

钟斯睿, 郭生练, 谢雨祚, 等. 丹江口水库运行期非一致性洪水频率分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1110-1118. ZHONG S R, GUO S L, XIE Y Z, et al. Non-stationary flood frequency analysis for Danjiangkou Reservoir in operation period[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1110-1118. (in Chinese)

丹江口水库运行期非一致性洪水频率分析

钟斯睿¹, 郭生练¹, 谢雨祚¹, 何晓东², 丁洪亮², 王伟²

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072;

2. 汉江水利水电(集团)有限责任公司, 武汉 430048)

摘要: 汉江流域上游已建成投运诸多水库及引调水工程, 显著改变了汉江流域径流的时空分布, 导致洪水资料序列的非一致性。现将洪水系列资料延长至 2023 年, 开展非一致性洪水频率分析, 以水库系数和调水工程系数作为协变量, 建立时变 P-III 分布模型, 定量估算丹江口水库运行期的设计洪水, 并与原设计成果对比。结果表明: 所选协变量符合水文客观规律, 均可反映上游水利工程调蓄对丹江口坝址设计洪水的影响; 丹江口水库运行期 1 000 a 一遇设计洪峰流量和 7 d 洪量较原设计成果均削减 31% 左右; 汉江上游水库调蓄对设计洪水的影响比调水工程更加显著。由于丹江口水库运行期设计洪量显著减少, 在防洪标准不变的前提下可酌情提高水库的运行水位, 这不仅有利于增加发电量, 还可提高水资源利用效率和水库蓄满率。

关键词: 设计洪水; 非一致性系列; 洪水频率分析; 水库运行期; 水利工程; 丹江口水库

中图分类号: TV122.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0110

丹江口水库是汉江流域控制性水利工程和南水北调中线工程的水源地。1963 年确定丹江口水利枢纽工程的设计洪水, 1990 年和 2003 年长江水利委员会水文局先后进行了设计洪水复核计算, 复核成果比初期设计成果偏小 5% 左右, 从偏安全角度考虑仍沿用原设计值。丹江口水库的集水面积和年均径流均不及三峡水库的 1/10, 初设校核洪水(118 000 m³/s)与三峡水库的校核洪水(124 300 m³/s)差别不大, 许多专家学者^[1-3]对丹江口水库设计和校核洪水成果偏大提出疑问。

传统洪水频率分析要求洪水资料序列必须满足一致性、代表性和可靠性要求^[4-5]。自 20 世纪 70 年代以来, 汉江上游陆续建有诸多水库、引调水工程等水利设施, 显著地改变了下游河道的水文情势以及径流的时空分布, 丹江口水库坝址洪水相比规划建设时期削减趋势明显^[6-8], 导致洪水资料序列的非一致性^[9]。如何定量分析计算丹江口运行期设计洪水是亟待研究的重要课题。

水库运行期设计洪水分析计算主要有两种途径:

基于还原洪水序列的洪水地区组成法和基于实测洪水序列的非一致性频率分析法^[10-12]。汉江流域上游水系发育、支流众多, 其混联水库格局相当复杂, 同时又受诸多引调水工程影响, 导致其洪水分区众多、数据还原困难、洪水调度及演算模拟复杂等问题。本文采用非一致性频率分析方法估计丹江口运行期设计洪水。广义可加模型(generalized additive models for location, scale and shape, GAMLSS)已广泛应用于非一致性水文频率分析^[13-15], 其基于时变矩法原理, 假定概率密度函数的位置、尺度和形状参数, 随符合水文物理规律的协变量依据某种数学关系变化, 能灵活描述概率分布的非一致性变化并有效适用于 P-III 型分布曲线^[16]。协变量的选择直接影响模型的准确性和合理性, 在洪水频率分析中, 选择的协变量应能有效量化水利工程对洪水时空分布的影响, 且应符合客观物理规律^[15]。相关研究^[14, 17-18]结论表明, 依据水库库容和集水面积定义的水库系数(I_R)作为协变量, 建立非一致性洪水频率模型, 可取得较好的拟合结果。

收稿日期: 2024-05-30 修回日期: 2024-08-26 网络出版时间: 2024-09-06

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240905.0912.006>

基金项目: 国家自然科学基金长江联合基金项目(U2340205); 汉江水利水电集团有限责任公司科研项目(HJJS2024009)

作者简介: 钟斯睿(1999—), 男, 江西宜春人, 博士生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zhongsr@whu.edu.cn

通信作者: 郭生练(1957—), 男, 福建龙岩人, 教授, 挪威工程院外籍院士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: slguo@whu.edu.cn

然而现有研究多是基于水库系数 I_R 的单协变量方案,汉江上游除水库工程外还建有南水北调中线工程、清泉沟工程、引汉济渭等重要引调水工程,同样会对汛期径流及洪水过程造成影响^[19]。因此,提出调水工程系数(I_D),采用仅考虑 I_R 的单协变量方案和考虑 I_R 和 I_D 的双协变量方案开展丹江口水库运行期非一致性洪水频率分析,并与原规划设计成果对比,分析两种不同类型水利设施对丹江口设计洪水的影响,为丹江口水库防洪调度和洪水资源高效利用,提供理论依据与技术支持。

