

# 变化环境下双牌水库设计洪水过程分析

罗 坚, 余 凯, 储守成, 陈行勇, 王 磊

汇杰设计集团股份有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2023年4月20日; 录用日期: 2023年5月27日; 发布日期: 2023年6月30日

## 摘 要

水库自身防洪安全是保障流域水安全的最重要环节之一, 但过去半个世纪外部环境的不断变化给大坝防洪安全带来了更严峻的挑战。本文以潇水流域下游大型水库“双牌水库”为典型案例, 评估了变化环境下相同标准设计洪水对大坝防洪安全的影响。首先, 根据统计学方法验证了历史期洪水序列仍服从一致性假定, 并采用皮尔逊III型分布对洪水序列进行拟合, 百年一遇设计洪水与早年估计结果仅下降了约5%左右, 进一步采用同频率法确定设计洪水过程线; 其次, 通过实地测量获取了库区地形数据, 对比分析了库区泥沙淤积对库容的影响; 根据最后的调洪计算结果, 同一标准设计洪水将库区设计洪水位上升0.95 m, 而库区淤积是最直接的影响因素。结果表明, 变化环境下不仅要考虑非一致性极值统计方法, 也应重视库区环境变化所带来的潜在影响。

## 关键词

变化环境, 防洪安全, 皮尔逊III型分布, 泥沙淤积, 调洪计算

# Analysis of Design Flood Process in the Shuangpai Reservoir Considering Changing Environment

Jian Luo, Kai She, Shoucheng Chu, Xingyong Chen, Lei Wang

Huijie Design Group Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: Apr. 20<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 27<sup>th</sup>, 2023; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Reservoir flood control is one of the most important measures to ensure the water safety of the river basin. However, the continuous change in the external environment has brought more serious challenges to flood control during past half-century. The Shuangpai Reservoir, a large reservoir in the lower reaches of the Xiaoshui River basin, is selected as case study. This paper evaluated the impact of design flood (un-

作者简介: 罗坚(1989-), 男, 工程师, 注册建造师, 主要研究方向为水利水电工程管理, Email: 448912515@qq.com

der the same standard) on reservoir safety in the changing environment. Firstly, it is verified that the historical flood series is still stationary based on the statistical tests. The Pearson type III distribution is adopted to fit the samples. Compared with the previous result, the estimated 100-year return level only is decreased by about 5%, and the design flood hydrograph is determined by the peak and volume amplitude method. Secondly, we analyzed the influence of sediment deposition on the reservoir capacity by measuring the surface and underwater topography in the reservoir area. Finally, the design flood level (100-year return period) would have an increase of 0.95 m based on the reservoir routing, suggesting that the accumulation of sediment is the most direct influencing factor. The results indicated that although nonstationary statistical theories should be considered in the changing environment, the potential impact of environmental change in the reservoir area is of great significance.

## Keywords

Changing Environment, Flood Control Safety, Pearson Type III Distribution, Sediment Deposition, Flood Routing

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/>



## 1. 引言

设计洪水是确定水利工程规模的重要依据,也为工程建成后的运行管理提供了科学参考。然而,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)和国内外大量研究结果已经表明,全球范围内的气象、水文条件正在持续变化,极端事件呈现出频发趋势。另一方面,人类活动中的开垦、植树造林等工程以及库区泥沙淤积等外部因素均在不断影响流域及库区环境,从而改变了洪水过程[1][2]。

由于洪水过程在变化环境下发生了一定的变化,前人研究中通常采用最新的观测资料对流域设计洪水进行复核或修订[3][4]。从根本原因来看,变化环境对设计洪水过程的影响主要体现在以下几个方面:首先,许多地区的气候条件已经呈现出了非一致性变化特征,极端气象事件发生频率的变化直接改变了设计洪水频率;其次,随着水利工程运行时间的延长,库区泥沙淤积问题也在不同程度的加剧,将侵占一部分防洪库容,即相同规模下的设计洪水将给水库防洪安全带来更大的风险;最后,随着流域上水利(水保)工程数量的增多,流域调节能力的增强对下游地区的洪水过程也有一定削减作用。综上,在变化环境下分析水库入库洪水的影响时,应综合多方面因素开展全面的分析,且丘陵地区洪水具有峰现时间短、洪峰流量大、洪水过程集中等特征,对外部环境变化的响应更为敏感。

