水北江石角水文站的洪峰流量为9050 m^3/s 。北江干流各水文(位)站的最高水位计算值与实测值相差均在0.1 m以内。利用所构建的一维水动力学模型建立飞来峡水库水位-流量-库容动态关系曲线。河道型水库的动库容 W_d 可以分离为河道槽蓄动库容 W_r 及库区楔蓄动库容 W_u 两部

分^[20],推求不同水库水位、入库流量组合下的水面线族,图2为 t 时刻坝前水位 $Z_t = 24$ m的情况。图3为基于水面线积分法的水库动库容计算示意图,在假定入库流量 Q_t 、坝前水位 Z_t 的基础上,计算水面线 AD ,并基于水面线成果及河道断面数据 a 、 b 、 c 、 a' 、 b' 、 c' ,推求河段 $L_k \sim L_{k+1}$ 的水体体积 V_k ,逐河段水体容积累计计算得到水库蓄水量 $W = W_r + W_u$ 。

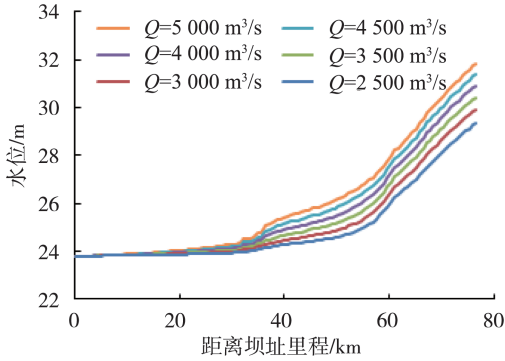


图2 $Z_t = 24$ m 时不同入库流量下飞来峡水库库区水面线
Fig.2 Water surface in reservoir area of Feilaixia Reservoir under different inlet flows when $Z_t = 24$ m

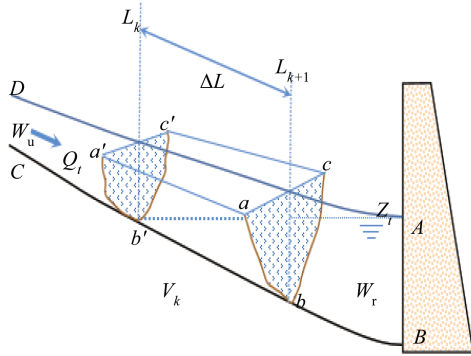


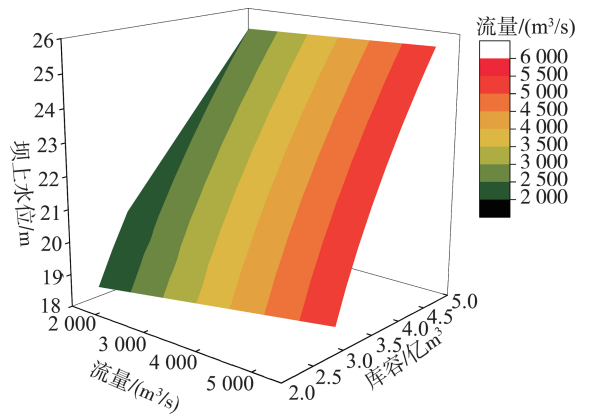
图3 基于水面线积分法的水库动库容计算示意图
Fig.3 Schematic diagram of reservoir dynamic storage capacity based on integration method

通过不同的入库流量、坝前水位组合计算结果可以建立动库容条件下的水库水位-流量-库容关系曲线(V - Q - Z),如图4所示,图4(b)中流量单位为 m^3/s 。根据所建立的 V - Q - Z 三维关系曲面计算水量平衡约束插值,替代传统水库调度模型中的静态水位库容曲线插值。