1 时变 P-III 型分布模型

1.1 广义可加模型

假设洪水变量 Y 在 $t(t=1,2,\dots,T)$ 时刻的样本值为 y_t , 其边缘分布函数 $f_Y(y_t)$ 的时变位置参数 a_{0t} 、尺度参数 β_t 和形状参数 α_t 与协变量 x 有如下线性关系^[20-21]:

$$\begin{aligned} g_{a_0}(a_{0t}) &= \omega_{10} + \sum_{h=1}^H \omega_{1h} x_{ht} & g_{\beta}(\beta_t) &= \omega_{20} + \sum_{h=1}^H \omega_{2h} x_{ht} \\ g_{\alpha}(\alpha_t) &= \omega_{30} + \sum_{h=1}^H \omega_{3h} x_{ht} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\Omega=[\omega_{kh} \mid k=1,2,3; h=1,2,\dots,H]$ 为广义可加模型的参数集合,其中 H 为协变量总个数; x_{ht} 为第 h 个随时间 t 变化的协变量。

那么,基于广义可加模型的时变 P-III 型分布概率密度函数 $f_Y(y_t)$ 表达式为

$$f_Y(y_t) = \frac{\beta_t^{\alpha_t}}{\Gamma(\alpha_t)} (y_t - a_{0t})^{\alpha_t - 1} e^{-\beta_t(y_t - a_{0t})} \quad (2)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; $\beta_t > 0, \alpha_t > 0$ 。

1.2 协变量

为充分考虑汉江上游水库群和引调水工程的影响,选择水库系数 I_R 和调水工程系数 I_D 作为协变量,衡量水利工程对丹江口年最大洪水系列的影响, I_R 的计算公式^[18,22] 为

$$I_R = \sum_{m=1}^M \left(\frac{A_m}{A_T} \right) \left(\frac{C_m}{C_T} \right) \quad (3)$$

式中: M 为研究断面以上的大型水库数量; A_m 为第 m 座水库的集水面积, km^2 ; C_m 为第 m 座水库的调节库容, m^3 , $m=1,2,\dots,M$; A_T 为研究断面集水面积, km^2 ; C_T 为研究断面以上所有水库总调节库容, m^3 。

引调水工程对于径流过程的影响较为显著,对于场次洪水则主要对洪水长时段洪量起到削减作用,且考虑到长时段洪量序列和引调水工程均与流域面积没有密切联系,定义 I_D 如下:

$$I_D = \sum_{m=1}^M \left(\frac{D_m}{D_T} \right) \quad (4)$$

式中: D_m 为第 m 个引调水工程的最大过流能力, m^3/s ; D_T 为研究断面以上所有调水工程最大过流能力总和, m^3/s 。

洪水序列的尾部分布对形状参数 α 较为敏感,传统矩法估计样本序列偏态系数 C_s 的误差较大,常采用与变系数的倍比 C_s/C_v 进行适线,以确保尾部分布的合理性^[4]。因此,为控制时变 P-III 型频率曲线尾部行为,通常假设 α_t 不随协变量变化,而位置参数 a_{0t} 和尺度参数的倒数 β_t^{-1} 则随 I_R 、 I_D 线性变化^[14,16],故时变 P-III 型分布参数 α_{0t} 、 β_t 、 α_t 与协变量的关系可用下式^[23] 表达:

$$\begin{aligned} a_{0t} &= \omega_{10} + \omega_{11} \times I_R + \omega_{12} \times I_D \\ \beta_t^{-1} &= \omega_{20} + \omega_{21} \times I_R + \omega_{22} \times I_D \\ \alpha_t &= \omega_{30} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\Omega=[\omega_{10},\omega_{11},\omega_{12},\omega_{20},\omega_{21},\omega_{22},\omega_{30}]$ 为时变 P-III 型分布中的广义可加模型参数,可根据极大似然法原理,采用遗传算法求解似然函数最大值并率定相关参数集合 Ω ^[20,24]。

1.3 拟合优度检验

K-S 检验(Kolmogorov-Smirnov test)。通过理论累计频率和经验累计频率的最大绝对离差 D 构建统计量,并检验理论分布模型的分布函数是否合理^[25]。通常取显著性水平为 0.05,则 K-S 检验 p 值大于 0.05 时,认为理论分布通过拟合优度检验,表明相关参数估计方法是合理的。

$$p = 2e^{-mD^2} \quad (6)$$

式中: m 为理论累计分布和经验累计分布的样本大小。

赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)。《水利水电工程设计洪水计算规范(SL 44—2006)》^[4] 建议通过理论分布和经验分布的均方根误差 E_{RMS} 检验模型拟合效果。为防止时变 P-III 型曲线过度拟合,采用赤池信息准则^[26]:

$$I_{AIC} = 2n + 2n \ln(E_{RMS}) \quad (7)$$

式中: n 为广义可加模型参数集 Ω 中参数的数量; I_{AIC} 为 AIC 值,此值越小拟合效果越优。

分位曲线图。通过理论累积分布函数及其反函数,可以求得某一指定分位数在时变 P-III 型分布中对应的洪峰或洪量大小。分位曲线图通过分析实际样本点在不同分位数区间的整体分布情况判断拟合优度,如各区间分布比例较为均匀,则拟合结

果合理^[16]。

Q-Q 图(Quantile-Quantile plot)通过点绘理论分布概率和经验分布概率的分位数来比较其散点分布,作为一种图形方法估计位置-尺度分布族的分布参数^[22]。采用 Q-Q 图比较评价年最大洪水系列经验频率和时变 P-III 型概率分布分位数的拟合效果,以判断两组数据的分布是否一致。为满足洪水频率分析侧重观察右尾极端事件的要求,可通过改变 Q-Q 图坐标轴尺度使尾部频率间隔更加稀疏。由于 Gamma 分布与 P-III 型分布的特性近似,本文采用 Gamma 分布的逆累积分布函数作为坐标尺度,并将序列点绘坐标图中得到 Q-Q 图。为了使 Gamma 分布保持密度曲线呈铃形且右偏的性质、能侧重考虑历史洪水点据的拟合,其形状参数 α 和尺度参数 β 与水库初设计洪水成果中 P-III 型频

