

侯海昆, 谢冰绮, 宋利祥等. 流溪河水库长序列入库洪水特征辨识与设计洪水复核[J]. 人民珠江, DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

流溪河水库长序列入库洪水特征辨识与设计洪水复核

侯海昆¹, 谢冰绮², 宋利祥^{2*}, 胡豫英²

(1. 广东粤电流溪河发电有限责任公司, 广东 广州 510960; 2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要: 受全球气候变化影响, 中小流域洪水特征演变日趋复杂, 识别其演变特征对洪水复核具有重要意义。基于流溪河水库 1959—2024 年共 66 a 洪水资料, 采用 Mann-Kendall 趋势检验、Sen 斜率估计、Pettitt 突变检验和 Morlet 小波分析方法, 识别洪水峰、量序列的趋势、突变与周期演变规律, 并评估资料延长对洪水复核的影响。结果表明, 年最大洪峰流量、24 h 洪量、3 d 洪量呈现不显著的轻微下降趋势; 突变检验 p 值均大于 0.05, 序列未发生显著突变; 洪水存在约 33 a 长周期和 5~7 a 短周期双重特征, 年最大洪峰流量和 24 h 洪量以长周期为主, 年最大 3 d 洪量以短周期为主。本次设计洪水复核成果略小于 1999 年成果, 100 年一遇最高库水位为 237.24 m, 1 000 年一遇为 238.42 m, 均未超原设计值。流溪河水库洪水序列总体稳定, 满足一致性假设, 具有多时间尺度周期特征, 洪水复核证实水库防洪安全达标, 研究成果可为变化环境下中小流域洪水复核提供参考。

关键词: 趋势分析; 突变分析; 周期分析; 洪水复核; 流溪河水库

中图分类号: TV122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-9235(XXXX)XX-0001-14

近年来受全球气候变化影响, 中国极端强降水及洪涝灾害突发性、极端性、反常性日益明显^[1], 与大江大河相比, 中小流域对气候变化和下垫面扰动的响应更为敏感, 其洪水特征演变规律往往更为复杂。流溪河流域为珠江流域一级支流, 其干流上的流溪河水库是保障广州北部区域防洪安全的关键控制性枢纽, 不仅直接关系到水库防洪调度决策与区域防洪安全, 也对流溪河干流径流过程产生重要影响。因此, 针对流溪河水库等资料条件较好的典型中小流域开展深入的洪水特征辨识, 对揭示区域洪水响应机理具有重要参考价值。同时, 基于最新长序列水文资料, 系统识别洪峰、洪量序列的趋势、突变与周期演变规律, 定量评估资料系列延长对设计洪水影响, 优化水库防洪调度方案、保障工程长效安全运行具有重要的理论支撑意义和工程应用

价值。

目前国内外已对水文序列多种演变规律识别方法进行研究, Mann-Kendall 趋势检验作为一种非参数方法, 不要求数据服从特定分布, 对异常值不敏感, 适用于偏态分布的水文序列趋势诊断^[2-3], 而 Sen 斜率估计 (Sen's slope) 用于衡量趋势的变化速率估计^[4], 两者配合已在国内外水文气象趋势分析中广泛采用。突变检验方面, Pettitt 检验无需假定序列分布类型, 能够识别单一突变点并给出显著性水平, 相较于有序聚类分析法仅能从离差平方和角度定性判断、滑动 t 检验要求序列服从正态分布等局限, Pettitt 检验更适用于偏态洪水序列的突变诊断^[5-6]。周期分析方面, Morlet 小波变换能够同时在时域和频域进行多分辨率分析, 能清晰地揭示洪水序列在不同时间尺度上的周期演变规律及其时变

收稿日期: 2026-04-27 修回日期: 2026-07-10

作者简介: 侯海昆 (1972—), 男, 主要从事水库优化调度及水库调度自动化研究工作。

通信作者: 宋利祥 (1985—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事洪涝灾害防御研究工作。

联系作者: 致信 rmzj@pearlwater.gov.cn, 由期刊转接。

特征^[7-9]。

当前,针对流溪河流域的水文分析多聚焦于年径流、降雨或年水位变化,余扬波等^[10]基于2000—2020年资料指出流溪河流域年均径流量呈增大趋势,且气候变化对径流形成起主导促进作用;向润洪^[11]利用1975—2014年水位资料揭示了太平场镇站年特征水位的降低趋势及年变幅增加特征;苏开君等^[12]则从降雨特性、流量频率及雨洪过程线角度对流溪河水库的水文特征进行了基础分析。尽管已有成果为本研究提供了重要基础,但现有研究仍存在一些不足:一方面,受限于大部分中小流域长序列水文资料的匮乏,或侧重于单一指标的趋势识别,未能同时揭示洪水序列在趋势、突变与周期三个维度上的演变全貌,中小流域洪峰、洪量特征的系统性演变规律研究不足;另一方面,流溪河水库的长序列设计洪水复核工作多基于较早年份或较短系列资料编制,近年来极端洪水事件频发背景下,将建库以来持续积累的实测洪水资料纳入系列并重新进行频率分析,可更全面反映近期水文情势变化对统计参数与特征水位的实际影响。

基于此,本研究以流溪河水库控制流域为研究对象,考虑水文数据大多是偏态且不服从同一分布^[13],采用Mann-Kendall趋势检验与Sen斜率估计识别洪峰、洪量序列的演变趋势及变化速率,运用Petitt突变检验诊断序列的变异节点及显著性水平,采用Morlet小波变换方法分析洪水序列的周期特征;最后,基于演变规律识别结果,采用常规P-Ⅲ型频率曲线适线法与同频率放大法,定量评估资料系列延长对设计洪水成果及水库特征水位复核的具体影响,为变化环境下水库防洪调度优化及特征水位适应性调整提供科学依据,同时也可作为珠江流域同类中小型水库的洪水复核工作提供方法参考。

1 研究区概况及方法

1.1 研究区概况

流溪河水库位于流溪河干流广州市从化区境内小车村下游峡谷处,水库坝址以上控制流域539 km²,工程等别为大(2)型水库,是不完全多年调节

水库。流域属亚热带季风气候区,具有温暖多雨、光热充足、温差较小、夏季长、霜期短等气候特征,流域的地貌属华南台地的一部分,历史上多次变迁,形成东北高,西南低的地势,流域洪水涨落较快,峰型尖瘦,洪水过程线多呈单峰形。流域范围内有流溪河坝上水位站及6个雨量站,见图1。流溪河水库上游主要水利工程包括4座小(1)型水库,无专用防洪库容,总集水面积占流溪河水库8%,占比偏低,对流溪河水库入库洪峰、洪量及洪水过程基本无影响。

1.2 资料选取

流溪河水库洪水过程一般在1~2 d,本次研究收集了流溪河水库自1959年建成运行以来的出库流量、水库蓄水量变化等水文数据,并基于水量平衡法还原入库洪水过程。技术设计阶段调查到1881、1925、1937、1947年4场建库前天然特大洪水,1974年水库洪水复查成果表明建库后洪峰流量较建库前平均增大45.4%,前述历史洪水已据此统一修正为入库洪水。经一致性分析、插补延长、历史调查与考证后可形成1959—2024年连续66 a年最大洪峰流量、24h洪量、3d洪量的洪水特征值序列,所有资料均经系统核对与整编,数据完整可靠。本次在洪水特征演变分析中采用1959—2024年资料,不考虑历史洪水;频率分析时,年最大洪峰流量序列纳入了历史调查洪水,洪量仅采用实测洪水序列。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析方法