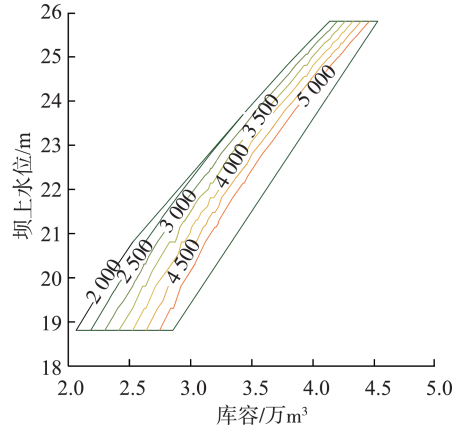
2.2 优化调度迭代模型构建

2.2.1 防洪目标函数

飞来峡水库汛期以防洪调度为主要目标,在中小洪水量级调度中兼顾发电、航运等其他功能。水库结合洪水预报成果制定调度方案,根据预报入库洪水过程、动库容特性及溢洪道闸门泄流曲线等,在充分考虑各种上下游防洪条件的情况下,根据水量平衡约束计算水库出库流量过程及相应的水库上下游水位、发电流量、闸门开启数量、电站发电量等变量。



(a) 三维曲面关系



(b) 二维平面投影

图4 飞来峡水库水位-流量-库容动态关系

Fig.4 Surface of water level-flow-volume dynamic relationship in Feilaixia Reservoir

飞来峡水库汛期水位控制的防洪调度目标为各时段实际运行水位与调度方案确定目标水位的偏差绝对值之和最小化,防洪调度目标函数为

$$F = \min \sum_{t=1}^T |Z_{\text{goal}} - Z_t| \quad (1)$$

式中: F 为防洪调度目标函数值; Z_{goal} 为调度方案所确定的汛期各时段运行水位上限值; T 为总时段数。

2.2.2 主要约束条件

主要包括水量平衡约束、上游控制断面(英德)水位约束、闸门泄流能力约束、机组过流能力约束等。

a. 水量平衡约束:

$$\frac{(Q_1 + Q_2)\Delta t}{2} - \frac{(q_1 + q_2)\Delta t}{2} = V_2 - V_1 \quad (2)$$

式中: Q_1 、 Q_2 分别为时段初、末水库的入库流量; q_1 、 q_2 分别为时段初、末水库的出库流量; V_1 、 V_2 分别为时段初、末水库的蓄水量; Δt 为时段长度。

b. 水库上游的英德断面控制水位约束:

$$Z_{t, \text{英德}} \leq 31.97 \text{ m} \quad (3)$$

式中: $Z_{t, \text{英德}}$ 为 t 时段英德断面的最高水位。以上游英德水位作为上游库区淹没的控制点,当入库流量小于 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,即水库处于控泄状态,上游英德最高水位不得超过其淹没临界水位 31.97 m 。需要利用前文所构建的 $V-Q-Z$ 动库容关系曲线,以时段初水库蓄水量、时段平均入库流量推求坝前水位水面线,得到上游英德断面的实际水位,判断约束条件是否满足。

c. 闸门过流能力约束:

$$q_t \leq g(Z_{\text{up},t}, Z_{\text{down},t}) \quad (4)$$

式中: q_t 为 t 时刻的平均单孔闸门的下泄流量; $g(Z_{\text{up},t}, Z_{\text{down},t})$ 为闸门泄流能力曲线,与 t 时段的上游水位 $Z_{\text{up},t}$ 、下游水位 $Z_{\text{down},t}$ 有关。根据闸门泄流能力曲线、出库流量推求闸门开启数量。

d. 机组过流能力约束:

$$Q_t \leq f(Q_{\text{out},t}, H_t) \quad (5)$$

式中: Q_t 为 t 时段的水库发电流量; $f(Q_{\text{out},t}, H_t)$ 为 t 时段对应水头下的机组最大发电流量,是 t 时段的出库流量 $Q_{\text{out},t}$ 、时段平均水头 H_t 的函数。

2.3 模型的求解

飞来峡水库汛期水位动态控制调度以 $Q_{\text{out},t}$ 为决策变量, $Q_{\text{max}} = \max(Q_{\text{in},t}, Q_{\text{in},t+1}, \dots, Q_{\text{in},t+24})$ 为预报未来24 h内的最大流量,采用基于约束条件检验的决策树分析法,先按照水量平衡约束和时段末目标水位、调度规则,确定 $Q_{\text{out},t}$ 的初始解,按照优先级由弱到强的顺序逐一对约束条件进行判断迭代修正 $Q_{\text{out},t}$ 直至当前时段的决策变量可以满足全部约束条件,模型求解流程如图5所示($\Delta t = 1 \text{ h}$)。图中 $Q_{\text{in},t}$ 为 t 时段的入库流量,即在实时调度中的预报未来1 h的入库流量; $Z_{\text{up},t-1}$ 为当前时段的起始水位; $Z_{\text{goal},t}$ 为根据调度规程确定的当前时段的控制目标水位; $Q'_{\text{out},t}$ 为经过约束条件修正后的 t 时段平均出库流量最优解。根据出库流量、时段水位推求水库闸门开启数量、水电站时段发电量等。