本文以潇水流域下游大型水库“双牌水库”为典型案例开展研究。变化环境下的设计洪水过程可能具有非一致性变化特征,而传统水文频率分析要求样本序列服从独立同分布假设,需对非一致性样本序列进行还原或引入时变参数拟合样本序列[5]。因此,本文先通过统计学方法检验洪水序列的一致性,从而确定本文选用的极值统计方法,并结合频率法获取设计洪水过程线;为分析环境变化的影响,采用GPS控制测量和多波束测深仪测绘库区水上及水下地形,获取最新水位-库容关系曲线,在此基础上通过调洪计算定量揭示了库区泥沙淤积对防洪安全的影响。综上,本文基于上述方法分析了研究对象在变化环境下面临的防洪新形势,并结合实际情况提出了相关建议及对策。

## 2. 数据及方法

### 2.1. 研究区概况

潇水为湘江一级支流,干流长 354 km,流域面积 12,220 km<sup>2</sup>,河流坡降 0.76‰,多年平均流量 345 m<sup>3</sup>/s,

多年平均径流量 108.8 亿  $m^3$ 。双牌水库于 1958 年冬动工兴建, 1961 年大坝完工, 开始拦洪蓄水发挥效益, 是一座以防洪、灌溉、发电、综合利用的水利水电工程。双牌水库位于潇水中下游, 库区干流长度约 76 km, 控制流域面积 10,594  $km^2$ , 多年平均径流总量 97.3 亿  $m^3$ , 多年平均流量 309  $m^3/s$  (图 1)。水库属于大(二)型水库, 设计总库容 7.12 亿  $m^3$ , 正常高水位 170.00 m, 相应库容 4.136 亿  $m^3$ , 死水位 158.0 m, 相应库容 1.32 亿  $m^3$ ; 根据最近一次洪水复核成果(1984 年), 百年一遇设计洪水的洪峰流量为 12,600  $m^3/s$ , 调洪演算后对应设计洪水水位 173.40 m。