采用Mann-Kendall(M-K)趋势检验^[14-15]是一种基于秩次的非参数统计方法,其优点是不要求序列服从特定分布,且受异常值干扰较小,常被用于水文要素变化趋势识别分析,进一步采用Sen斜率估计方法^[16]对变化速率进行定量估计,Sen斜率估计方法^[16]是一种稳健的非参数斜率估计方法,能够有效避免极端值对趋势幅度估计的影响,常与M-K检验结合使用,用于刻画水文要素变化的定量特征。

对于具有 n 个样本量的时间序列 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$,M-K检验的统计量 S 按下式计算:

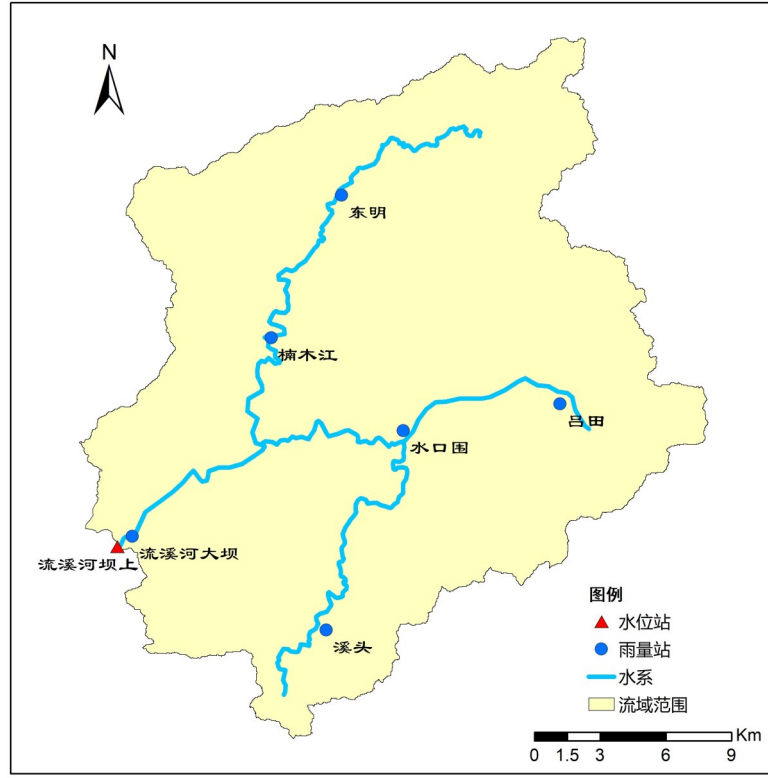


图1 流溪河水库流域水系及站点

Fig. 1 River network and hydrological stations in Liuxihe Reservoir Watershed

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sgn} = \begin{cases} 1, & x_j > x_i \\ 0, & x_j = x_i \\ -1, & x_j < x_i \end{cases} \quad (2)$$

当 $n \geq 10$ 时, 统计量 S 近似服从正态分布, 其均值为 0, 方差 $\text{Var}(S)$ 为:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (3)$$

式中: g 为结的组数; t_p 为第 p 组结的观测值个数 (即相同数值的重复次数)。

标准化检验统计量 Z 按下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

在给定显著性水平 α 下, 若 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 则拒绝原

假设, 认为序列存在显著的单调趋势, $Z > 0$ 表示上升趋势, $Z < 0$ 表示下降趋势。

对于长度为 n 的时间序列, Sen 斜率估计法首先计算所有可能数据点对的斜率:

$$Q_k = \frac{x_j - x_i}{j - i}, \forall 1 \leq i \leq n \quad (5)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为第 i 和第 j 时刻的观测值; n 为序列长度。将所有计算得到的 Q_k 按数值从小到大排序, 则 Sen 斜率估计值 β 取其中位数, $\beta > 0$ 表示序列呈增加趋势, $\beta < 0$ 表示序列呈减小趋势, $|\beta|$ 的大小反映趋势变化的速率。

1.3.2 突变分析方法

Pettitt 检验^[17]是一种基于秩次的非参数统计方法, 用于识别时间序列中是否存在显著的均值突变点。该方法不依赖于数据总体分布形态, 对离群值具有较强的抗干扰能力, 且能同时给出突变发生的时间位置及其统计显著性, 因而在水文、气象等环境序列的变异性诊断中应用广泛。

设长度为 n 的时间序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 假设

序列在时刻 t 发生突变,将序列分割为前后两个子样本: $x_1, \dots, x_t$ 和 $x_{t+1}, \dots, x_n$, 定义秩次统计量 $U_{t,n}$ 为

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sgn}(X_i - X_j), t = 1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

取 $U_{t,n}$ 绝对值的最大值所对应的时刻作为候选突变点 t_0 ,

$$K_n = \max_{1 \leq t \leq n} |U_{t,n}| \quad (7)$$

$$t_0 = \arg \max_{1 \leq t \leq n} |U_{t,n}| \quad (8)$$

检验统计量 K_n 的显著性水平可通过下式近似计算:

$$p \approx 2 \cdot \exp\left(\frac{-6K_n^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (9)$$

当 $p \leq \alpha$ 时,拒绝原假设,认为序列在 t_0 时刻存在显著的均值突变;反之,则认为序列未发生显著突变。

1.3.3 周期性规律分析方法

Morlet 小波分析^[18]是一种时频分析方法,能够揭示时间序列在不同时间尺度上的变化特征,适用于水文序列的周期识别分析。通过小波变换,可以同时获取时间序列的时域和频域信息^[19],识别序列中存在的多时间尺度周期特征。Morlet 小波是复值小波,其母小波函数表达式为

$$\psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (10)$$

式中: ω_0 为小波中心频率,为无量纲频率参数,通常取 6.0,此时小波函数兼具时域局部性与频域集中性,满足水文序列周期分析需求。

对于长度为 n 的洪水时间序列,其连续小波变换定义为

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (11)$$

式中: a 为尺度因子,与序列实际周期正相关; b 为时间因子,对应序列的具体年份; $\bar{\psi}$ 为 Morlet 母小波函数的共轭函数。

同时,为避免边界效应导致的结果失真,引入影响锥(COI)界定可信分析区域,仅对边界效应区以外的小波系数进行分析。

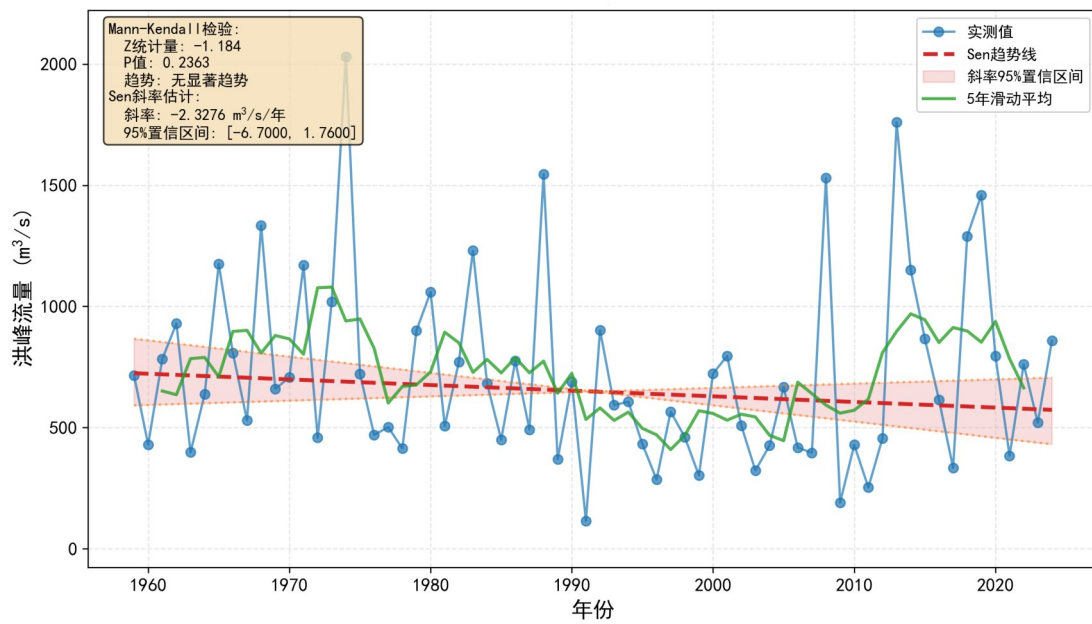
1.3.4 洪水复核方法

基于 1959—2024 年入库洪水系列,遵循 SL 44—2006《水利水电工程设计洪水计算规范》的要求,采用数学期望公式计算经验频率, P-Ⅲ 型频率曲线作为频率曲线线形,矩法初估参数,目估适线法调整确定最终参数,确定各设计频率对应的洪峰流量及时段洪量,对比分析统计参数与设计洪水成果的变化情况。结合同频率放大法推求设计洪水过程线,将各情景设计洪水过程线输入水库调洪演算,复核校核洪水位、设计洪水位等特征水位,定量评估资料延长对工程安全裕度的影响。