3 水库洪水资源利用方案

飞来峡水利枢纽作为广东省北江流域最重要的防洪控制性枢纽,水库总库容 19.04 亿 m^3 ,发电装机容量 140 MW ,正常蓄水位 24 m ,设计洪水位 31.17 m ,校核洪水位 33.17 m ,防洪最高水位 31.17 m ,汛期运行最低水位 18 m ,设计最大洪峰流量 $28700 \text{ m}^3/\text{s}$ 。设计阶段水库确定了预报预泄调度方式,调度规程包括水库防洪运行调度和水库发电运行调度两方面。主汛期大洪水、较大洪水的调度以防洪为主,发电调度服从防洪调度;中小洪水的水库运行调度必须兼

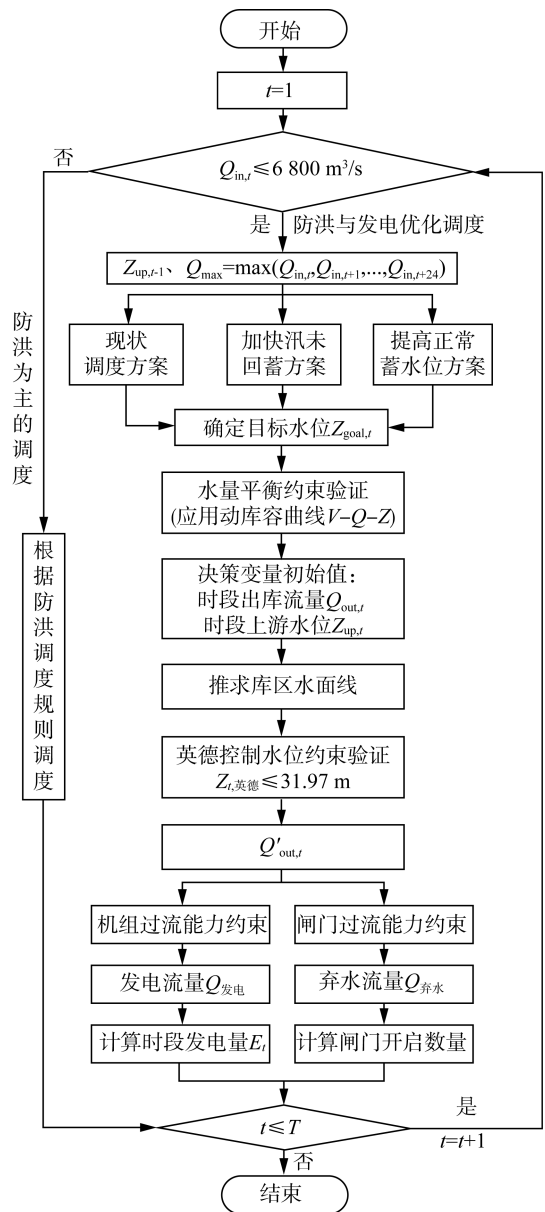


图5 防洪调度模型求解流程

Fig. 5 Flow chart of flood control dispatching model

顾防洪、航运及发电要求,同时协调好上游英德与下游清远之间的蓄洪淹没与防洪减灾关系,在确保工程安全的前提下,充分发挥工程的综合效益。上游控制条件:电站正常蓄水位 24 m ,发电回水以不影响上游英德为原则,为使控制英德发电回水位不超过 24.5 m ,水库需进行预报预泄发电调度;下游控制条件:为保证清远和下游中小堤围的安全,发电调度的最大预泄流量控制不超过 $5000 \text{ m}^3/\text{s}$,以控制清远不超过防汛警戒水位 12 m 。具体的调度规则见表1、表2, $Q_{\text{预}}$ 为预报未来24 h入库流量, $Q_{\text{泄}}$ 为水库下泄量, $Z_{\text{库}}$ 为目标水库水位。

