



长江上游宜宾至重庆河段水沙情势变化特征*

郑沛¹, 钟亮^{1,2}, 赵瑜健¹

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 长江上游宜宾至重庆河段是长江黄金航道的重要组成部分, 在自然因素和人为因素的综合作用下, 该河段近期水沙情势发生了一定变化。基于长江朱沱站、寸滩站(简称“两站”)1956—2020年的径流量和悬移质输沙量原型观测资料, 分析长江宜宾至重庆河段的水沙趋势性、突变性和周期性变化特征, 结果表明: 1) 朱沱站径流量呈上升趋势, 寸滩站径流量呈下降趋势, 但均不显著; 两站输沙量均呈异常显著下降趋势。2) 两站径流量和输沙量均出现突变特征, 径流量突变发生在1960—1969年, 2000年以来也存在径流量突变情况; 而输沙量的突变主要发生在2000年至今。3) 朱沱站径流量在28 a的时间尺度下周期震荡最剧烈, 径流变化的平均周期约为19 a, 相当于经历了3.5个丰水期和枯水期的转换; 输沙量在93 a时间尺度下, 呈现出明显的周期性, 径流变化的平均周期约为57 a; 寸滩站径流量序列中, 14、28、47 a时间尺度下, 周期性变化较明显, 寸滩站输沙量变化的主周期约为93 a。

关键词: 长江上游; 径流量; 输沙量; 趋势性; 突变性; 周期性; 变化特征

中图分类号: U61; TV143.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0113-09

Change characteristics in water and sediment conditions in upper reaches of the Yangtze River from Yibin to Chongqing

ZHENG Pei¹, ZHONG Liang^{1,2}, ZHAO Yujian¹

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering, Ministry of Education,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The upper reaches of the Yangtze River from Yibin to Chongqing is an important part of the Yangtze River's golden waterway, and under the combined effect of natural and human factors, the water and sediment conditions in this section has changed to some extent recently. The trend of runoff and sediment, mutability and cyclic change characteristics of the Yibin to Chongqing section of the Yangtze River are analyzed, based on the prototype observation data of runoff and suspended sediment transport from 1956 to 2020 at the Zhutuo and Cuntan stations of the Yangtze River (abbreviated as two stations). The results show that: 1) The runoff at Zhutuo station shows an increasing trend, the runoff at Cuntan station shows a decreasing trend, but neither is significant. The sediment load at both stations show an unusually significant decreasing trend. 2) Runoff and sediment load of the two stations have mutation characteristics, runoff mutation occurs from 1960 to 1969, and runoff mutation also exists since 2000, and the mutation of sediment load mainly occurs from 2000 to now. 3) Runoff at Zhutuo station has the most drastic cyclic oscillations under the 28 years time scale. The average cycle of runoff change is about 19 years,

收稿日期: 2024-03-25

*基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究项目 (cstc2017jcyjAX0278)

作者简介: 郑沛 (1999—), 男, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。

通信作者: 钟亮 (1980—), 男, 博士, 教授, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: zlcqjtu@163.com

which is equivalent to experiencing the conversion of 3.5 water-abundance periods and dry periods. The sand content shows obvious cyclicity under the 93 years time scale, and the average cycle of runoff change is about 57 years. In the sequence of runoff at Cuntan station, the cyclic changes are more obvious under the time scales of 14, 28, and 47 years, and the main cycle of the change of the sediment load at Cuntan station is about 93 years.

Keywords: upper Yangtze River; runoff; sediment load; trend; mutability; cyclicity; change characteristics

河流来水来沙情况称为水沙情势^[1], 水沙情势变化对河流物质输移、河床演变和生物群落演替等影响显著, 研究河流水沙情势变化特征对河流开发利用及生态保护等具有重要意义^[2]。长江是世界第三长河, 全长约 6 300 km; 长江干流从江源至宜昌为上游, 河长 4 510 km。长江上游宜宾至重庆河段长约 384 km, 是沟通西南三省一市与长江中下游及沿海各省市的重要黄金水道^[3]。近年来, 受上游水电梯级开发、水库蓄水拦沙、水土保持工程的影响, 长江上游宜宾至重庆河段水沙情势发生了较大变化, 受到水利水运工程研究的广泛关注。