率曲线的形状、尺度参数一致^[26]。

2 水利工程与洪水资料系列

2.1 汉江上游水利工程设施

以丹江口水库运行期设计洪水为研究对象,主要考虑丹江口及其上游干流水库,即黄金峡—石泉—喜河—安康—旬阳—蜀河—白河—孤山—丹江口梯级水库,同时包含支流堵河上的潘口、黄龙滩、龙背湾、鄂坪和褒河上的石门 5 座重要水库。引调水工程主要考虑外调水工程:引乾济石工程、引红济石工程、引汉济渭工程、襄阳引丹工程、鄂北水资源配置工程、南阳引丹工程、南水北调中线工程。根据水利工程设施的特征参数和汉江上游水文特性(表 1、表 2),计算得到水库系数 I_R 、调水工程系数 I_D ,见图 1。

表 1 汉江上游流域水库工程信息

Tab. 1 Information of reservoirs in the upper Hanjiang River basin

水库枢纽名称	黄金峡	石泉	喜河	安康	旬阳	蜀河	白河
集水面积/km ²	17 070	23 400	25 207	35 700	42 400	49 400	53 346
调节库容/亿m ³	0.69	2.72	0.22	16.23	0.41	0.24	0.22
建成年份	2023	1973	2006	1989	2022	2009	2018
水库枢纽名称	孤山	潘口	黄龙滩	龙背湾	鄂坪	石门	丹江口*
集水面积/km ²	60 440	8 950	11 140	2 155	2 210	3 861	95 217
调节库容/亿m ³	0.240	11.200	4.432	4.236	1.572	0.607	102.200/190.500
建成年份	2023	2011	1970	2014	2006	1975	1967/2012

注: *丹江口分别列出1967年初期工程和2012年加高后的规模。

表 2 汉江上游流域调水工程信息

Tab. 2 Information of water transfer project in upper Hanjiang River basin

调水工程名称	引乾济石	引红济石	引汉济渭	襄阳引丹	鄂北水资源配置	南阳引丹	南水北调中线
过流能力/(m ³ ·s ⁻¹)	13.5	8	70		100*	100	420
运行年份	2005	2018	2023	1973	2021	1974	2014

注: *表示襄阳引丹和鄂北水资源配置工程合计即为清泉沟工程。

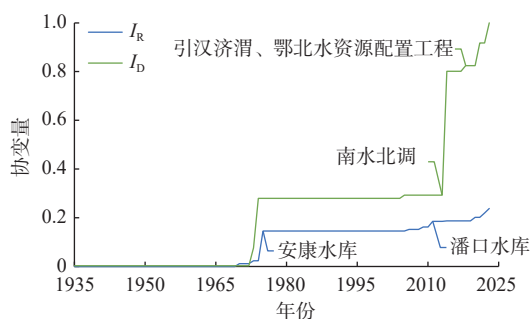


图 1 汉江上游水库系数 I_R 与调水工程系数 I_D

Fig. 1 Reservoir index (I_R) and diversion index (I_D) in the upstream Hanjiang River

可以看出安康和潘口对丹江口上游水库系数 I_R 的贡献最大,导致水库系数陡增,其期间随上游干流水库建设小幅度上升。调水工程系数 I_D 主要受南阳引丹(1974 年)和南水北调中线工程(2014 年)影响,且近年因鄂北水资源配置和引汉济渭等工程小幅度上升,其中:南阳引丹工程后改从南水北调中线总干渠肖楼分水口取水,可视作南水北调中线工程的一部分;引乾济石工程和引红济石工程同样视作引汉济渭工程的一部分。大规模的水利工程设施兴建使得 I_R 、 I_D 呈现明显的阶梯状上升。

2.2 洪水资料系列

丹江口水库历史洪水调查考证非常完善,《汉江历史洪水汇编(1969年)》至今没有任何改变。丹江口水库历史调查洪水为1583年、1867年、1852年、1832年和1921年,同时加入1935年实测大洪水,组成历史特大洪水序列。20世纪60年代中期丹江口水库初步设计时,曾依据1929—1952年的插补资料及1953—1962年黄家港、碾盘山同步实测资料,分析得出丹江口年最大洪水序列。结合1963—1967年黄家港站数据、丹江口下闸蓄水(1967年11月)后1968—2023年洪水摘录、初期完工后1974—2023年运行资料,将洪水序列延长至2023年。

邴建平^[27]根据1968—2016年入库洪水和坝址洪水系列点据,采用线性回归法建立入库洪水与坝址洪水的关系。入库洪水与坝址洪水的关系式为洪峰流量 $Q_{m\text{入库}}=1.147Q_{m\text{坝址}}$ (确定系数 $R^2=0.9771$),最大7d洪量 $W_{7d\text{入库}}=1.010W_{7d\text{坝址}}$ ($R^2=0.9999$)。

根据丹江口水库日运行资料和黄家港水文站洪水摘录系列,由水量平衡原理反推计算得到丹江口入库洪水系列。考虑到丹江口入库与坝址洪水线

性关系很好,则可依据二者相关关系推求丹江口水库年最大洪峰和最大7d洪量实测坝址洪水序列。

非一致性洪水频率分析首先需要对洪水资料系列进行一致性审查,判断洪水序列是否有明显的变化趋势。Mann-Kendall法是常用的趋势检验方法,其检验统计量 Z 和 p 值定义为