蔡旭东等^[13]分析了飞来峡初期发电调度情况,提出了采取提高发电水头、减少水头损失和洪尾提前回蓄等措施,从而有效提高枢纽水资源利用率。

表1 水库预泄调度规则

Table1 Reservoir pre-discharge scheduling rules

$Q_{预}/(m^3/s)$	$Q_{泄}/(m^3/s)$	Z_t/m	$Z_{库}$ 达到后的要求
0~1700	等于 $Q_{坝}$	24	
>1700~2500	3000	23	维持 23 m
>2500~3000	3500	22	维持 22 m
>3000~3500	4000	21	维持 21 m
>3500~4000	4500	20	维持 20 m
>4000~5000	5000	18	维持 18 m
>5000~6800	等于 $Q_{坝}$	18	维持 18 m
>6800	进入防洪调度		按泄流曲线调度

表2 水库回蓄调度规则

Table 2 Reservoir re-storage scheduling rules

$Z_{up,t}/m$	$Q_{预}/(m^3/s)$	Z_t/m	$Q_{泄}/(m^3/s)$	$Z_{库}$ 水达到后的要求
18~20	>3500~4000	20	1800	维持 20 m
>20~21	>1700~3500	21	1450	维持 21 m
>21~22	>1700~3000	22	1400	维持 22 m
>22~23	>1700~2500	23	860	维持 23 m
>23~24	0~1700	24	860	维持 24 m

本文在水库现状预报预泄调度方式基础上,统筹考虑上下游防洪安全要求,在洪水涨水期按照现有规程调度,以洪水退水回蓄阶段作为优化调度切入点,提出枢纽调度方式的两个优化方向:①加快汛末回蓄方案,即考虑提前汛末蓄水实践,加快汛期末水库蓄水量;②提高正常蓄水位方案,即适当抬高水库的正常蓄水位,以增加水库需水量。并围绕这两种优化方案,以1953—2015年逐小时入库流量过程为输入条件,按照现状调度方案和两种优化调度方案,利用防洪调度模型进行调度模拟,对比分析两种优化调度方案的洪水资源化利用效益。

3.1 加快汛末回蓄方案

表3为加快汛末回蓄方案调度规则。由表3可见,如果预报来水不超过 $4000 m^3/s$ 时,要求回蓄到21 m,较现状调度方案提高1 m水位;在预报来水不超过 $2500 m^3/s$ 时,要求回蓄到24 m,较现状调度方案也提高1 m水位。洪水资源可利用量计算采用扣除法,即将水库弃水量部分作为不可利用量给予扣除,以此评价水资源利用效率。加快汛末回蓄方案1954—2014年月均洪水资源可利用量见图6,可见,该优化方案多年平均增加洪水资源可利用量 0.64 亿 m^3 ,平均每月增加 500 万 m^3 。图7为1954—2014年不同方案洪水资源量,可见洪水资源可利用量增加幅度受径流量影响年际变化较大,最大值年份为1973年,新增洪水资源利用量 3.56 亿 m^3 ,最小值年份为1991年,仅在5月增加洪水资源利用量 200 万 m^3 。对1954—2014年长系列洪水资源量趋势分析表明,加快汛末回蓄方案的洪水资源可利用

量增加幅度与当年洪水场次数量呈现正相关关系,即洪水场次越多洪水资源可利用量也相对越大。

表3 加快汛末回蓄方案调度规则

Table 3 Scheduling rules of accelerating re-storage in end of flood season scheme

$Z_{up,t}/m$	$Q_{预}/(m^3/s)$	$Z_{库}/m$		$Q_{泄}/(m^3/s)$	$Z_{库}$ 水达到后的要求
		现状方案	加快回蓄		
18~20	>3500~4000	20	21	1800	维持 20 m
>20~21	>1700~3500	21	22	1450	维持 21 m
>21~22	>1700~3000	22	23	1400	维持 22 m
>22~23	>1700~2500	23	24	860	维持 23 m

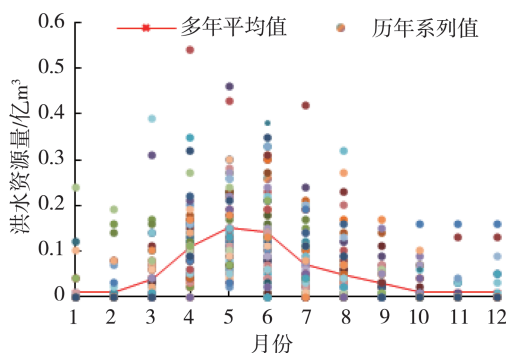


图6 加快汛末回蓄方案1954—2014年月均洪水资源量
Fig.6 Monthly average available amount of flood resources for accelerating re-storage in end of flood season scheme from 1954 to 2014