河流水沙情势变化特征可采用趋势性、突变性和周期性进行描述, 目前, 国内外学者对水沙情势变化特征开展了一些研究。在趋势性方面, Memarian et al.^[4]、Lu et al.^[5]通过 Mann-Kendall 趋势检验法对研究河段的水沙变化趋势及原因进行分析, 获得了河流径流量及输沙率的变化特征和影响因素; 万家全^[6]采用 Mann-Kendall 检验法、5 年滑动检验法等, 得出了西江流域干流年径流量和年输沙量的变化规律。在突变性方面, 丁晶^[7]进行洪水时间序列干扰点分析时, 提出了有序聚类分析法; 张敬平等^[8]等采用传统的有序聚类分析法对漳泽水库站天然年径流序列和年降水量进行分析, 得到突变点; 刘茜等^[9]对江河水沙变化突变性分析方法进行比较, 认为有序聚类分析法最适用于江河水沙突变性研究。在周期性方面, 张曦泽等^[10]探讨了气候变化和人类活动引起的水沙变化, 利用小波分析法分析水沙周期性特征; Chen^[11]、Zhou et al.^[12]、Liu et al.^[13]、Guo et al.^[14]均采用 Morlet 连续小波变换对水文站资料进行分析, 获得了水沙变化周期性特征, 目前江河水沙

情势的周期性特征分析多采用小波分析法, 该方法可获取某些特定情况下的大量信息, 且不会失去特定情况发生时间或它们如何变化的信息^[15]。

近年来, 受多种自然因素和人为因素综合作用的影响, 长江宜宾至重庆河段水沙条件发生了较大变化, 并呈现许多新的特点, 河道输沙量明显减少, 但目前针对河流径流量与输沙量变化规律的系统性研究尚不充分。为此, 本文以朱沱站、寸滩站 1956—2020 年径流量和悬移质输沙量原型观测资料为基础, 分析长江宜宾至重庆河段的水沙趋势性、突变性和周期性变化特征, 研究成果旨在为该河段河床演变预测及航道工程建设提供参考。

1 资料与方法

1.1 水沙资料

长江上游宜宾至重庆河段流域面积约 16.43 万 km², 占长江流域总面积的 10% 左右。水文控制测站包括朱沱站和寸滩站 (简称“两站”), 其中朱沱站是该河段的上游进口站, 寸滩站是该河段的下游出口站。长江朱沱站位于重庆市永川区朱沱镇, 寸滩站上游约 154 km, 控制流域面积 69.47 万 km²; 长江寸滩站位于重庆市主城区嘉陵江与长江汇合口下游 7 km 处, 控制流域面积 86.66 万 km², 是三峡水库的入库控制站, 控制着雅砻江、岷江、沱江、嘉陵江及长江上游干流的来水。本文以两站 1956—2020 年的日流量和日悬移质含沙量原型观测资料为基础, 该时段大部分数据资料完整, 极少数年份日期缺测。水文年计算时段选当年 4 月 1 日—翌年 3 月 31 日, 本文所有年份均指水文年, 共 64 个, 两站年径流量及年输沙量变化见图 1。