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (8)$$

$$Z = \frac{S - \text{sgn}(S)}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} \quad (9)$$

$$p = 2(1 - \Phi(|Z|)) \quad (10)$$

式中: x_i 为样本序列中第 i 个样本值; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布的累积分布函数; n 为序列样本数; S 为逆序对的数量。采用Mann-Kendall趋势检验法分析发现,1929—2023年丹江口坝址洪峰流量 Q_m 和最大7d洪量 W_{7d} 的检验统计量 Z 分别为-1.72和-1.71, p 值分别为0.087和0.088,表明在上游水利工程的影响下,丹江口坝址洪水已经有下降趋势。图2绘出丹江口坝址1929—2023年洪峰和7d洪量资料系列的趋势变化。

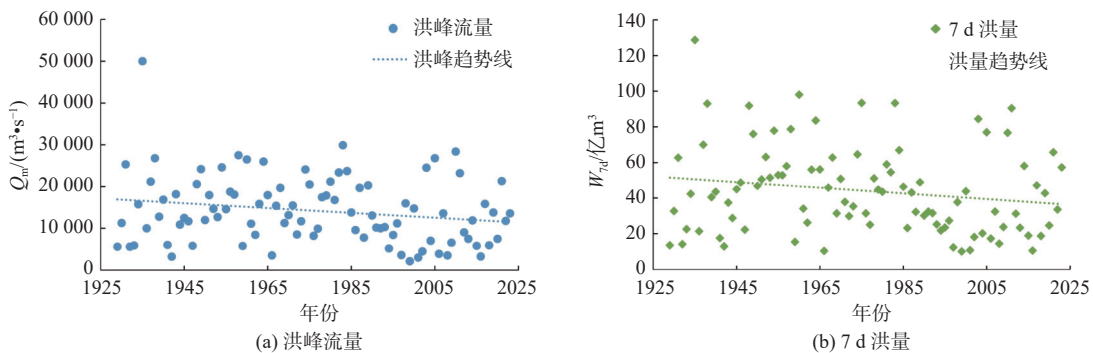


图2 丹江口坝址1929—2023年洪水资料系列趋势变化

Fig. 2 Variation trend of 1929—2023 flood data series at Danjiangkou Reservoir

3 丹江口水库运行期非一致性洪水频率分析

根据1583—2023年总计441年水文调查期的不连序年最大洪水系列,以水库系数 I_R 和调水工程系数 I_D 构建时变P-III型分布广义可加模型,并采用极大似然法估算P-III型分布参数,对比单协变量方案和双协变量方案的丹江口设计洪水频率计算结果。

极大似然法的参数估计结果与拟合优度评价指标见表3。可以看出:K-S检验的 p 值均大于0.05,说明基于GAMLSS模型的时变P-III型分布采用极大似然法估参能通过拟合优度检验,同时形状参数 $\alpha=\omega_{30}>1$,则 $C_s<2.0$,可以采用极大似然估计率定参数^[5];两种方案的 I_{AIC} 较为接近,均有较好的拟合精

度;与 I_R 相关的 ω_{11} 和 ω_{21} 比较, I_D 相关的参数 ω_{12} 和 ω_{22} 则很接近0,表明引调水工程对洪水削减作用贡献率较低。式(11)至式(14)分别给出两种方案洪峰流量和7d洪量的时变P-III型概率密度函数表达式。为更加直观展示时变P-III型的拟合优度,以洪峰流量 Q_m 为例绘制其Q-Q图及分位曲线图(图3)。

$$f_Q(q) = \frac{[q - (-1\,028 + 5\,145I_R)]^{3.37-1} e^{-\frac{q - (-1\,028 + 5\,145I_R)}{5\,274 - 6\,715I_R}}}{\Gamma(3.37) \cdot (5\,274 - 6\,715I_R)^{3.37}} \quad (11)$$

$$f_Q(q) = \frac{[q - (-1\,067 + 5\,062I_R - 6.94I_D)]^{3.36-1} e^{-\frac{q - (-1\,067 + 5\,062I_R - 6.94I_D)}{5\,252 - 6\,809I_R - 8.00I_D}}}{\Gamma(3.36) \cdot (5\,252 - 6\,809I_R - 8.00I_D)^{3.36}} \quad (12)$$

表 3 P-III 型分布时变矩模型参数和检验结果

Tab. 3 Parameters and test results of P-III distribution time-varying moment method

变量	协变量	模型参数估计值							K-S检验	I_{AIC}
		ω_{10}	ω_{11}	ω_{12}	ω_{20}	ω_{21}	ω_{22}	ω_{30}		
Q_m	I_R	-1 028	5 145		5 274	-6 715		3.37	0.67	5 329
	$I_R&I_D$	-1 067	5 062	-6.94	5 252	-6 809	-8.00	3.36	0.56	5 358
W_{7d}	I_R	9.769	29.8		25.7	-56.27		1.52	0.48	1 079
	$I_R&I_D$	9.729	29.6	-0.061	25.6	-56.84	-0.165	1.51	0.40	1 050