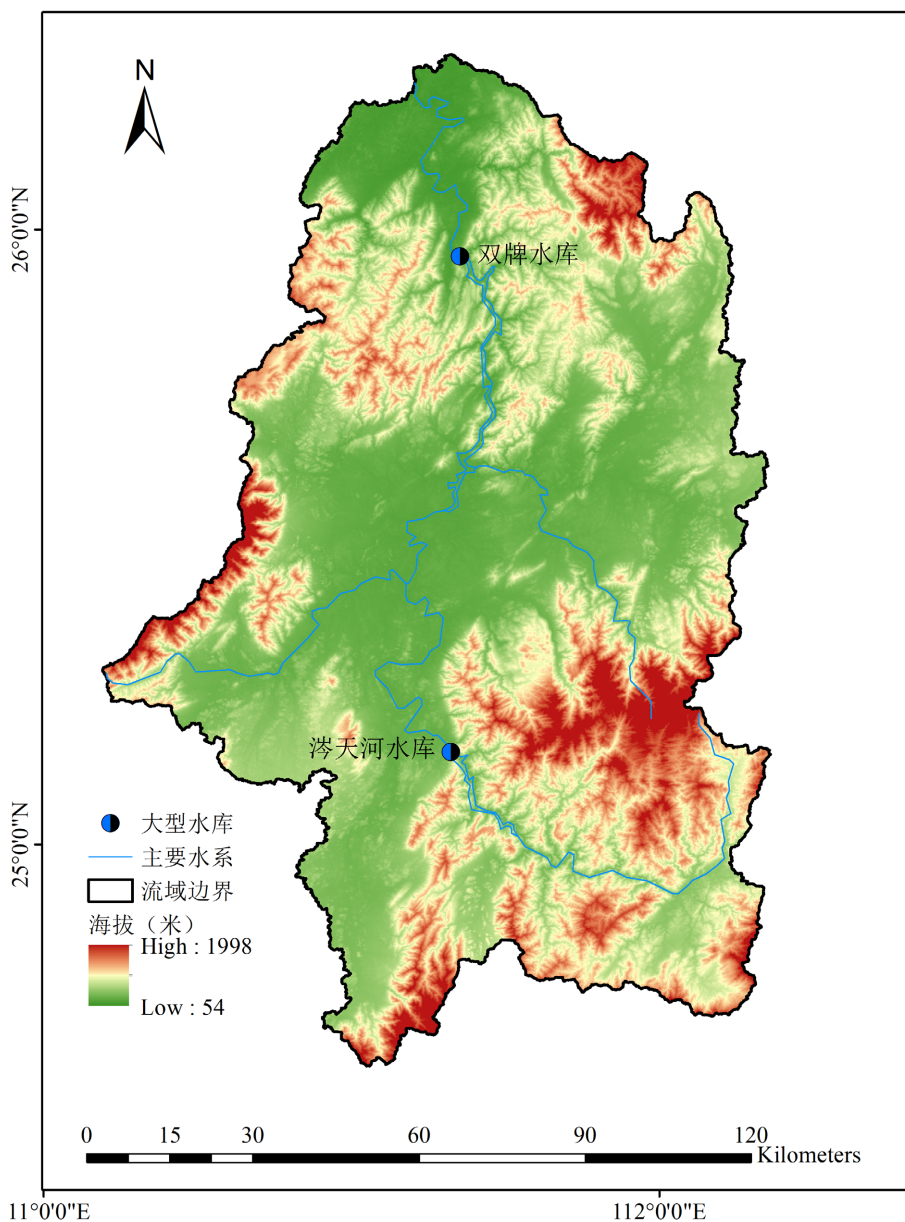


Figure 1. Overview of the study area

图 1. 研究区概况图

## 2.2. 实测数据

本研究采用的水文资料包括入库观测水文站道县站、出库观测水文站双牌站在 1959~2017 年实测逐日平均

流量资料, 并获取了历史期有考据的 2 场大洪水数据(1915 和 1946 年)。

为考虑变化环境对库区地形的影响, 本研究分别开展了双牌水库库区的坡面和水下地形测绘工作, 共完成 814 个横断面测量工作(各断面测量间距 20 m, 总测量河段长度 76.28 km)。其中, 坡面地形采用 GPS 控制测量完成; 水下地形采用 EM 3002 浅水型高分辨率多波束测深仪获取。

另一方面, 为模拟调洪期间库区水位变化过程, 本研究收集了水库闸门全开时的坝前水位 - 下泄流量统计资料。需要说明的是, 本次研究时段内(1959~2017 年), 上游涪天河扩建工程尚未完工, 因此并未在水文频率分析中考虑上游水库调蓄对下游洪水的影响。

### 2.3. 分析方法

#### 1) 极值统计方法

本研究选用国家标准中推荐采用的皮尔逊 III 型分布对洪水序列进行拟合, 该分布为一端有界的单峰曲线, 假设洪水序列为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x-r)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-r)} \quad (1)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $r$  分别为分布的形状、尺度、位置参数,  $\Gamma(\cdot)$  为伽马函数。

在一致性假定下, 可以基于样本的前三阶矩来估计分布的三个参数, 即参数可通过样本序列均值  $\bar{x}$ 、变差系数  $C_v$ 、偏态系数  $C_s$  来获取, 也可以通过适线法、极大似然估计获取。与之相比, 非一致性条件下可能需要考虑分布参数的变化特征, 本研究根据多种统计检验方法验证了洪水序列仍服从一致性假设, 因此不再赘述相关方法, 本文中采用适线法推求设计洪水。

#### 2) 确定设计洪水过程线

从历史期选取典型洪水, 采用同频率放大法推求设计洪水过程线, 该方法假定放大后设计洪水过程线的峰和不同同时段的洪量均分别等于设计值, 按照洪峰、最大 1 日洪量、最大 3 日洪量的顺序依次采用不同倍比值进行计算, 各倍比值计算方法如下:

$$\begin{cases} R_Q = \frac{Q_p}{Q_m} \\ R_1 = \frac{W_{1p}}{W_{1m}} \\ R_{3-1} = \frac{W_{3p} - W_{1p}}{W_{3m} - W_{1m}} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $R_Q$  为洪峰放大倍率,  $Q_p$  和  $Q_m$  分别为计算的设计洪峰与典型洪峰值;  $R_1$  为最大 1 日洪量放大倍率,  $R_{3-1}$  为最大 3 日洪量中除最大 1 日外, 其余两天的放大倍率,  $W_{1p}$  和  $W_{1m}$  分别为计算的最大 1 日设计洪量与典型洪水最大一日洪量,  $W_{3p}$  和  $W_{3m}$  定义类似, 以此类推可以得到最大 5 日、7 日设计洪量。时段的划分与洪水过程线长度相关。