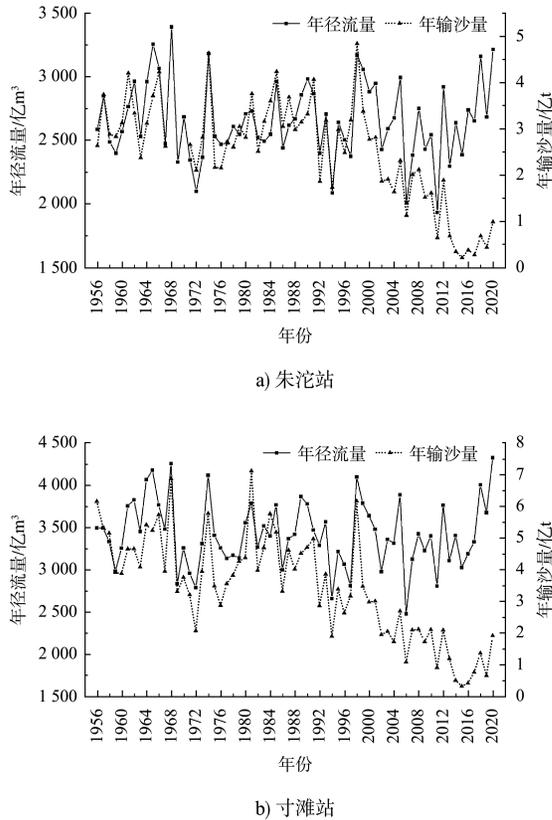


图 1 年径流量及年输沙量变化
Fig. 1 Annual runoff and sediment load change

1.2 分析方法

1.2.1 Mann-Kendall 趋势检验法

检验 Mann-Kendall 统计量(也称 S 值)计算公式为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_n 为时间因子, $i, j \leq n$ 。

标准化后的检验统计量 Z 为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & (S>0) \\ 0 & (S=0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & (S<0) \end{cases} \quad (2)$$

给定置信水平 α , 当 $|Z| < Z_{1-\alpha/2}$ 时, 说明时间序列未通过趋势检验, 变化趋势不显著; 当 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ 时, 说明时间系列数据通过趋势检验, 变化趋势显著。Z>0 表示上升, Z<0 表示下降。

1.2.2 有序聚类分析法

有序聚类分析法计算公式为:

$$V_\tau = \sum_{\tau} (\alpha_i - \bar{\alpha})^2 \quad (3)$$

$$V_{n-\tau} = \sum_{n-\tau} (\alpha_i - \bar{\alpha}_{n-\tau})^2 \quad (4)$$

$$S_n(\tau) = V_\tau + V_{n-\tau} \quad (5)$$

式中: V_τ 为干扰点 τ 前的离差平方和; $V_{n-\tau}$ 为 τ 后的离差平方和; α_i 为水文序列; $\bar{\alpha}$ 为 τ 前序列的均值; $\bar{\alpha}_{n-\tau}$ 为 τ 后序列的均值; $S_n(\tau)$ 为总离差平方和; n 为序列长度。

当 $S_n^*(\tau) = \min[S_n(\tau)]$ 时, τ 为突变点, 可以突变点为界进行二级分割。

1.2.3 Morlet 小波分析法

小波函数 $\psi(t) \in L^2(R)$ 满足:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (6)$$

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in R) \quad (7)$$

式中: $\psi(t)$ 为基小波函数; $\psi_{a,b}(t)$ 为子小波函数; a 为尺度因子; b 为平移因子。

本文采用 Morlet 小波形式:

$$\psi(t) = e^{ict} e^{-t^2/2} \quad (8)$$

$f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (9)$$

式中: e^{ict} 为傅里叶变换的一个特殊情况, 其中 i 为虚数单位, $c=6.2$; $W_f(a,b)$ 为小波变换系数; $f(t)$ 为平方可积函数; t 为时间变量。

离散小波变换形式:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \psi\left(\frac{\Delta t - b}{a}\right) \quad (10)$$

式中: $f(k\Delta t)$ 为离散数列, 其中 $k=1, 2, \dots, N$; Δt 为样本时间间隔。

小波方差:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a,b)|^2 db \quad (11)$$