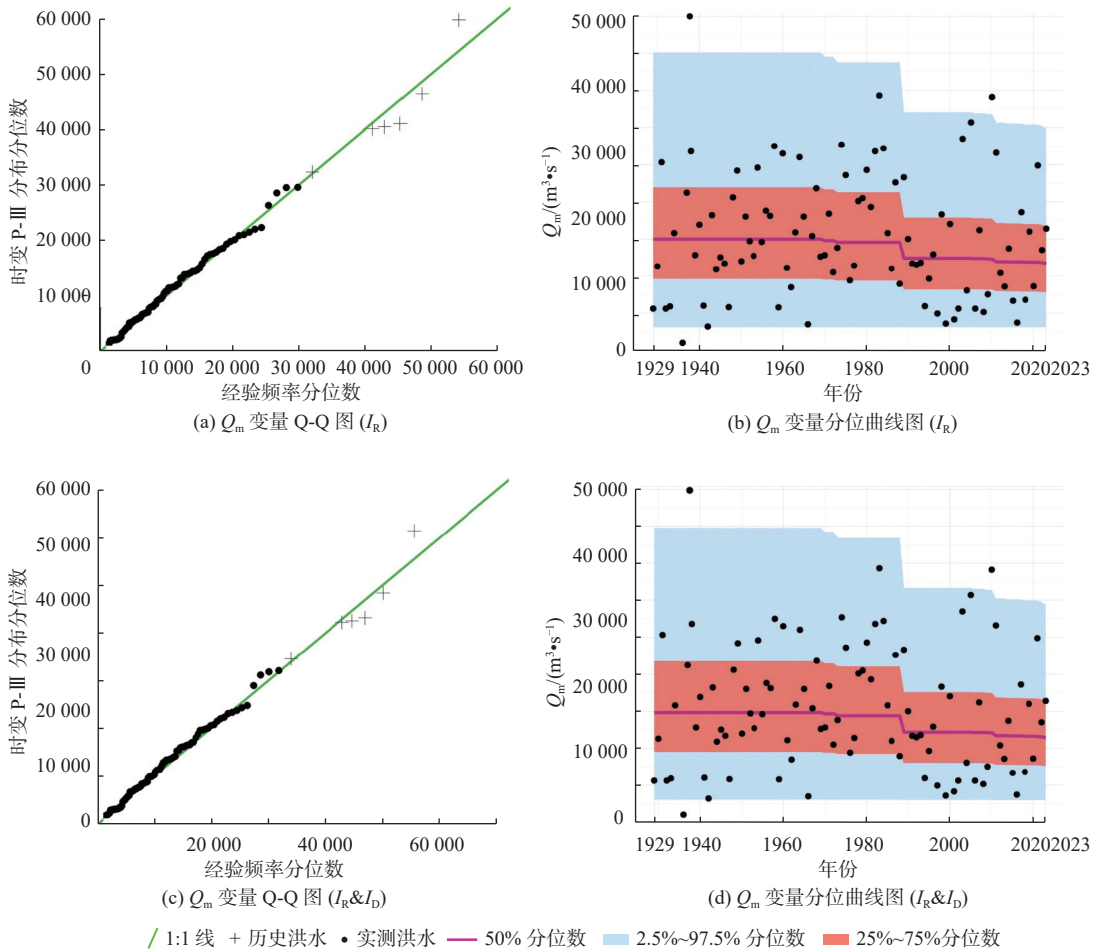


图 3 洪峰流量 Q_m 时变矩法拟合优度检验

Fig. 3 Curve fitting test of time-varying moment method for peak flow discharge

$$f_{W_{7d}}(w_{7d}) = \frac{[w_{7d} - (9.79 + 29.8I_R)]^{1.52-1} e^{-\frac{w_{7d} - (9.79 + 29.8I_R)}{25.7 - 56.27I_R}}}{\Gamma(1.52) \cdot (25.7 - 56.27I_R)^{10.52}} \quad (13)$$

$$f_{W_{7d}}(w_{7d}) = \frac{[w_{7d} - (9.73 + 29.6I_R - 0.061I_D)]^{1.51-1} e^{-\frac{w_{7d} - (9.73 + 29.6I_R - 0.061I_D)}{25.5 - 56.84I_R - 0.165I_D}}}{\Gamma(1.51) \cdot (25.5 - 56.84I_R - 0.165I_D)^{1.51}} \quad (14)$$

从 Q-Q 图可以看出,不同协变量方案的时变 P-III 分布理论频率分位数和经验频率分位数点据都在 1:1 等值线附近,且特大洪水系列散点均匀分布在等值线两侧,说明时变 P-III 分布整体拟合优度较好且可兼顾特大洪水的分布情况。从分位曲线图

上可以看出,丹江口实测洪水点据整体上按分位数比例均匀落在相应区间中,同时不同分位数边界和均值均呈下降趋势,且同图 1 中协变量一样呈现阶梯状,说明 2 种协变量方案的时变矩模型,都能较好地反映出在上游水利工程影响下丹江口实测洪水受到削减的情况。对比两种方案发现, I_D 的引入并没有使 Q-Q 图及分位曲线图出现显著差异^[23],仅呈小幅度的下降,同样表明引调水工程对设计洪水的削减作用不大。

丹江口坝址 2023 年协变量系数 $I_R=0.24, I_D=1.00$,采用表 3 时变 P-III 型分布的广义可加模型,估算丹

江口水库运行期非一致性设计洪水,并与原设计结果进行对比。从表4可以看出:非一致性条件下,运行期设计洪水均值相比原设计结果偏小,频率曲线左尾较低;双协变量方案和单协变量方案设计洪水差异不大,洪峰和7d洪量设计值差异在1%和2%左右,表明调水工程系数 I_D 对丹江口坝址洪水的时

变分布整体上没有显著影响,尤其对于洪峰和短时短洪量的洪水序列,但对于长时段洪量仍有一定削减作用;非一致性洪水频率分析估值较原设计结果存在不同程度的削减,设计洪峰流量 Q_m 和 W_{7d} 均削减31%左右。

表4 丹江口水库原设计洪水与非一致性计算成果对比

Tab. 4 Comparison of original design floods and non-stationary estimation results for Danjiangkou Reservoir