#### 3) 样本序列趋势分析及一致性检验

本文选用一元线性回归方法、Mann-Kendall (M-K) 方法来分析各变量时间序列的趋势和突变情况。一元线性回归方法通过拟合洪水序列  $X$  与时间  $t$  之间的线性回归方程  $X = a \cdot t + b$  来分析时间序列的变化趋势, 其中系数  $a$  可用来表示变量的倾向率, 即每 10 年变化情况。M-K 方法通过构建服从标准正态分布的变量  $Z$  来判断时间序列的趋势, 当  $Z$  大于 0 时说明时间序列呈现出上升趋势, 否则为下降趋势。对于给定的显著性水平  $\alpha$ , 当  $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$  时, 说明时间序列在  $\alpha$  显著水平下有显著的变化趋势。M-K 方法通过构建正序列和逆序列, 将其绘制于图上来

判断时间序列是否存在突变。

### 3. 案例分析

#### 3.1. 洪水序列一致性检验

传统频率分析方法要求样本序列服从一致性假定，本研究采用趋势分析、M-K 检验方法评估样本序列的变化程度。图 2 呈现了双牌水库实测最大一日入库洪量的年际变化规律，从总体来看，样本序列呈现出微弱的下降趋势，其变化倾向率为 $-0.137 \text{ 亿 m}^3/10\text{a}$  ( $P > 0.05$ )；最大 3 日、5 日入库洪量呈现出类似的年际变化规律，且 M-K 趋势检验的显著性 P 值的绝对值分别为 0.739、1.001，远小于 0.05 显著性水平对应的 1.96 指标。

本文进一步采用 M-K 突变检验方法判断样本序列(最大一日入库洪量)是否发生过较明显的突变(图 3)。结果表明，样本序列呈现出波动变化特征，但并未检测到显著的突变点，因此可认为双牌水库历史期入库洪水序列服从一致性假定。前人在研究中指出，非一致性分布具有更多的参数，导致拟合结果会出现更大的不确定性，应谨慎使用非一致性分布拟合样本序列。综上，选用皮尔逊 III 型分布，采用广泛运用的适线法对样本序列进行拟合。

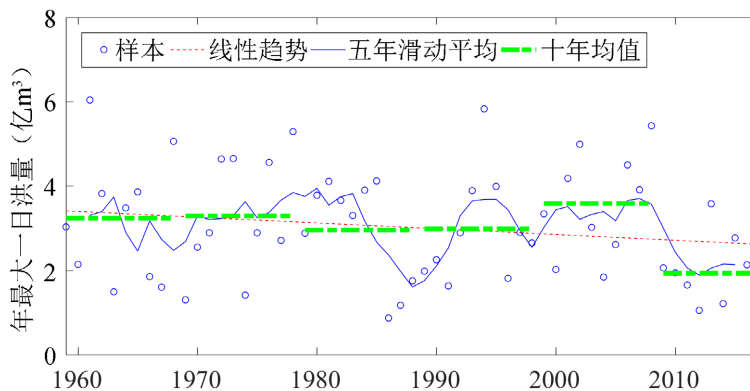


Figure 2. The changing pattern of annual maximum daily flood volumes  
图 2. 年最大一日洪量变化趋势

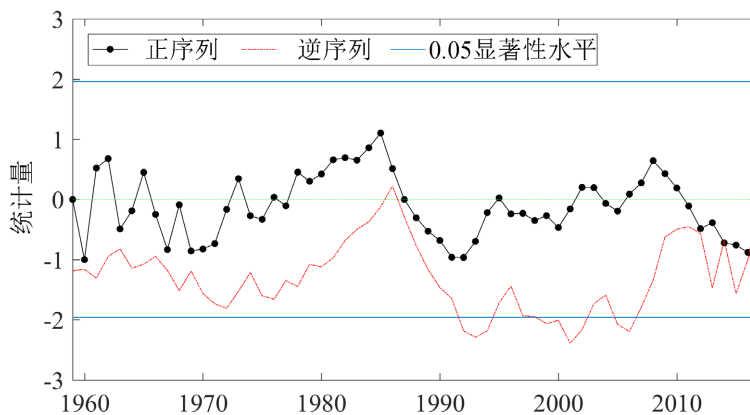


Figure 3. Abrupt changes of annual maximum daily flood volumes using Mann-Kendall test  
图 3. 基于 Mann-Kendall 检验的年最大一日洪量突变结果