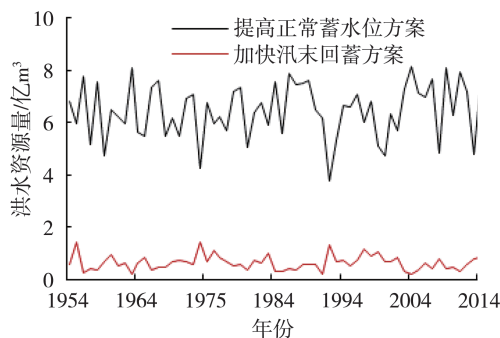


图7 1954—2014年不同方案洪水资源量
Fig.7 Flood resources of different schemes from 1954 to 2014

3.2 提高正常蓄水位方案

飞来峡水库设计正常蓄水位为24 m,如果通过工程扩容改造提高正常蓄水位,造成风险主要包括预泄腾库流量和上游常水位的淹没面积增加。水库上游淹没的主要区域是英德城区及英德平原,英德城区沿北江的最低道路高程为25 m,英德平原人口密集、城乡连片,最低高程约为26 m左右,综合考虑以上因素,将正常蓄水位提高至25 m是保证上游常水位不增加淹没面积的上限值。在此情况下,对1954—2014年长系列数据进行计算分析,得到提高水库正常蓄水位方案可增加多年平均洪水资源可利用量为 6.46 亿 m^3 ,平均每月增加 5400 万 m^3 ,月均

洪水资源可利用量如图 8 所示。从年内分布看,后汛期(7—9 月)及枯水期(10 月至次年 3 月)平均洪水资源可利用量增幅较大,主汛期(4—6 月)的洪水资源可利用量增幅较低。洪水资源可利用量年际变化较大,最大值年份是 2004 年,新增洪水资源利用量 8.74 亿 m^3 ,最小值年份是 1992 年,新增洪水资源利用量 5 600 万 m^3 。经分析,提高正常蓄水位方案多年平均可增加的洪水资源可利用量与当年洪水场次数量呈现负相关关系,原因是洪水场次多的年份水库需要频繁降低水位、预泄弃水,洪水资源较难蓄存利用。

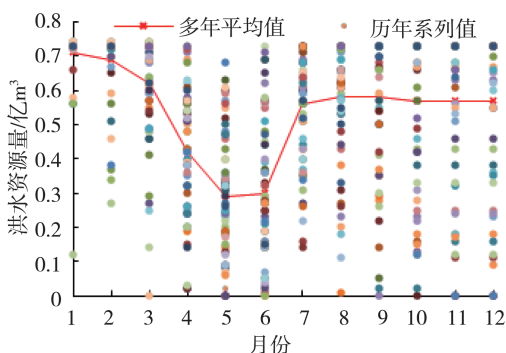


图 8 提高正常蓄水位方案 1954—2014 年月均洪水资源量

Fig. 8 Monthly average available amount of flood resources for raising normal water storage level scheme from 1954 to 2014

4 优化调度方案的风险分析

4.1 洪水资源利用风险定义及风险因子

a. 风险识别。由于洪水资源利用的主要调控手段是增加水库蓄水,在获得增加蓄水综合效益的同时,水库高水位运行持续时间的延长必然会增加洪水灾害的风险^[21]。本文中洪水风险主要表现为水库上游英德断面水位超过 31.97 m 时造成英德市城区临时淹没的风险,以及水库下泄流量超过北江石角断面 1.5 万 m^3/s 的安全泄量的风险,在调度模拟过程中,这两种风险是互相关联的。由于上游英德城区人口众多,临时淹没的风险不可承受,因此在模拟过程中将预泄阶段上游英德断面水位不超过 31.97 m 作为约束条件处理,所有方案可行解必须满足该约束条件,即上游英德断面水位超过 31.97 m 不作为风险事件,仅把超过下游控制断面安全泄量 15 000 m^3/s 定义为风险事件,通过大量的洪水样本模拟统计该风险事件发生概率。

b. 洪水样本随机生成。洪水资源利用的风险分析需要有足够的洪水样本数量支撑风险率计算。对于径流式电站,其防洪风险主要受洪峰流量决定,洪量影响相对较小。因此,采用洪峰流量为单因子