变量	计算方法	统计参数			设计值			
		均值	C_v	C_s	0.01%	0.10%	0.20%	1.00%
$Q_m/(m^3 \cdot s^{-1})$	原设计值	15 700	0.60	1.50	82 500	65 000	59 700	47 100
	非一致性(I_R)	13 000	0.54	1.09	56 300(-32%)	45 700(-30%)	42 400(-29%)	34 600(-27%)
	非一致性($I_R&I_D$)	12 700	0.55	1.09	55 400(-33%)	45 000(-31%)	41 800(-30%)	34 000(-28%)
$W_{7d}/亿m^3$	原设计值	50.0	0.55	1.10	220	179	166	135.0
	非一致性(I_R)	36.8	0.45	1.62	160(-27%)	127(-29%)	117(-29%)	93.6(-30%)
	非一致性($I_R&I_D$)	35.9	0.45	1.63	155(-29%)	123(-31%)	113(-31%)	90.9(-33%)

注:括号内数值为非一致性洪水特征值相较于原设计值的削减率

汉江上游已规划建有诸多水利设施,其中丹江口水库调节库容190.5亿 m^3 ,防洪库容140.9亿 m^3 ,其余上游水库调节库容总计约43亿 m^3 。汉江上游混联梯级水库格局显著削减了丹江口运行期的设计洪水,单协变量方案的1000a一遇设计洪水 Q_m 和 W_{7d} 分别削减19300 m^3/s 和52亿 m^3 ,量级上符合水库调蓄和调度规律。在引入协变量 I_D 后,二者进一步削减700 m^3/s 和4亿 m^3 ,而汉江上游外调水工程的最大过流能力总计约为590 m^3/s (0.51亿 m^3/d),洪量进一步削减程度同样与过流能力相匹配,且长历时的7d洪量受调水工程的影响更显著,削减率比短历时的洪峰大。综上从洪水削减程度

上看,非一致性设计洪水估算结果较为合理。

图4展示了不同方案的丹江口水库坝址年最大设计洪水系列P-III型频率曲线。可以看出,2种方案非一致性时变P-III型频率曲线均位于原设计曲线的下方,且双协变量的非一致性时变P-III型频率曲线仅略低于单协变量方案,说明上游梯级水库调蓄工程对设计洪水具有不可忽视的削减作用,而调水工程对洪峰系列的影响则较小。上述分析表明,丹江口初设阶段的设计洪水与水库特征水位值已无法适应水文情势变化,无法满足水资源高效利用的要求。

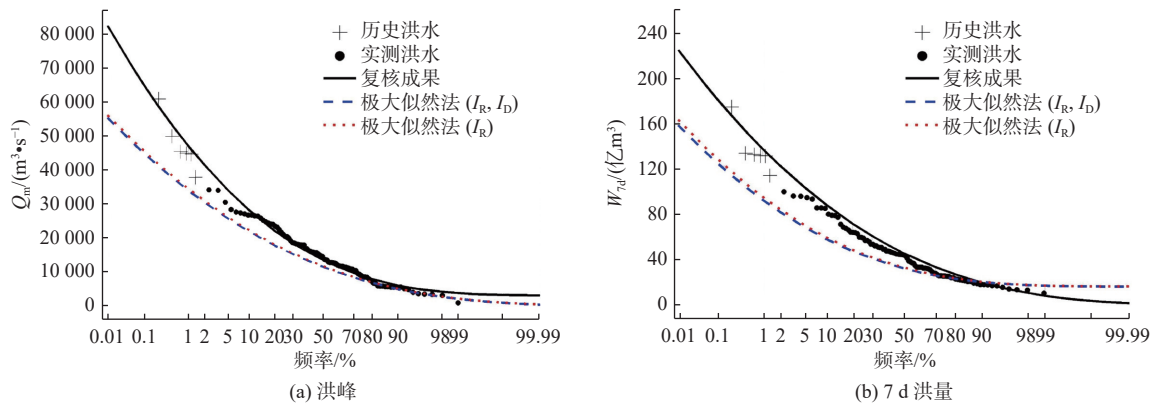


图4 丹江口水库年最大洪水系列频率曲线对比

Fig. 4 Comparison of frequency curves of annual maximum flood data series for Danjiangkou Reservoir

4 结论

汉江流域上游水库和调水工程运行导致丹江口

入库洪水发生了显著变化。Mann-Kendall 趋势检验表明,1929—2023年丹江口年最大坝址洪水序列呈

现下降趋势,洪水资料系列呈非一致性。本文基于广义可加模型,构建 P-Ⅲ型分布位置、尺度和形状参数的时变关系,分析其洪水序列频率分布的变化,以单协变量方案和双协变量方案构建时变 P-Ⅲ型分布,并采用极大似然法估计参数,基于 441 年历史考证期(1583—2023 年)的年最大洪水资料序列,估算丹江口水库运行期设计洪水。主要结论如下:

时变 P-Ⅲ型分布模型以水库系数和调水工程系数作为协变量时,均可体现丹江口水库洪水序列受上游水利工程影响受到削减的现状。双协变量和单协变量时变 P-Ⅲ型分布模拟结果没有显著差异,调水工程对坝址设计洪水的影响不明显。

延长水文资料系列并考虑历史洪水信息,丹江口水库运行期 1 000 a 一遇设计洪峰流量和 7 d 洪量分别为 45 000 m³/s 和 123 亿 m³,较原设计成果均削减了 31% 左右。