#### 3.2. 推求入库洪水过程线

根据流域洪水考证结果，流域于 1915、1946 年分别发生过 2 场大洪水，据推算，最大 1 日洪量分别为 9.42、



7.5 亿  $\text{m}^3$ ，最大洪峰流量分别为 12,500、10,000  $\text{m}^3/\text{s}$ ，均大于 1959 年有观测以来统计结果。因此，本研究在拟合时采用下式分别计算历史洪水和实测洪水经验频率：

$$\begin{cases} P_i = \frac{i}{N+1} & (i=1,2,\dots,a) \\ P_{a+j} = P_a + (1-P_a) \frac{j}{n+1} & (j=1,2,\dots,n) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $P_i$  为第  $i$  场历史洪水的经验频率(本研究中  $a=2$ )， $N$  为历史洪水考证期(1915~2017 年，即  $N=103$ )； $P_{a+j}$  为第  $j$  场实测洪水的经验频率， $n$  为实测洪水序列长度(1959~2017 年，即  $n=59$ )。

洪峰流量、最大 1/3/5 日洪量拟合结果详见图 4，当  $C_s$  与  $C_v$  间的倍比关系为 3~4 之间时，皮尔逊 III 型曲线与极端洪水事件拟合程度较好，本次统一取  $C_s/C_v=3.5$  计算设计洪峰及洪量(表 1)。双牌水库曾于上世纪七八十年代开展过 2 次设计洪水复核(均采用皮尔逊 III 型分布)，计算得到的百年一遇设计洪峰流量分别为 12,500、12,600  $\text{m}^3/\text{s}$ 。受近年入库洪水略有衰减的影响，采用更长序列估计得到的设计洪水值略有下降。

在表 1 的基础上，本文选择峰高、量大、洪水集中的 1961、1968、1978、1994 四次洪水作为典型洪水，将洪峰、最大一、三、五天洪量同频率放大修匀后得百年一遇设计洪水过程线(图 5)。以最不利洪水过程为挑选原则，1961 年洪水放大结果洪量集中，洪峰出现时间早，符合丘陵地区山洪暴涨暴落的特点，适合进行调洪计算，故选用 1961 年典型洪水放大结果作为本次调洪计算的设计洪水过程线。

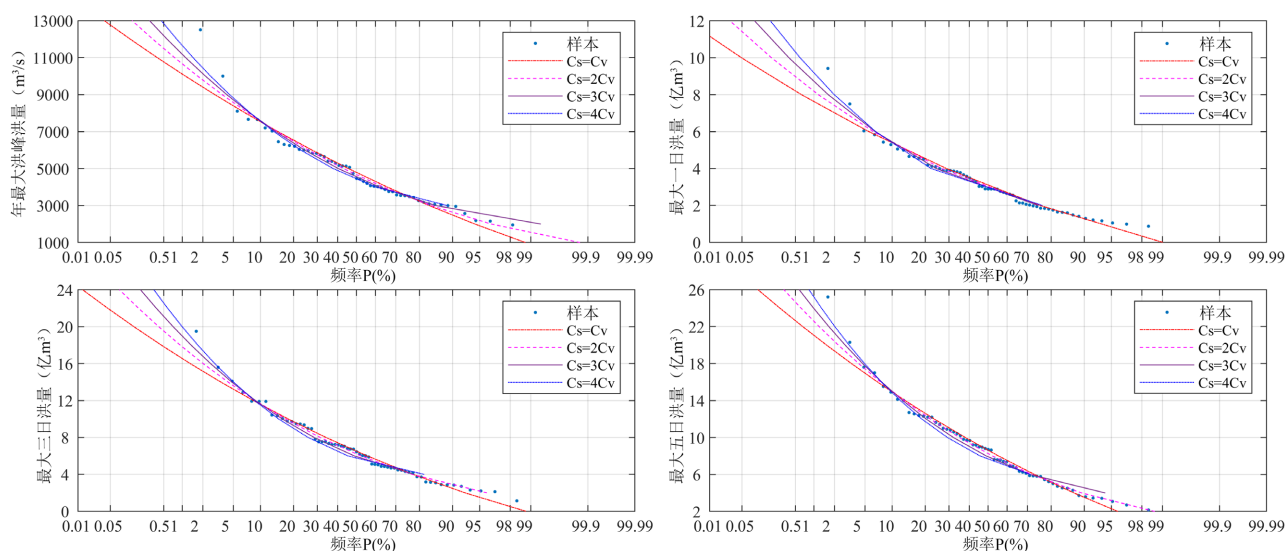


Figure 4. Pearson type III distributions fitted for annual maximum flood peak and volume