进行洪水过程随机模拟。在考虑洪水预报误差情况下,以 q, q' 分别表示入库洪峰实测值和预报值,并定义预报误差为 $e = (q - q')/q$ 。根据预报误差的相关研究,假设预报误差服从对数正态分布^[21],利用历史洪水和预报洪水资料统计得到该分布的主要函数,在此基础上利用蒙特卡洛方法随机生成预报误差系列,叠加在基于历史实际典型洪水过程上得到的随机生成的模拟入库洪水过程系列样本。选取飞来峡枢纽 2003—2016 年编号为 200306 ~ 201606 的 20 场实测洪水过程作为典型洪水,并以这 20 场洪水为原型随机生成了 2 000 场洪水样本,利用其作为防洪调度模型的输入条件,进行大量的随机模拟计算。

4.2 洪水资源利用风险模拟的随机洪水过程

对提高正常蓄水位方案(水位提高幅度 ΔH 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 m,共 10 组)以及现状情况(正常蓄水位 24 m)、加快汛末回蓄方案等一共 12 个组次进行模拟,每个组次模拟 2 000 场随机洪水样本,计算不同方案的风险率,以现状情况为参照计算风险率增量,结果见图 9。由图 9 可见,加快汛末回蓄方案较现状情况风险率增加了 9.96%;优化方案的风险率相对比现状情况均增大,每提高 1 m 水位,洪水风险率平均增加 0.86%,随着水库正常蓄水位提高,风险概率呈现一致的增加趋势。提高正常蓄水位方案的水位增幅与风险率增幅并非简单的线性关系,在正常蓄水位 25.4 ~ 24.8 m 范围内,风险概率增幅较小,风险概率为 1.32% ~ 2.72%;当水库正常蓄水位超过 24.8 m 时,风险概率增速更高;在 25.4 m 时开始趋缓,至 26.0 m 时风险概率增加至 8.64%。加快汛末回蓄方案的洪水风险概率最大,达到 9.96%。从风险率变化趋势和不同方案风险率增加幅度分析,抬高正常蓄水位至 24.8 m 边际最优,属可行方案。

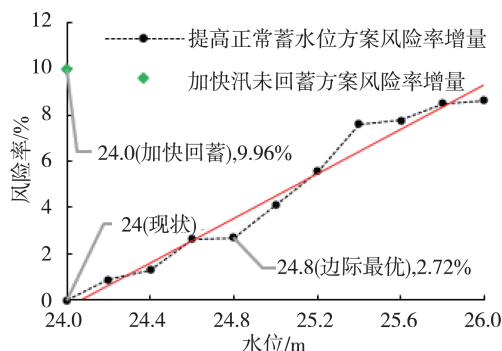


图 9 基于场次洪水过程随机模拟的风险概率分析结果

Fig. 9 Risk probability analysis result based on stochastic simulation of field flood processes

5 结 语

洪水资源化对于缓解流域水资源供需矛盾、有效应对涝旱急转的不利现象具有重要意义。本文以北江流域飞来峡水利枢纽为研究对象,基于河道一维水动力学模型,实现库区淹没水位判断,建立水库V-Q-Z关系,构建了河道型水库动库容防洪调度模型。利用1954—2014年径流资料模拟分析了加快汛末回蓄方案和提高正常蓄水位方案的洪水资源可利用量增加效果,采用蒙特卡洛随机模拟方法,评估了不同方案增加洪水灾害的风险率。结果表明,加快汛末回蓄方案可增加洪水资源可利用量多年平均值为6400万 m^3 ,最大值为3.56亿 m^3 ,其洪水资源可利用量增幅与当年洪水场次数量呈现正相关关系;提高正常蓄水位方案可增加洪水资源可利用量多年平均值为6.46亿 m^3 ,最大值为8.74亿 m^3 ,其洪水资源可利用量增幅与当年洪水场次数量呈现负相关关系。洪水过程随机模拟结果表明,抬高正常蓄水位至24.8m的方案其风险率边际最优,可作为推荐方案。