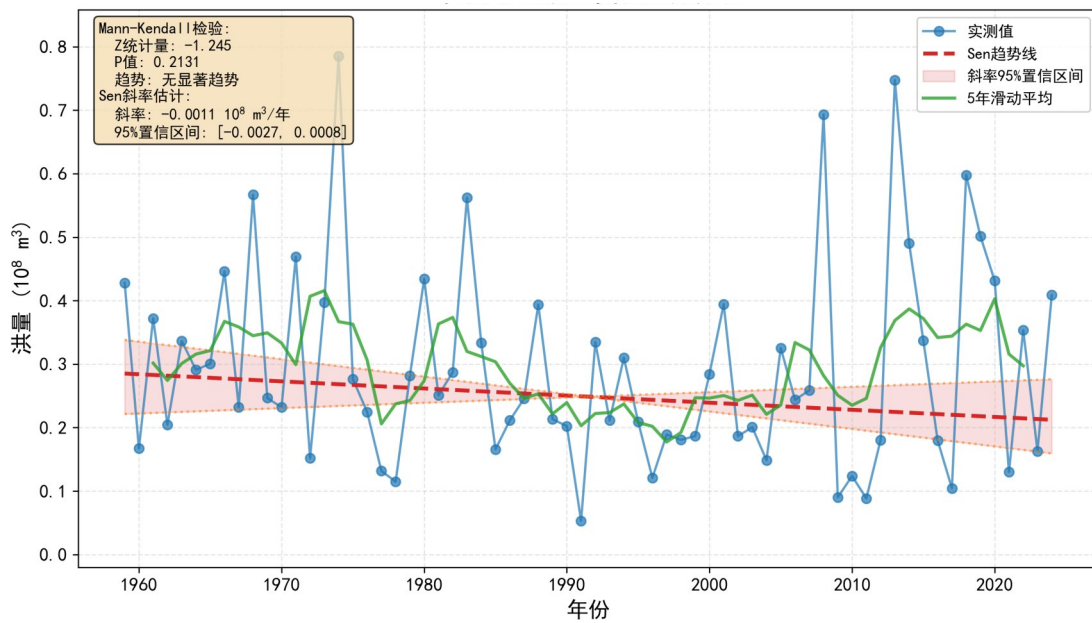
2 洪水特征演变分析

2.1 洪水特征趋势分析

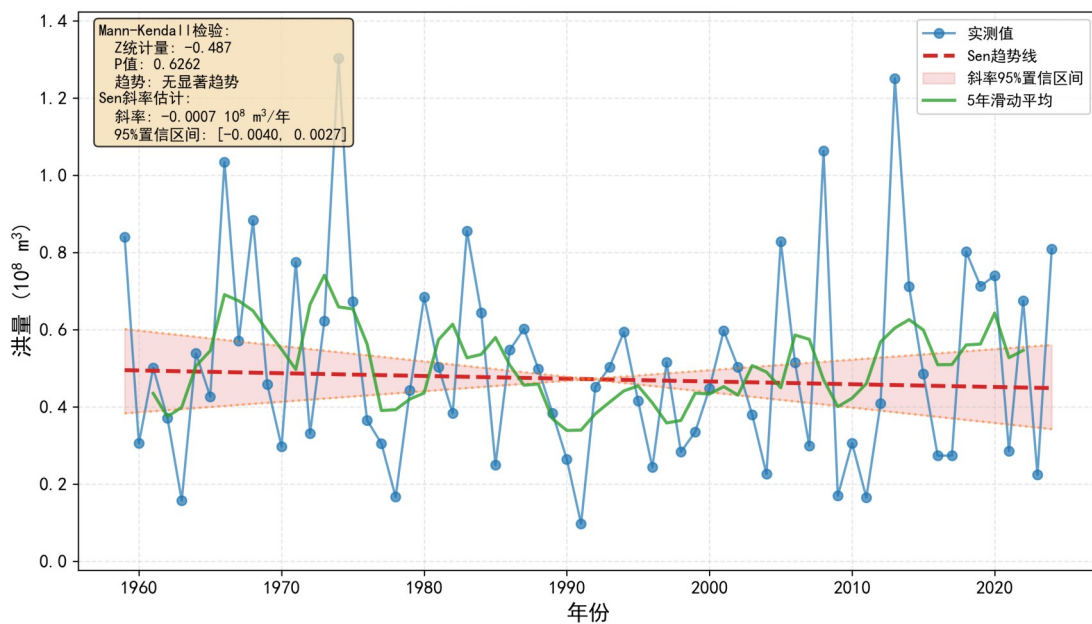
流溪河水库洪水特征值在 1959—2024 共 66 a 尺度上呈现轻微下降趋势(图 2),但均未达到统计显著性水平,其中,最大洪峰流量为 2 030 m³/s,最大 24 h 洪量 0.785 亿 m³,最大 3 d 洪量为 1.303 亿 m³,均出现在 1974 年,3 个变量的 Sen 斜率分别为 -2.33 m³/s/a、-0.001 1 亿 m³/a、-0.000 7 亿 m³/a,所有变量的 95% 置信区间均跨越零点,说明趋势方向存在较大不确定性。总体而言,流溪河水库建库以来入库洪水特性相对稳定,未发生明显的变化趋势。



a) 年最大洪峰流量变化趋势分析



b) 年最大24 h洪量变化趋势分析



c)年最大3 d洪量变化趋势分析

图2 入库洪水特征值 Mann-Kendall 趋势检验结果

Fig. 2 Results of the Mann-Kendall trend test for inflow flood characteristics

2.2 洪水特征突变分析

Pettitt 突变检验结果见图3,流溪河水库入库洪水的年最大洪峰流量、24 h 洪量、3 d 洪量可能突变点分别出现在1999、1998、1997年,但对应的显著性 p 值分别为0.18、0.37、0.92,均大于0.05的显著性水平,表明流溪河水库1959—2024年入库洪水峰、量序列均未发生统计意义上的显著突变,气候变化或下垫面改变未对建库后洪水产生显著干扰,洪水序列一致性较好,可用于后续洪水复核工作。

2.3 洪水特征周期分析

本次采用 Morlet 小波分析方法对流溪河水库1959—2024年共66 a的入库洪水特征序列进行周期识别分析,绘制小波系数实部等值线图和小波方差图见图4、5,分析结果表明,年最大洪峰、最大24 h 洪量与最大3 d 洪量序列均呈现多时间尺度嵌套的周期演变规律,年最大洪峰流量序列的主周期为33.1 a,次周期分别为4.9、5.8 a,长周期在整个时域上均有显著表现,能量分布较强,5年左右的短周期在不同时段呈现强弱交替的变化特征,反映出洪峰流量受长周期和短周期气候波动的共同影响;年最大24 h 洪量序列的主周期为33.1 a,次周期为