丹江口水库原设计洪水明显偏大,导致水库汛期弃水和汛后蓄满率低。依据丹江口水库运行期设计洪水计算成果,在防洪标准不变的前提下重新确定水库运行水位,这不仅可增加发电量,还可提高水资源利用效率和水库蓄满率。

参考文献:

- [1] 郭生练,尹家波,李丹,等.丹江口水库设计洪水复核及偏大原因分析[J].水力发电学报,2017,36(2):1-8. DOI: 10.11660/slfjdx.20170201.
- [2] 熊丰,陈璐,郭生练.基于 Halphen 分布和最大熵的洪水频率分析[J].水文,2018,38(3):1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2018.03.001.
- [3] 胡瑶,郭生练,刘章君.丹江口水库历史洪水不确定性对设计成果的影响研究[J].水资源研究,2016,5(3):255-261. DOI: 10.12677/JWRR.2016.53032.
- [4] 中华人民共和国水利部.水利水电工程设计洪水计算规范:SL 44-2006[S].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [5] 郭生练.设计洪水研究进展与评价[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [6] 王何予,田晶,邓乐乐,等.基于 IHA-RVA 法分析汉江中下游水文情势变化[J].水资源研究,2021,10(4):350-361. DOI: 10.12677/JWRR.2021.104038.
- [7] WANG Y X, DUAN L M, LIU T X, et al. A non-stationary standardized streamflow index for hydrological drought using climate and human-induced indices as covariates[J]. Science of The Total Environment, 2020, 699: 134278. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134278.
- [8] ZHOU Y L, GUO S L, XU C Y, et al. Probabilistic interval estimation of design floods under non-stationary conditions by an integrated approach[J]. Hydrology Research, 2022, 53(2): 259-278. DOI: 10.2166/NH.2021.007.
- [9] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Stationarity is dead: Whither water management[J]. Science, 2008, 319(5863): 573-574. DOI: 10.1126/science.1151915.
- [10] 郭生练,熊立华,熊丰,等.梯级水库运行期设计洪水理论和方法[J].水科学进展,2020,31(5):734-745. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.010.
- [11] 郭生练,王俊,谢雨祚,等.面向新时期新需求的三峡水库运行方案研究[J].水利学报,2024,55(4):379-388. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20230504.
- [12] 钟斯睿,郭生练,何彦锋,等.梯级水库下游最不利洪水地区组成法[J].水科学进展,2024,35(3):430-439. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.03.007.
- [13] XIONG B, XIONG L H, GUO S L, et al. Nonstationary frequency analysis of censored data: A case study of the floods in the Yangtze River from 1470 to 2017[J]. Water Resources Research, 2020, 56(8): 027112. DOI: 10.1029/2020WR027112.
- [14] JIANG C, XIONG L H, XU C Y, et al. A river network-based hierarchical model for deriving flood frequency distributions and its application to the Upper Yangtze basin[J]. Water Resources Research, 2021, 57(8): 029374. DOI: 10.1029/2020WR029374.
- [15] 高志国,李毅,张利辉,等.洪水灾害时空过程模拟可视化表达研究进展与展望[J].水利水电技术(中英文),2023,54(8):43-53. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.08.004.
- [16] XIONG B, XIONG L H, XIA J, et al. Assessing the impacts of reservoirs on downstream flood frequency by coupling the effect of scheduling-related multivariate rainfall with an indicator of reservoir effects[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(11): 4453-4470. DOI: 10.5194/hess-23-4453-2019.
- [17] KHOZEYMEHNEZHAD H, NAZERI-TAHROUDI M. Analyzing the frequency of non-stationary hydrological series based on a modified reservoir index[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(4): 198-203. DOI: 10.1007/s12517-020-5226-y.
- [18] 王俊.面向水库群调度的水文数值模拟与预测技术[M].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [19] SUN Z H, FU X, CHU X F. Assessing the impacts of reservoir operation on downstream water diversions using a simplified flow model[J]. Hydrological Sciences Journal, 2019, 64(12): 1488-1503. DOI: 10.1080/02626667.2019.1649410.
- [20] 胡春宏,张晓明,于坤霞,等.黄河流域水沙变化趋势多模型预测及其集合评估[J].水利学报,2023,

- 54(7):763-774. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20220717](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20220717).
- [21] CUI H, JIANG S H, GAO B, et al. On method of regional non-stationary flood frequency analysis under the influence of large reservoir group and climate change[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 618: 129255. DOI: [10.1016/J.JHYDROL.2023.129255](https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.129255).
- [22] STANFORD J L, VARDEMAN S B. Statistical methods for physical science[M]. New York: Academic Press, 1994.
- [23] 李国芳. 变化环境下流域水文气象极端事件演变规律及超标准洪水治灾机理 [M]. 武汉: 长江出版社, 2022.
- [24] 江聪, 熊立华, 黄俊哲, 等. 融合降雨随机变量的洪水频率分布估计方法研究 [J]. *水利学报*, 2023, 54(1): 45-53. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20210819](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20210819).
- [25] 熊丰, 郭生练, 陈柯兵, 等. 金沙江下游梯级水库运行期设计洪水及汛控水位 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(3): 401-410. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2019.03.010](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2019.03.010).
- [26] 谢雨祚, 郭生练, 熊立华, 等. 考虑历史洪水资料的三峡水库运行期非一致性设计洪水估算 [J]. *水利学报*, 2024, 55(6): 643-653. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20230792](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20230792).
- [27] 邴建平, 邹宁, 郭海晋, 等. 丹江口入库洪水与坝址洪水关系研究 [J]. *人民长江*, 2018, 49(22): 7-11. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.22.002](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.22.002).