参考文献:

- [1] 王蔚,董增川,崔璨,等.基于洪水资源化的洪泽湖后汛期蓄水策略[J].水资源保护,2023,39(2):168-179. (WANG Wei, DONG Zengchuan, CUI Can, et al. Water storage strategy in post-flood period for Hongze Lake based on flood utilization [J]. Water Resources Protection, 2023,39(2):168-179. (in Chinese))
- [2] 胡庆芳,王银堂,杨大文.流域洪水资源可利用量和利用潜力的评估方法及实例研究[J].水力发电学报,2010,29(4):20-27. (HU Qingfang, WANG Yingtang, Yang Dawen. Assessment approach for flood resources availability and utilization potentiality and its application [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29(4):20-27. (in Chinese))
- [3] 刘建卫,许士国,张柏良.区域洪水资源开发利用研究[J].水利学报,2007,38(4):492-497. (LIU Jianwei, XU Shiguo, ZHANG Bailiang. Study on utilization of regional flood water [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(4):492-497. (in Chinese))
- [4] 王显峰,杨博石,张贵金,等.涿天河水库提升汛限水位方案探讨[J].湖南水利水电,2020(2):10-13. (WANG Xianfeng, YANG Boshi, ZHANG Guijin, et al. Discussion on strategy of raising flood control water level in Centianhe Reservoir [J]. Hunan Hydropower, 2020(2):10-13. (in Chinese))
- [5] 陈柯兵,黄韬幸.水库超蓄利用的效益与风险初探[J].人民长江,2014,45(13):6-8. (CHEN Keping,

HUANG Taoting. Preliminary analysis on benefit and risk of over-impoundment operation of reservoirs [J]. Yangtze River,2014,45(13):6-8. (in Chinese))

- [6] 荣艳淑,胡玉恒,冯瑞瑞,等.广义相加模型在乌江夏季径流预报中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):121-126. (RONG Yanshu, HU Yuheng, FENG Ruirui, et al. Application of generalized additive model in summer runoff forecasting of Wujiang Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):121-126. (in Chinese))
- [7] 谷洪钦,刘开磊,刘玉环,等.综合多源不确定性的洪水概率预报试验[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):99-104. (GU Hongqin, LIU Kailei, LIU Yuhuan, et al. Experiments on flood probability forecasting accounting for multi-source uncertainty [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):99-104. (in Chinese))
- [8] 张验科,张佳新,俞洪杰,等.考虑动态洪水预见期的水库运行水位动态控制[J].水力发电学报,2019,38(9):64-72. (ZHANG Yanke, ZHANG Jiabin, YU Hongjie, et al. Dynamic control of reservoir operating stage considering dynamic flood forecast period [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2019,38(9):64-72. (in Chinese))
- [9] 陈守煜.从研究汛期描述水文系统模糊集分析的方法论[J].水科学进展,1995(2):133-138. (CHEN Shouyu. Methodology of fuzzy sets analysis to hydrologic system from research on flood period description [J]. Advances in Water Science, 1995(2):133-138. (in Chinese))
- [10] 侯玉,吴伯贤,郑国权,等.分形理论用于洪水分期的初步探讨[J].水科学进展,1999,10(2):140-143. (HOU Yu, WU Boxian, ZHENG Guoquan, et al. Preliminary study on the seasonal periods classification of floods by using fractal theory [J]. Advances in Water Science, 1999,10(2):140-143. (in Chinese))
- [11] 胡四一,程晓陶,户作亮,等.海河流域洪水资源安全利用关键技术研究[J].中国水利,2004(22):49-51. (HU Siyi, CHENG Xiaotao, HU Zuoliang, et al. Study on key technology for safe utilization of flood resources in Haihe River Basin [J]. China Water Resources, 2004(22):49-51. (in Chinese))
- [12] 李煜连,钟小敏,帅红,等.湘江流域洪水资源可利用量与水库调蓄方案研究[J].水电能源科学,2022(1):84-87. (LI Yulian, ZHONG Xiaomin, SHUAI Hong et al. Available flood resources and reservoir regulation and storage plan in Xiangjiang River Basin [J]. Water Resources and Power,2022(1):84-87. (in Chinese))

(下转第108页)