5.8、4.9 a,与洪峰流量序列的周期特征高度一致,短历时洪量与洪峰流量具有相似的时间演变规律,两者受相同的水文气候驱动因子影响;年最大3 d 洪量序列的主周期为5.8 a,次周期分别为33.1、6.9 a,与洪峰流量和24 h 洪量不同的周期特征不同,该序列以短周期变化为主导,5~7 a短周期在序列中持续活跃,能量分布较为均匀。

总体而言,流溪河水库的洪水特征值表现出约33 a的长周期和5~7 a的短周期双重时间尺度特征,但不同洪水指标的主导周期存在明显差异,洪峰流量和年最大24 h 洪量以长周期为主导,而年最大3 d 洪量则以短周期为主导。这一差异表明,对于主要由强对流过程引发的洪峰和最大24 h 洪量来说,对长周期环流背景的变化更敏感^[20],而最大3 d 洪量受更短周期的气候异常事件的影响更为显著,如2~7 a周期的厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO),短周期事件能直接影响环流的持续性和水汽输送,进而导致持续数日的降雨。

3 水库设计洪水与特征水位复核

洪水特征演变分析表明,流溪河水库建库以来入库洪水特征总体稳定,未呈现显著的单调趋势,

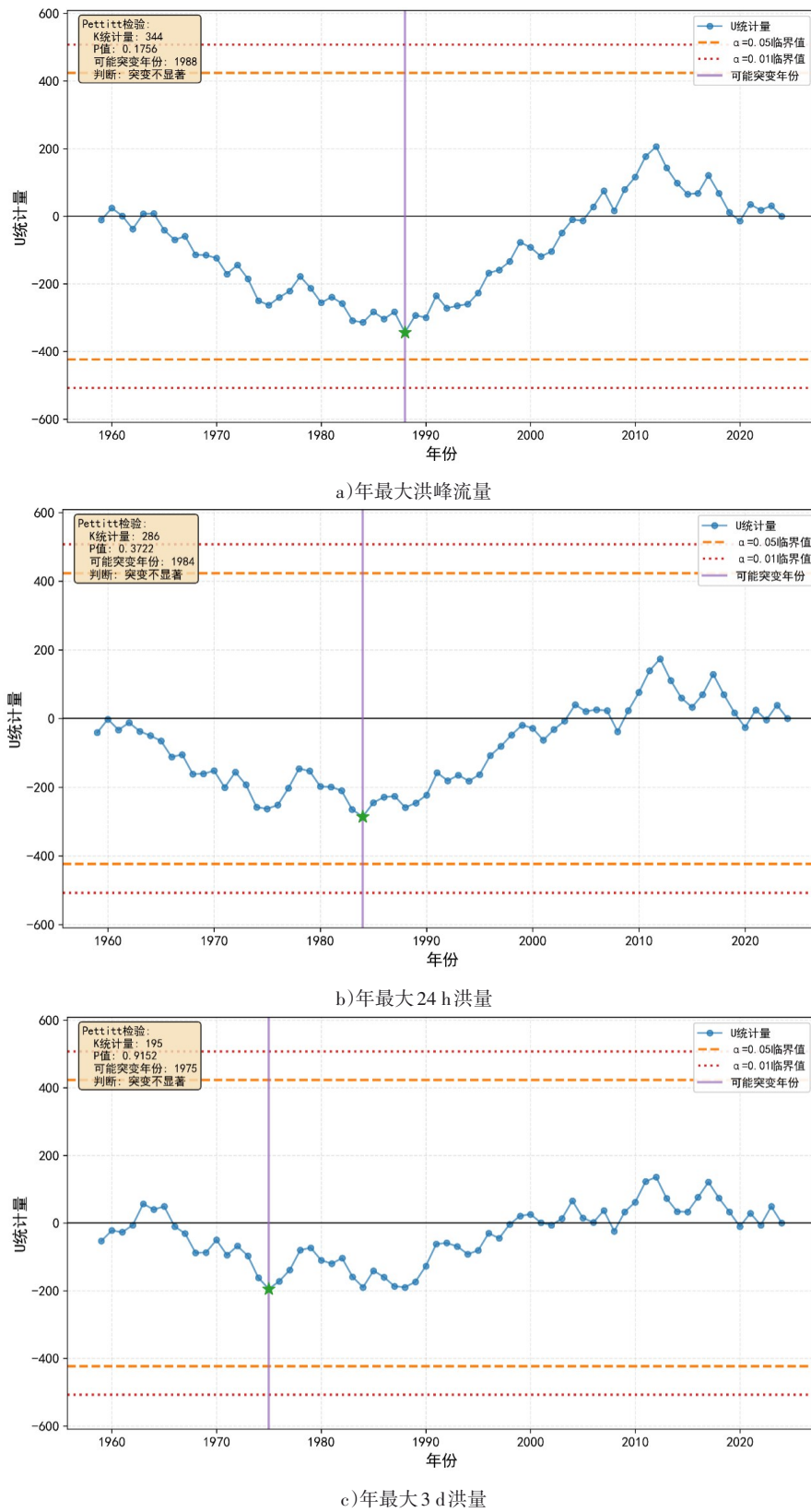


图3 Pettitt突变检验统计量变化

Fig. 3 Variation of Pettitt mutation test statistic

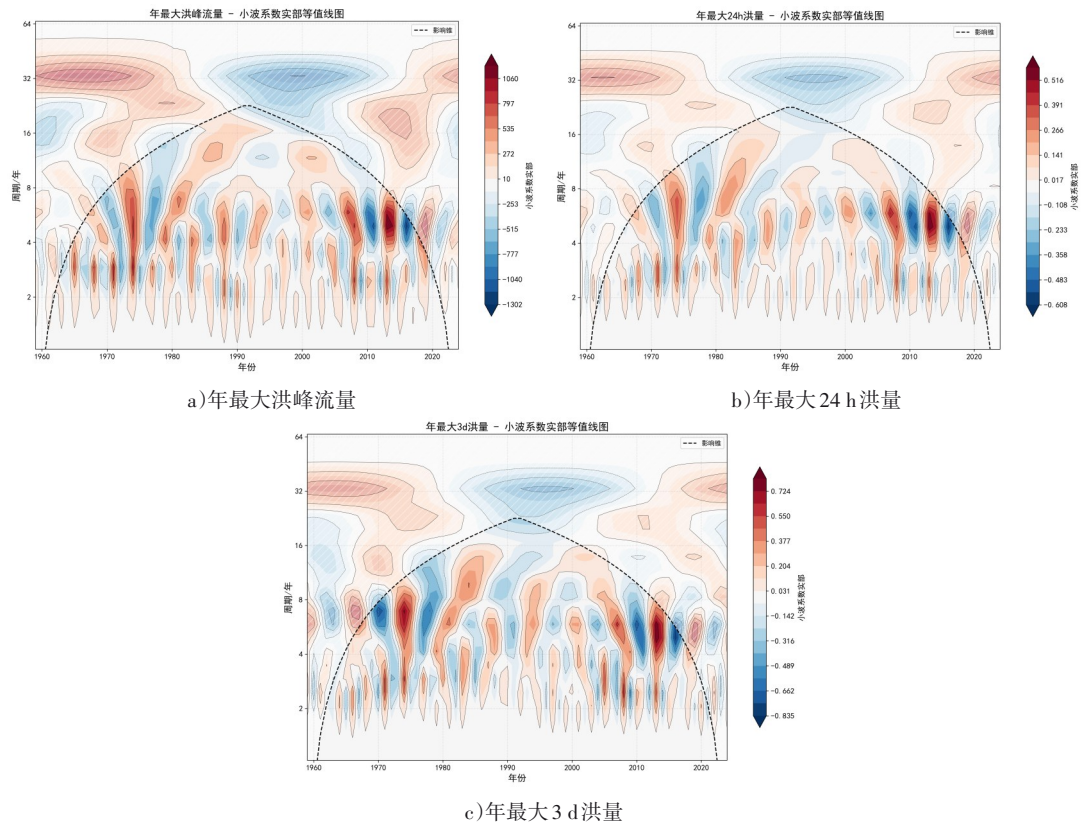


图 4 Morlet小波系数实部等值线

Fig. 4 Real-part contour map of morlet wavelet coefficients

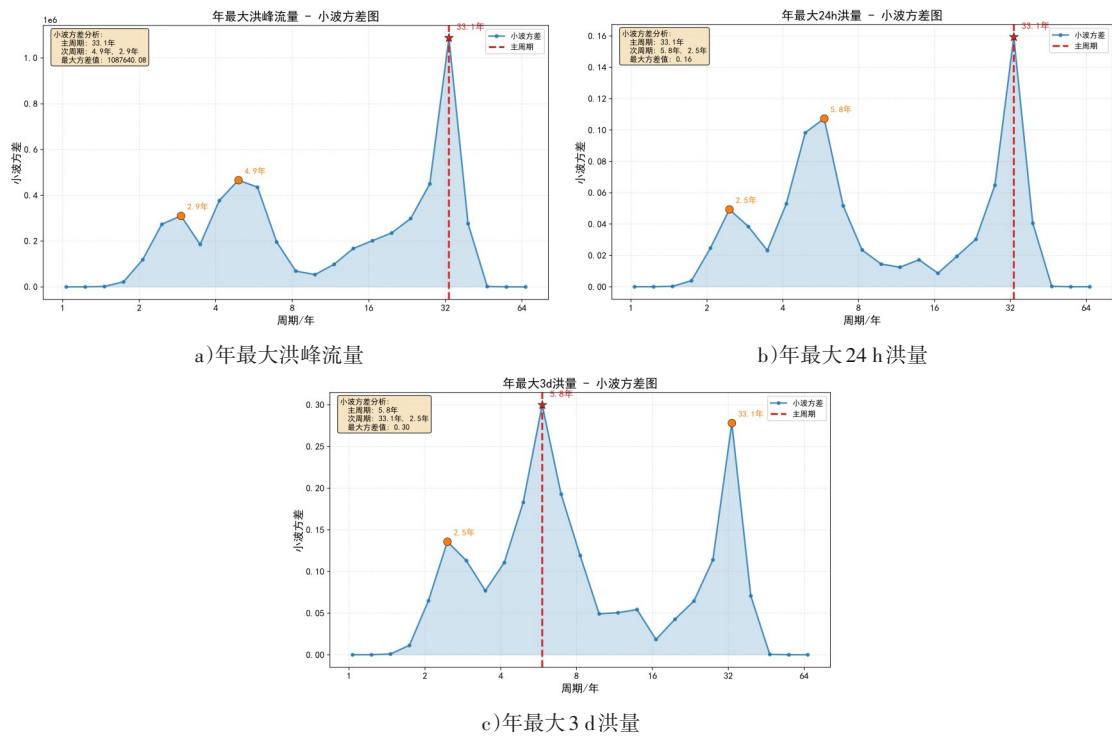


图 5 小波方差

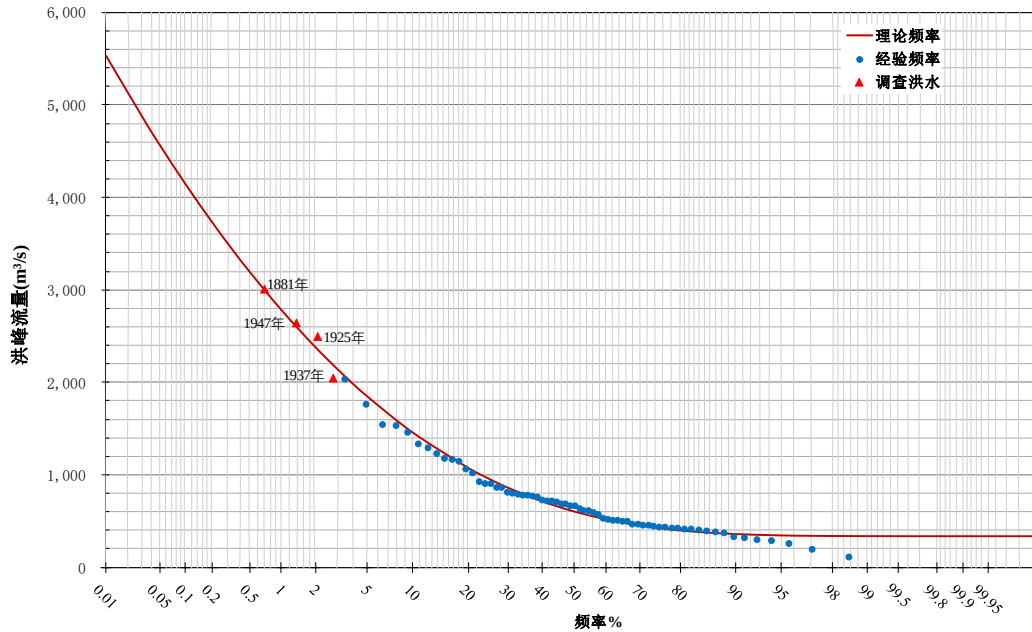
Fig. 5 Wavelet variance plot

也未检出统计意义上的突变, 序列满足水文一致性假设, 可用常规 P-III 型频率曲线统一适线。同时, 周期分析结果表明洪水序列存在明显的多时间尺度嵌套的周期演变规律, 将资料系列从延长至 66 a, 不仅使序列长度完整覆盖了主导周期的多个循环, 有效避免周期截断可能引起的参数估计偏差, 提升