图 4. 基于皮尔逊 III 型分布的年最大洪峰和洪量频率拟合曲线

Table 1. Design values for annual maximum flood peak and volume

表 1. 年最大洪峰和洪量设计成果表

项目	单位	均值	$C_v$	$C_s/C_v$	$P=1\%$
$Q_p$	$\text{m}^3/\text{s}$	4917	0.43	3.5	11965
$W_{1p}$	亿 $\text{m}^3$	3.19	0.51	3.5	8.87
$W_{3p}$	亿 $\text{m}^3$	6.81	0.53	3.5	19.55
$W_{5p}$	亿 $\text{m}^3$	8.98	0.50	3.5	24.57

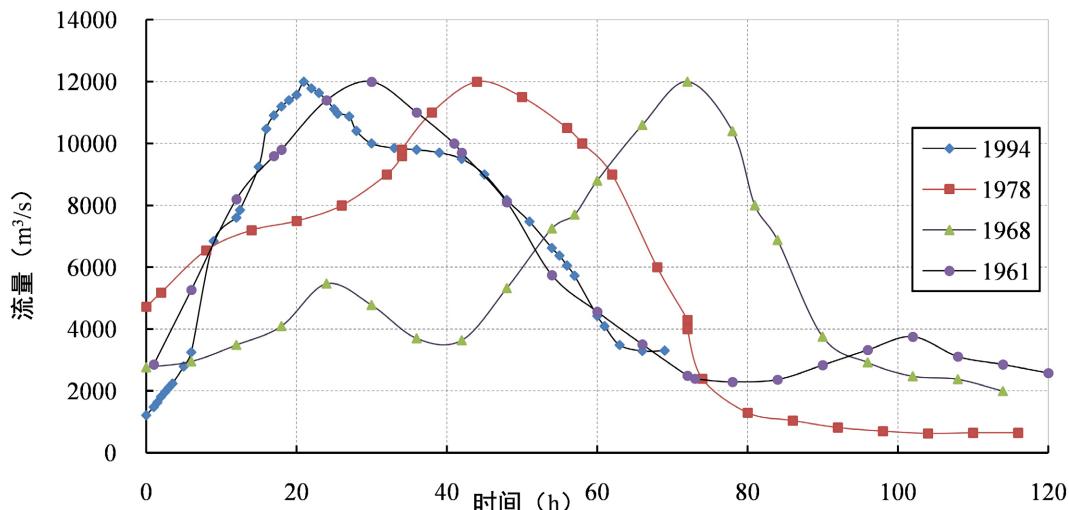


Figure 5. Comparison of typical flood hydrographs  
图 5. 典型洪水过程线对比

### 3.3. 泥沙淤积影响下的库区水下地形分析

本次研究根据库区多波束测深仪测量结果，分别采用高频声波、低频声波测量淤泥顶层、底层与水面间的距离，确定不同横断面上淤泥所占面积，结合横断间距确定任一两个横断面间淤积量，最终计算得到库区泥沙

Table 2. Statistics of sedimentation in the Shuangpai Reservoir area  
表 2. 双牌水库库区泥沙淤积统计表

坝址上游范围(km)	淤积量(m <sup>3</sup> )	所占总方量的比例
0~10	30499.4	38.48%
10~20	4084.75	5.15%
20~30	7706.43	9.72%
30~40	5302.05	6.69%

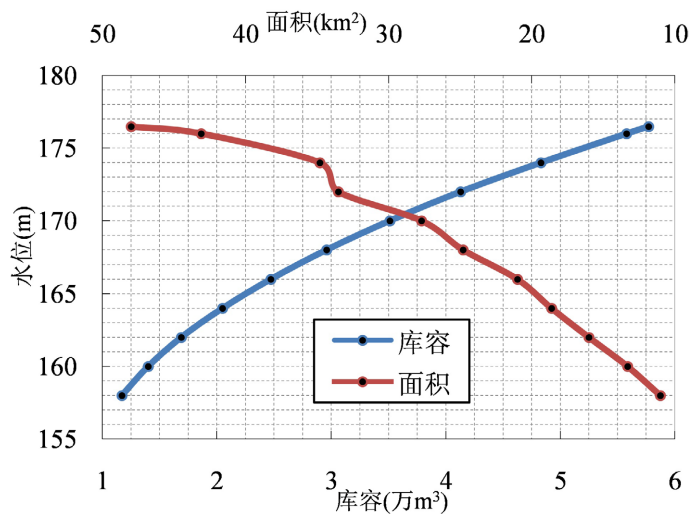


Figure 6. The water level-storage and water level-area curves in Shuangpai Reservoir  
图 6. 双牌水库水位 - 库容及水位-面积曲线