- [34] 金纯,姜翠玲,吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):8-14. (in Chinese))
- [35] 潘扎荣,阮晓红,徐静. 河道基本生态需水的年内展布计算法[J]. 水利学报,2013,44(1):119-126. (PAN Zharong, RUAN Xiaohong, XU Jing. A new calculation method of instream basic ecological water demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1):119-126. (in Chinese))
- [36] 中华人民共和国水利部. 河湖生态环境需水计算规范: SL/T 712—2021 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [37] 刘宝库. 岗南-黄壁庄水库群防洪预报调度研究[D]. 大连:大连理工大学, 2022.
- [38] 杨冬. 水库调度中的多目标优化问题的研究与应用 [D]. 武汉:华中科技大学, 2018.
- [39] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [40] ALAHDIN S, GHAFOURI H R, HAGHIGHI A. Multi-reservoir system operation in drought periods with balancing multiple groups of objectives [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(2): 914-922.
- [41] 龚元石, 陆锦文, HUWE B, 等. 华北平原主要农作物灌溉需水量的估算 [J]. 北京农业大学学报, 1993, 19(增刊1): 82-91. (GONG Yuanshi, LU Jinwen, HUWE B, et al. Estimation of Irrigation water requirements for main crops in North China Plain [J]. Journal of China Agricultural University, 1993, 19(Sup1): 82-91. (in Chinese))
- [42] 韦婉. 海河流域典型灌区节水水平评估及节水潜力估算 [D]. 天津:天津大学, 2017.

(收稿日期:2022-12-27 编辑:施业)

(上接第24页)

- [13] 蔡旭东. 飞来峡水利枢纽初期发电运行调度分析 [J]. 人民珠江, 2002(5): 40-42. (CAI Xudong. Analysis of the prime power generation and regulation of Feilaixia Water Control Project [J]. Pearl River, 2002(5): 40-42. (in Chinese))
- [14] 黄焕坤. 飞来峡水库的运行特点 [J]. 广东水利水电, 2001(增刊3): 44-45. (HUANG Huankun. Operaiton characteristics of Feilaixia Reservoir [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2002(Sup3): 40-42. (in Chinese))
- [15] 黄本胜, 李深林, 邱静, 等. 脏盆理论: 一种基于河湖水质影响的地表水资源评价新方法 [J]. 水利学报, 2021, 52(2): 150-157. (HUANG Bensheng, LI Shenlin, QIU Jing, et al. Dirty basin theory: a new method of water resources evaluation considering influence of river and lake water quality [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2): 150-157. (in Chinese))
- [16] 廖一帆, 林炳章, 丁辉. 广东省暴雨高风险区划 [J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 7-16. (LIAO Yifan, LIN Bingzhang, DING Hui. High-risk rainstorm zonation of Guangdong Province [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 7-16. (in Chinese))
- [17] 黄锋华, 黄本胜, 洪昌红, 等. 粤港澳大湾区水资源空间均衡性分析 [J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 65-71. (HUANG Fenghua, HUANG Bensheng, HONG Changhong, et al. Analysis of water resources spatial equilibrium in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 65-71. (in Chinese))
- [18] 芦云峰. 河道型水库洪水演进研究进展及存在的问题 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36(10): 122-126. (LU Yunfeng. Flood routing in river-reservoir system: research advances and existing problems [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10): 122-126. (in Chinese))
- [19] 许扬生. 飞来峡水利枢纽水库调洪演算方法探讨 [J]. 广东水利水电, 2006(5): 7-9. (XU Yangsheng. Discussion on flood routing method of Feilaixia Reservoir [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2006(5): 7-9. (in Chinese))
- [20] 许海军, 陈守煜. 水库动库容调洪计算的数值: 解析解法 [J]. 水利学报, 2002, 33(3): 69-73. (XU Haijun, CHEN Shouyu. Numerical analytic method for reservoir backwater storage flood routing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(3): 69-73. (in Chinese))
- [21] 纪昌明, 张验科. 基于随机模拟的水库泄洪风险分析 [J]. 人民黄河, 2009(5): 36-37. (JI Changming, ZHANG Yanke. Risk analysis of reservoir flood discharge based on stochastic simulation [J]. Yellow River, 2009(5): 36-37. (in Chinese))

(收稿日期:2022-12-07 编辑:王芳)