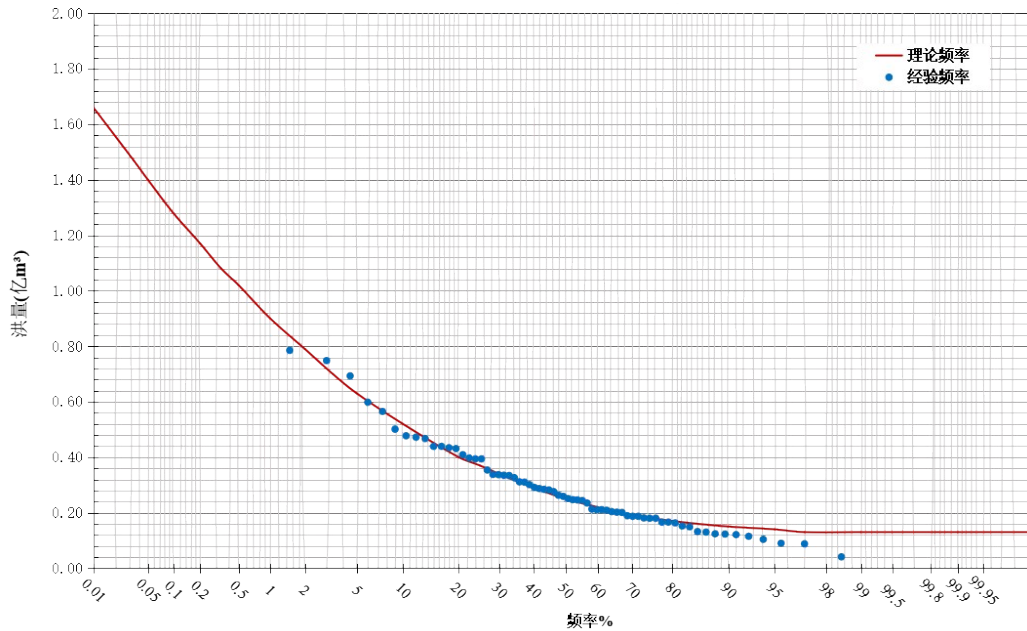
设计成果可靠性。

3.1 设计洪水复核

本次设计洪水成果最大洪峰和各时段洪量拟合的频率曲线见图 6, 通过读取图中不同频率对应的流量即可得到相应频率的设计流量。



a) 洪峰流量



b) 年最大 24 h 洪量

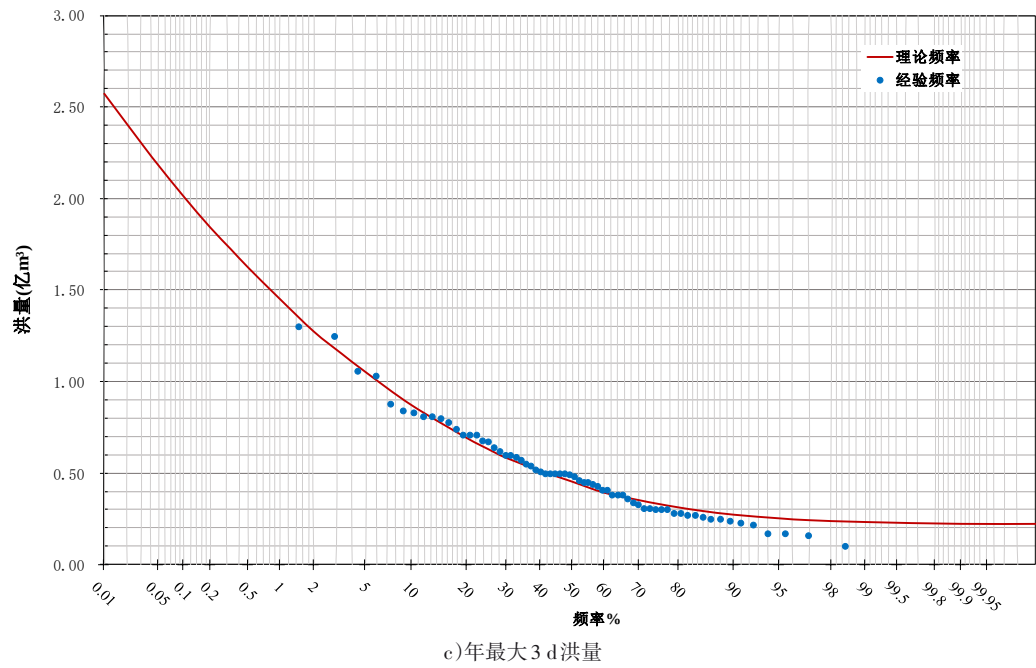


图6 经验频率曲线

Fig. 6 Empirical frequency curve

本次成果与1980、1999年洪水复查成果对比见表1,1980年洪水复查、1999年洪水复查采用资料序列分别为1959年—1975、1959—1998年,均考虑了4场调查洪水组成的不连续系列,采用P-Ⅲ频率曲线分析。洪水统计参数对比结果表明,随着资料系列延长,流溪水库洪水统计参数呈现规律性变化。洪峰流量均值从1980年的875 m³/s降至本次的790 m³/s,降幅9.7%;3 d洪量均值从0.60亿 m³降至0.52亿 m³,降幅13.3%;24 h洪量均值基本稳定在0.30亿 m³,主要是由于长序列纳入了更多平水年和枯水年数据,统计均值更能反映流域长期洪水平均水平。洪峰流量变差系数C_v从0.60升至0.67,表明洪峰流量离散程度有所增加,极端洪峰事件相对增幅增大。

设计洪水值变化在不同频率呈现不同特征。P=0.10%(千年一遇)设计洪峰流量从1980年的4 030 m³/s变化至本次的4 150 m³/s,变幅仅3.0%,24 h和3 d洪量也呈小幅波动,主要是由于高频率设计值受历史特大洪水控制,本次复核维持了原历史洪水修正值,因此极端洪水风险未发生显著变化;P=1%(百年一遇)频率设计值整体呈下降趋势,其中洪

峰流量从2 850 m³/s降至2 790 m³,降幅2.1%;3 d洪量从1.73亿 m³降至1.45亿 m³,降幅达16.2%,由于随着洪水系列的延长,洪峰及洪量一直未出现较大值。本次复核成果基于流域最长连续实测资料,更能反映当前流域水文情势,可为水库防洪调度优化提供科学依据。

表1 设计洪水复核成果对比

Tab. 1 Comparison of Design Flood Review Results

项目	设计阶段	均值	C _v	C _s /C _v	各级频率设计值	
					0.10%	1%
Q _m /(m ³ ·s ⁻¹)	1980年复查	875	0.60	3.0	4 030	2 850
	1999年复查	860	0.60	4.0	4 170	2 830
	本次复查	790	0.67	3.5	4 150	2 790
W _{24h} /亿 m ³	1980年复查	—	—	—	—	—
	1999年复查	0.30	0.55	4.0	1.32	0.91
	本次复查	0.30	0.56	3.5	1.28	0.9
W _{3d} /亿 m ³	1980年复查	0.60	0.55	3.0	2.39	1.73
	1999年复查	0.54	0.48	4.0	2.05	1.46
	本次复查	0.52	0.51	3.5	2.01	1.45

3.2 特征水位复核

由于不同典型过程通过同频率放大后洪峰一致, 典型年的洪量分配是影响洪水调度的主要因素, 流溪河水库洪水调节过程一般在 12 h 左右, 因此决定调洪水位高低的关键是 24 h 洪量以及 12 h 洪量在 24 h 内的时程分配。1980 年洪水复核采用 1973 年洪水作为典型过程; 1999 年复核确定 1988

年型为最不利典型洪水。本次延长序列后发现 2019 年洪水 W_{12h}/W_{24h} 比值较高且峰前洪量更为集中, 导致洪峰到达前库水位已被显著抬高, 防洪库容提前被部分占用, 进而使得洪峰时刻的最大下泄流量进一步增大, 对水库防洪安全更为不利。因此, 本次复核采用 2019 年洪水作为设计典型洪水过程。