Non-stationary flood frequency analysis for Danjiangkou Reservoir in operation period

ZHONG Sirui¹, GUO Shenglian¹, XIE Yuzuo¹, HE Xiaodong², DING Hongliang², WANG Wei²

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hanjiang Water Resources & Hydropower Group Co., Ltd., Wuhan 430048, China)

Abstract: Danjiangkou Reservoir is the key hydraulic project for flood control in Han River basin, and the water source for the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project. The design flood of Danjiangkou Reservoir is an important reference for reservoir operation and comprehensive utilization benefits, which was overestimated due to the short-recorded data series and the uncertainty of historical flood information in construction period. Besides, many reservoirs and water transfer projects have been built and put into operation in the upper Hanjiang River basin, which significantly altered the spatiotemporal distribution of streamflow. The Mann-Kendall test indicated a decrease trend for the annual maximum flood series from 1929 to 2023 with the statistical parameters all smaller than 0, which meant that the gauged flood data series was non-stationary. Thus, how to quantitatively estimate design flood of Danjiangkou in operation period has become an urgent scientific and technological challenge.

The generalized additive models for location, scale and shape (GAMLSS) model was widely applied in non-stationary flood frequency analysis, which was based on the principle of time-varying moment method and assumed that the location, scale, and shape parameters of probability density function would follow certain mathematical relationship with corresponding covariates. GAMLSS-based time-varying P-III distribution method was applied for non-stationary flood frequency analysis for Danjiangkou Reservoir in operation period.

The selection of covariates would significantly determine the effectiveness of time-varying model. The reservoir index (I_R) was defined with the hydrological characteristics and reservoir storage capacity, which presented superiority in design flood investigation. Meanwhile, diversion index (I_D) was first proposed to quantify the influence of water transfer projects with mathematical definition inspired by I_R . The I_R and I_D were selected as covariates to construct the time-varying P-III distribution model, and the maximum likelihood estimation method was used to estimate parameters for the single covariate (I_R) and the double covariates (I_R & I_D). Based on the annual maximum flood data series with 441-year historical investigation period (from 1583 to 2023), the design flood for Danjiangkou Reservoir in operation period was estimated and compared with original design values. The main conclusions were summarized as follows:

(1) The I_R and I_D were selected as covariates which could conform to the hydrological variation laws objectively. The fitting results of time-varying P-III distribution with both covariates could reflect the flood series decreasing

trend caused by upstream hydraulic structures. However, there was no significant difference for the time-varying P-III distribution fitted with double covariates (I_R & I_D) or single covariate (I_R). The influence mainly attributed to upstream reservoirs rather than water transfer projects, since the I_D only slightly reduced about 2% design floods in Danjiangkou Reservoir.

(2) The estimated 1000-year design flood of Danjiangkou in operation period has been significantly reduced. The flood peak and 7-day flood volumes were 45,000 m³/s and 12.3 billion m³, which were both reduced about 31% compared with the original designed values in construction period.

The original designed flood of Danjiangkou Reservoir was overestimated which results in more discarding water and lower refill rate in flood season. Since the estimated design flood of reservoir in operation period has significantly reduced, the reservoir operation water level could be risen with the condition of flood prevention standard unchanged, which could not only generate more hydropower, but also increase the water resource utilization rate as well as reservoir refill rate.

Key words: design flood; non-stationary series; flood frequency analysis; reservoir in operation period; water resources project; Danjiangkou Reservoir

(上接第 1090 页)

variation scenario (S1) and ER-SNWTP scenario (S2) based on the land use and land cover change (LUCC) of the ER-SNWTP from 2005 to 2020. The InVEST model carbon module simulated carbon stocks and predicted carbon stocks under the two scenarios based on the corrected carbon density values derived from regional temperature and precipitation data. The Geo-detector was utilized to assess the influence of different driving factors and identify the primary elements that impacted variations in carbon stocks within the study area.

The results revealed that land use changes from 2005 to 2015 included continuous expansion of built-up land and a reduction in forestland and grassland. There was a trend of growth in water area from 2015 to 2020. Under the ER-SNWTP scenario, the expansion of built-up land was curbed, and the reductions in forestland and grassland were alleviated, leading to a significant increase in water areas compared to the natural variation scenario. From 2015 to 2025, carbon stock decreased by $1,228.35 \times 10^4$ t under the natural variation scenario, while it increased by 262.84×10^4 t under the ER-SNWTP scenario. In addition, the water resource allocation of ER-SNWTP affected the spatial distribution of carbon stocks. In the northeast region, particularly in the Binzhou and Dongying areas with large water transfer volumes, the increase in carbon stocks was significant. Land use had the highest explanatory power and driving force for spatial variation in carbon stocks. The interaction factor analysis exhibited the strongest interaction factor after 2005 with "land use \cap nighttime lights", indicating that the interaction between socio-economic factors and land use factors gradually amplified the impact on the spatial variation of carbon stocks.

The results suggested that the implementation of the ER-SNWTP caused significant changes in water quantity in the receiving area. The ER-SNWTP replenished a large amount of water resources in water-scarce areas, greatly improving the regional water resource carrying capacity and providing a foundation for the sustainable development of the ecosystem and human production and life in water-receiving areas. Consequently, stricter requirements were proposed for the management of water-diversion projects and ecosystems. In the future, a scientific mechanism for optimal management of carbon and water resources should be established, optimizing land use patterns. More attention should be paid to the construction of ecological civilization while boosting economic development. Promoting an ecological compensation system, specifically a carbon ecological compensation system for inter-basin water transfer, is also encouraged.

Key words: carbon stocks; land use/cover change; inter-basin water transfer project; carbon density; spatio-temporal evolution