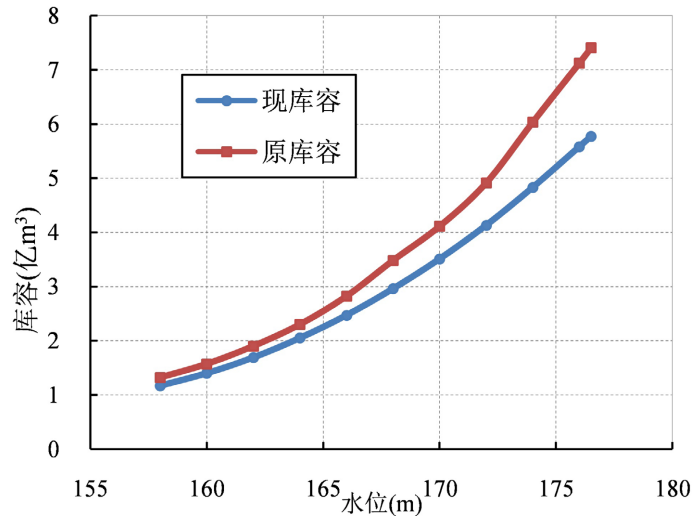


Figure 7. The variations in water level-storage curve in Shuangpai Reservoir

图 7. 双牌水库水位 - 库容曲线关系变化

总淤积量  $79253.9 \text{ m}^3$ ；泥沙淤积主要集中于库尾处，坝前 10 km 河段淤积量占总量的 38.5%左右(表 2)。

进一步可根据河床泥沙淤积测量成果绘制水下地形，从而考虑库区地形变化对水库调洪工作的可能影响，通过计算不同高程平面下的体积确定现状双牌水库的水位 - 库容 - 面积曲线，结果如图 6 所示。通过对比原水位 - 库容曲线成果，泥沙淤积导致水库有效库容有一定幅度下降，例如正常蓄水位 170.0 m 高程处相应库容减少了约  $0.60 \text{ 亿 m}^3$  (图 7)。

### 3.4. 水库调洪计算

双牌水库大坝坝顶高程 176.5 m，溢洪闸门共 11 孔，闸门尺寸为  $10 \times 9.3 \text{ m}$ 。根据水库调洪规则，本次调洪演算起调水位为 168 m，对应库容  $2.96 \text{ 亿 m}^3$ ；发生设计洪水时，在上游来水量大于闸门全开流量的情况下，闸门全开满泄出流，即根据库水位自动调节出流。结合最新的水位 - 库容关系测绘成果，本文依据水量平衡原理完成调洪计算过程：

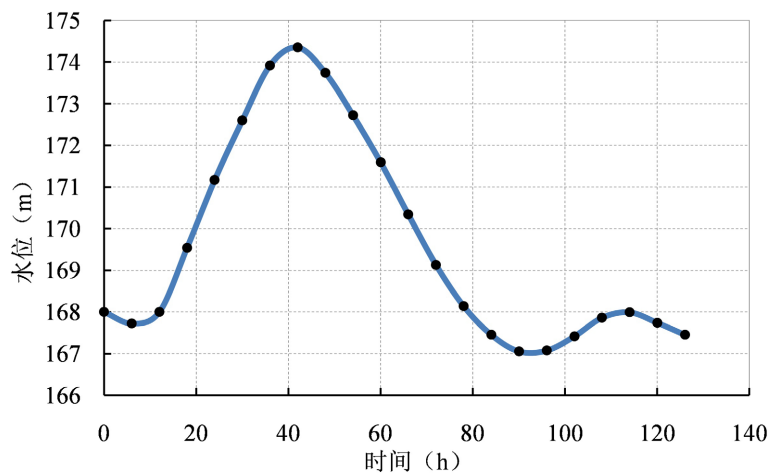


Figure 8. The water level variation during the typical flood regulation process (P = 1%)

图 8. 调洪期间库区水位变化过程(P = 1%)



$$\bar{Q} - \bar{q} = \frac{1}{2}(Q_1 + Q_2) - \frac{1}{2}(q_1 + q_2) = \frac{V_2 - V_1}{\Delta t} \quad (4)$$