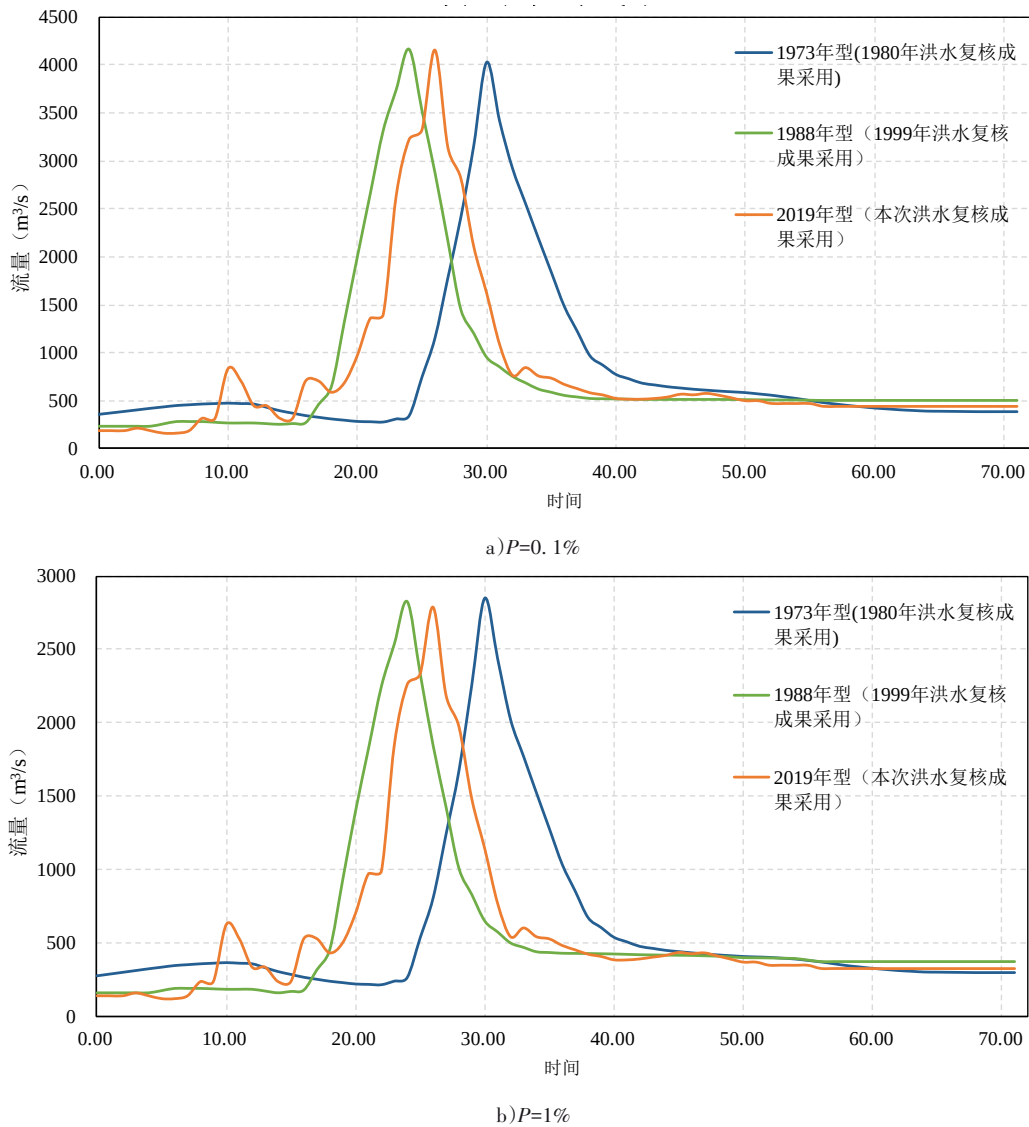


图7 不同频率典型洪水过程线对比

Fig. 7 Comparison of typical flood hydrographs with different frequencies

基于流溪河水库最新复核的库容曲线及不同频率的流溪河水库入库设计洪水调洪演算工作, 本次调洪演算成果与上一次复查成果 1999 年复查成果、1980 年复查成果(现用)对比见表 2, 各次最高库

水位计算成果均较为接近, 本次除了 $P=0.1\%$ 下的最高库水位, 其余最高库水位、最大下泄量均较 1999 年的成果小。本次复核的 100 年一遇最高库水位 237.24 m, 不超过流溪河水库设计洪水位 237.60

m, 1000年一遇最高库水位 238.42 m 不超过流溪河标准。
水库校核洪水位 238.45 m, 水库防洪能力满足现行

表2 水库特征水位复核成果对比

Tab. 2 Comparison of review results for reservoir characteristic water levels

洪水频率/%	最高库水位/m			最大下泄量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)		
	本次复查	1999年复查	1980年复查(现用)	本次复查	1999年复查	1980年复查(现用)
0.1	238.42	238.3	238.45	2 140	2 130	2 400
1.0	237.24	237.3	237.60	1 460	1 250	1 240

4 结论

基于流溪河水库 1959—2024 年入库洪水系列, 系统分析了洪水特征演变规律并复核了设计洪水与特征水位, 主要结论如下。

a) 流溪河水库 1959–2024 年共 66 a 洪水特征序列总体稳定, 未呈现显著的单调变化趋势, Sen 斜率较小, 95% 置信区间均跨越零点, 趋势方向存在明显不确定性; 突变检验均未检出显著突变点, 序列满足水文一致性假设, 可采用常规 P-III 型频率曲线统一适线。

b) 洪水特征值存在约 33 a 长周期和 5~7 a 短周期的双重时间尺度演变规律, 洪峰流量和年最大 24 h 洪量以长周期为主导, 年最大 3 d 洪量以短周期为主导, 反映出不同历时洪水对年代际环流背景和年际气候振荡的差异性响应。将资料系列延长至 2024 年能够有效覆盖主导周期的多个循环, 提升了设计洪水参数估计的可靠性。

c) 本次复核的设计洪峰流量及洪量与 1999 年复查成果接近且略微偏小, 这是由于序列延长后洪峰及洪量未出现较大值, 频率计算成果减小符合统计学规律。调洪演算结果显示, 100 年一遇最高库水位 237.24 m 不超过设计洪水位 237.60 m, 1 000 年一遇最高库水位 238.42 m 不超过校核洪水位 238.45 m, 水库防洪安全满足规范要求, 为流溪河水库设计洪水复核及运行管理提供了科学依据。

d) 本研究结果与当前多数文献提出的气候变化背景下中小流域极端洪水呈显著增加趋势的结论存在明显差异。流溪河水库极端洪水风险保持

长期稳定, 设计值变化较小, 且洪水序列呈现出清晰的多时间尺度周期性特征, 整体表现出较强的平稳性, 体现了中小流域洪水演变规律的区域独特性, 表明中小流域对气候变化的响应并非单一模式, 其洪水特征同时受区域气候背景、流域下垫面条件及人类活动的综合影响, 下一步需要通过积累更长时间序列的观测数据, 并开展多流域对比研究, 才能更全面地揭示气候变化下中小流域洪水响应的复杂机理, 为区域防洪减灾体系建设提供更科学的依据。

参考文献:

- [1] 耿晓君, 赵钟楠, 李原园, 等. 我国极端降水与洪涝灾害事件特点及应对思路 and 对策[J]. 中国水利, 2025(22): 47–51, 72.
Geng Xiaojun, Zhao Zhongnan, Li Yuanyuan, et al. Characteristics of extreme precipitation and flood disasters in China and response approaches and countermeasures [J]. China Water Resources, 2025(22): 47–51, 72. (in Chinese)
- [2] 徐承毅. 广东省近 60 年降水量时空变化趋势及突变分析[J]. 人民珠江, 2023, 44(11): 21–30.
Xu Chengyi. Temporal and Spatial Trends of Precipitation and Mutation in Guangdong Province over the Past 60 Years [J]. Pearl River, 2023, 44(11): 21–30. (in Chinese)
- [3] 屈俭云, 戴艳玲, 王昊. 补远江干流年径流变化趋势及特性分析[J]. 人民珠江, 2024, 45(S1): 196–200.
Qu Jianyun, Dai Yanling, Wang Hao. Trends and Characterization of the Annual Runoff in the Main Stream of the Shuyuan River [J]. Pearl River, 2024, 45(S1): 196–200. (in Chinese)
- [4] 颜文伟, 梁丽霞, 陶虎, 等. 变化环境下渭河流域径流演变归因及空间异质性研究[J]. 人民珠江, 2026, 47(5): 88–100.

- Xie Wenwei, Liang Lixia, Tao Hu, et al. Attribution of Runoff and Spatial Heterogeneity in the Weihe River Basin under Changing Environments [J]. Pearl River, 2026, 47(5): 88–100. (in Chinese)
- [5] 田小靖,赵广举,穆兴民,等. 水文序列突变点识别方法比较研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 33–40.
- Tian Xiaojing, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Comparison study on hydrological time series change-point testing methods [J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(2): 33–40. (in Chinese)
- [6] 左超,常兴,辛朋磊,等. 黄河上中下游水沙变化特征及其驱动因素对比分析[J]. 中国农村水利水电, 2025(4): 184–191, 200.
- Zuo Chao, Chang Xing, Xin Penglei, et al. Comparative Analysis of the Characteristics and Driving Factors of Water and Sediment Variation in the Upper-middle-lower of Yellow River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2025(4): 184–191, 200. (in Chinese)
- [7] 邹玉婷,李昌文,常文娟,等. 湄公河三角洲洪水特性及其演变规律分析[J]. 人民长江, 2024, 55(3): 35–41.
- Zou Yuting, Li Changwen, Chang Wenjuan, et al. Analysis on flood characteristics and evolution laws in Mekong Delta [J]. Yangtze River, 2024, 55(3): 35–41. (in Chinese)
- [8] 李红燕,王志平,羊华,等. 基于Morlet小波分析的弥苴河径流量变化及其影响因素分析[J]. 人民珠江, 2021, 42(3): 53–60.
- Li Hongyan, Wang Zhiping, Yang Hua, et al. Analysis of Runoff Change and Its Influencing Factors of Miju River Based on Morlet Wavelet Analysis [J]. Pearl River, 2021, 42(3): 53–60. (in Chinese)
- [9] 陈鑫,刘艳丽,刁艳芳,等. 关水水库流域水文序列突变诊断与非一致性研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(5): 28–32.
- Chen Xin, Liu Yanli, Diao Yanfang, et al. Research on the Diagnosis of Hydrologic Series Abrupt Changes and Inconsistency in Guanhe Reservoir Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(5): 28–32. (in Chinese)
- [10] 余扬波,唐国平,牛香豫,等. 土地利用和气候变化对流溪河水库流域径流的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 32–39, 48.
- Yu Yangbo, Tang Guoping, Niu Xiangyu, et al. Effect of Land Use and Climate Change on Runoff in Liuxi River Reservoir Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 32–39, 48. (in Chinese)
- [11] 向润洪. 流溪河太平场镇站40年水位变化规律分析[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2021, 19(4): 10–13.
- Xiang Runhong. 40-Year Water Level Variation Analysis of Taipingchang Station, Liuxi River [J]. Journal of Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering, 2021, 19(4): 10–13. (in Chinese)
- [12] 苏开君. 流溪河水库的水文特征研究[C]//中国科学技术协会. 节能环保 和谐发展: 2007中国科协年会论文集(三). 广州市华南环境资源研究院, 2007: 1321–1326.
- Su Kaijun. Study on Hydrological Characteristics of Liuxi Reservoir [C]//China Association for Science and Technology. Energy Conservation and Environmental Protection, Harmonious Development: Proceedings of the 2007 Annual Meeting of China Association for Science and Technology (Volume III). Guangzhou South China Institute of Environmental Resources, 2007: 1321–1326. (in Chinese)
- [13] 左大幸,臧传富,汪丽娜. 1980—2019年珠江流域潜在蒸发量时空变化及其影响因素分析[J]. 人民珠江, 2022, 43(10): 41–49.
- Zuo Daxing, Zang Chuanfu, Wang Lina. Temporal and Spatial Variation of Potential Evaporation and Its Influencing Factors in Pearl River Basin from 1980 to 2019 [J]. Pearl River, 2022, 43(10): 41–49. (in Chinese)
- [14] Mann H B. Non-parametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245–259.
- [15] Kendall M G. Rank Correlation Methods [J]. British Journal of Psychology, 1990, 25(1): 86–91.
- [16] Sen P K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau [J]. Publications of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379–1389.
- [17] Pettitt A N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979, 28(2): 126–135.
- [18] Morlet J, Arens G, Fourgeau E, et al. Wave propagation and sampling theory—Part II: Sampling theory and complex waves [J]. Geophysics, 1982, 47(2): 222–236.
- [19] 梁媛媛. 广东省主要干流年最大洪峰流量变化特征分析[J]. 人民珠江, 2022, 43(10): 57–64.
- Liang Yuanyuan. Analysis of Variation Characteristics of the Annual Maximum Flood Flow of Main Streams in Guangdong Province [J]. Pearl River, 2022, 43(10): 57–64. (in Chinese)
- [20] Haslinger K, Breinl K, Pavlin L, et al. Increasing hourly heavy rainfall in Austria reflected in flood changes [J]. Nature, 2025, 639(8055): 667–672.

Identification of Inflow Flood Characteristics for Long-Term Series and Design Flood Reassessment of Liuxihe Reservoir

HOU Haikun¹, XIE Bingqi², SONG Lixiang^{2}, HU Yuying²*

(1. Guangdong Yuedian Liuxihe Power Generation Co.,Ltd., Guangzhou 510960, China; 2. Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Against the backdrop of intensifying global climate change, the evolutionary dynamics of flood characteristics in small- and medium-sized watersheds have grown increasingly intricate. Accurately identifying these spatiotemporal patterns carries critical practical implications for the formal review and updating of design flood standards. Taking the Liuxihe Reservoir as the study case, this paper systematically investigates the evolutionary behaviors of its inflow flood peak discharge and flood volume series from three complementary dimensions: long-term trend, abrupt change point detection, and multi-timescale periodicity, followed by a quantitative assessment of how hydrological record extension influences the reassessment outcomes of design flood values. Using a 66-year flood record (1959 – 2024) of the Liuxihe Reservoir, this study applied the Mann – Kendall test and Sen’s slope estimator to identify the trends and rates of change in the inflow flood peak and volume series. The Pettitt test was then employed to detect change points and their statistical significance. The Morlet wavelet transform was used to reveal the time-scale periodic characteristics of the flood series. Finally, based on these identified evolution patterns, the impact of extending the data series on the reassessment of design floods and characteristic water levels was quantitatively evaluated. The results showed that the annual maximum peak discharge, 24-hour flood volume, and 3-day flood volume series all exhibited slight decreasing trends, but none were statistically significant. The Sen’s slope estimates were $-2.33 \text{ m}^3/\text{s}$ per year, $-0.0011 \times 10^8 \text{ m}^3$ per year, and $-0.0007 \times 10^8 \text{ m}^3$ per year, respectively, with 95% confidence intervals included zero, suggesting considerable uncertainty in the trends. The Pettitt test showed that the p-values were all above 0.05, indicating no statistically significant abrupt changes, thus satisfying the hydrological consistency assumption. The Morlet wavelet analysis revealed two distinct periodic components in the flood variables: a long period of approximately 33 years and a short period of 5 – 7 years. The peak discharge and 24-hour flood volume were dominated by the long period, while the 3-day flood volume was governed by the short period. This discrepancy reflects the differential responses of flood events with varying durations to multi-decadal atmospheric circulation regimes and interannual climate anomalies. Extending the series to 2024 effectively covers multiple cycles of the dominant periods, thereby improving the reliability of design flood parameter estimation. The reassessed design flood peak discharge and flood volumes were generally comparable to the 1999 results but slightly lower, which is expected because no larger flood events occurred in the extended period, and the reduction in frequency estimates follows statistical principles. Flood routing showed that the 100-year and 1 000-year maximum water levels were 237.24 m and 238.42 m, both below the original design values, thus meeting the regulatory requirements. The annual maximum flood series of Liuxihe Reservoir exhibits overall statistical stationarity, with well-defined multi-timescale periodic oscillations and no statistically significant monotonic long-term trend. These empirical findings deviate substantially from the widely documented rising tendencies of extreme flood events in small- and medium-sized watersheds under ongoing climate change, which underscores the regional specificity of flood regime evolution in this catchment. Follow-up investigations based on extended observational datasets and cross-watershed comparative analyses are warranted to fully disentangle the intricate hydrological response mechanisms behind such atypical flood behaviors. The outcomes of this study provide a robust scientific reference for design flood reassessment and reservoir operational management under the non-stationary background of a changing climate.

Keywords: trend analysis; abrupt change analysis; periodicity analysis; design flood review; Liuxihe Reservoir

(责任编辑:向 飞)