式中： $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为计算时段初、末的入库流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )， $q_1$ 、 $q_2$  分别为计算时段初、末的出库流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )， $V_1$ 、 $V_2$  分别为计算时段初、末的水库蓄水量( $\text{m}^3$ )， $\Delta t$  为计算时间步长(本次取 6 h)。研究采用迭代试算法推求水库调洪过程，经水库调洪后最大下泄流量  $11,022 \text{ m}^3/\text{s}$ ，最高库水位  $174.35 \text{ m}$  (图 8)。对比早年的调洪演算成果，库区淤积对大坝自身防洪安全造成了较大的不利影响，百年一遇设计洪水位升高了约  $0.95 \text{ m}$ 。尽管该水位距大坝坝顶高程仍有一定距离，但全球变暖大背景下极端气象、水文事件发生频率多呈增加趋势，库区淤积将导致非常规洪水给大坝自身防洪安全带来更大的挑战。

#### 4. 结论与展望

本研究基于实测的入库洪水数据和古洪水考证资料，在验证资料序列一致性的基础上，采用皮尔逊 III 型分布建立洪水序列的统计模型，基于推求的水库设计洪水过程线，结合最新的库区水下地形测绘数据完成了水库调洪过程演算，定量揭示了变化环境下水库安全风险影响因素，主要结论如下：

- 1) 双牌水库库尾处的持续淤积在一定程度上影响了水库的有效库容，正常蓄水位对应库容下降了约 14.6% ( $0.60 \text{ 亿 m}^3$ )；
- 2) 尽管全球变暖背景下极端气候呈频发趋势，但流域内实测洪水过程并无显著变化趋势，2010 年后洪水量级略有下降，可能是受上游中小水库调蓄作用的影响；
- 3) 基于皮尔逊 III 型分布拟合结果，百年一遇设计洪水估计结果较上世纪 80 年代的估计结果略有下降，同样反映了现状洪水幅度减少这一特点；
- 4) 综合水文过程和区域地形的变化，当双牌水库遭遇百年一遇设计洪水时，坝前设计洪水位上升了  $0.95 \text{ m}$ ，即变化环境下水库防洪安全将面临更严峻的挑战。

综上，随着库区泥沙淤积的不断累积，应进一步优化现有手段保障水库自身防洪安全，根据潇水流域自身特征，主要包括库区清淤整治、降雨洪水预报、上游水库联合调度三个方面的工程及非工程措施。其中，降雨洪水预报方面可以依托于快速发展的智慧水利平台，耦合气象数值预报、水文模型、河网水动力模型开展更为准确的定量预报，通过预泄调度方式提高双牌水库自身防洪保障率；在水库联合调度方面，上游涪天河水库扩建工程已基本建成，可充分借鉴长江上游大型水库梯级联调防洪经验，开展实际运用。

#### 参考文献

- [1] 夏军, 陈进. 从防御 2020 年长江洪水看新时代防洪战略[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(1): 27-34.  
XIA Jun, CHEN Jin. A new era of flood control strategies from the perspective of managing the 2020 Yangtze River flood. Science China Earth Sciences, 2021, 51(1): 27-34. (in Chinese)
- [2] 张建云, 王国庆, 金君良, 贺瑞敏, 刘翠善. 1956-2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-161.  
ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, JIN Junliang, HE Ruimin and LIU Cuishan. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018. Advances in Water Science, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese)
- [3] 马清华, 欧岗, 陈文晋. 牛栏江红石岩堰塞湖整治工程施工期出入库洪水量平衡分析[J]. 水资源研究, 2016, 5(4): 415-421. <https://doi.org/10.12677/jwrr.2016.54048>  
MA Qinghua, OU Gang and CHEN Wenjin. The analysis on flood outflow and inflow balance of the reservoir during construction period at the Hongshiyuan barrier lake of Niulanjiang river. Journal of Water Resources Research, 2016, 5(4): 415-421. (in Chinese) <https://doi.org/10.12677/jwrr.2016.54048>
- [4] 李文华, 周秋红. 思贤溜洪水分流比变化及对设计洪水影响研究[J]. 水资源研究, 2022, 11(5): 509-517.  
<https://doi.org/10.12677/jwrr.2022.115055>  
LI Wenhua, ZHOU Qiuhong. Study on the change of flood diversion ratio in Sixianjiao channel and its influence on design

- flood. *Journal of Water Resources Research*, 2022, 11(5): 509-517. (in Chinese) <https://doi.org/10.12677/jwrr.2022.115055>
- [5] SERINALDI, F., KILSBY, C. Stationarity is undead: uncertainty dominates the distribution of extremes. *Advances in Water Resources*, 2015, 77: 17-36. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>