2 结果与讨论

2.1 趋势性特征

朱沱站和寸滩站的水沙趋势性检验结果见图 2。

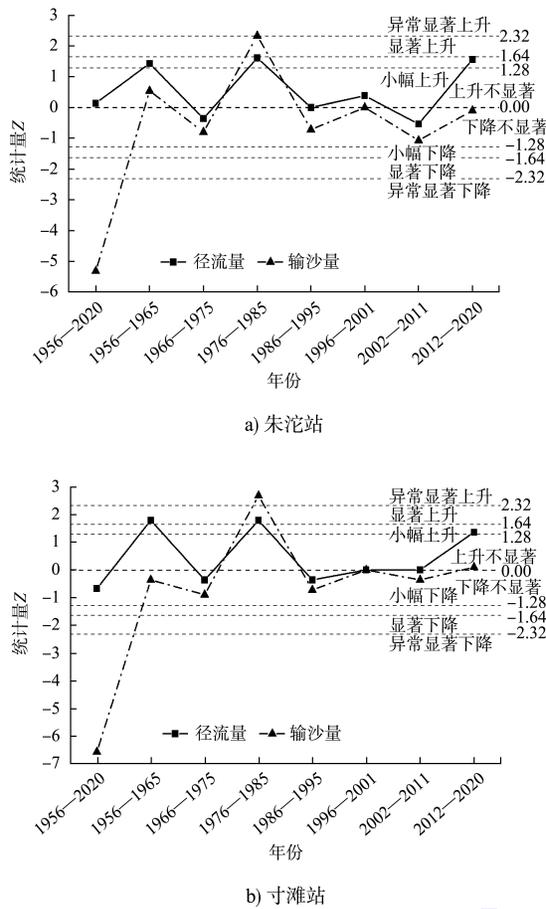


图 2 水沙趋势性检验结果

Fig. 2 Trend test results of water and sediment

2.1.1 径流量

1956—2020 年，多年径流量的统计值为 0.14，小于 $\alpha=0.10$ 时的临界值 1.28，表示呈上升趋势，但未通过 90% 的显著性检验。

朱沱站大部分时段的 Mann-Kendall 统计值大于 0，呈上升趋势，1966—1975 年与 2002—2011 年的 Mann-Kendall 统计值为负值，且绝对值小于 1.28，呈下降趋势但不显著。向家坝成库后，2012—2020 年径流量的统计值为 1.56，小于 1.64，大于 1.28，表示呈上升趋势，通过了 90% 的显著性检验，但未通过 95% 的显著性检验，因此，朱沱站 2012—2020 年径流量为小幅上升趋势。

寸滩站 1956—2020 年径流量的统计值为 -0.67，绝对值小于 $\alpha=0.10$ 时的临界值 1.28，表示呈下降趋势，但未通过 90% 的显著性检验，寸滩站 1956—2020 年径流量呈下降趋势但不显著。寸滩站 1956—2020 年内各时段径流量的趋势情况与朱

沱站类似，1956—1965、1976—1985 年的 Mann-Kendall 统计值均大于 1.64，小于 2.32，未通过 99% 的显著性检验，朱沱站该时段的年径流量呈显著上升趋势。向家坝成库后 2012—2020 年内径流量的统计值为 1.65，在此时段年内径流量呈上升趋势且通过 95% 的显著性检验，因此，寸滩站 2012—2020 年内径流量呈显著上升趋势。

2.1.2 输沙量

朱沱站多年输沙量的统计值为 -5.32，绝对值大于 $\alpha=0.01$ 时的临界值 2.32，表示呈下降趋势，且通过 99% 的显著性检验，朱沱站 1956—2020 年输沙量为异常显著下降趋势。根据朱沱站各时段年输沙量序列的趋势，发现在 2012 年向家坝成库以前，各时段的上升下降趋势分布较平均，且在 1976—1985 年，朱沱站输沙量的 Mann-Kendall 统计值为 2.33，大于 $\alpha=0.01$ 时的临界值 2.32，通过了 99% 的显著性检验，而在向家坝成库后的 2012—2020 年，朱沱站年输沙量呈下降但不显著趋势。由此可见，向家坝水电站运行后，大大影响了朱沱站的年输沙量情况，使该站年输沙量继续下降但慢慢趋于平稳。

寸滩站多年输沙量统计值为 -6.56，绝对值大于 $\alpha=0.01$ 时的临界值 2.32，呈下降趋势且通过 99% 的显著性检验，寸滩站 1956—2020 年输沙量为异常显著下降趋势。寸滩站在 2012 年向家坝成库以前，各时段以下降趋势为主，但下降幅度较轻，而在 1976—1985 年时段，寸滩站输沙量增加，且通过了 99% 的显著性检验。在 2012—2020 年，寸滩站年输沙量呈上升但不显著趋势，表示输沙量虽略有增加，但增加量较小，仍趋于平稳。由此可见，向家坝水电站运行后，对于寸滩水文站的年输沙情况起到了改善作用，使该站年输沙量慢慢趋于平稳。

2.2 突变性特征

2.2.1 径流量

图 3 为朱沱站和寸滩站的径流量突变性计算结果。分析表明：1) 朱沱站 2017 年径流量离差平方和 $S_n(\tau)$ 有最小值，即径流量在 2017 年出现

突变点, 因此, 将 1956—2017 年划分为突变前期, 将 2018—2020 年划分为突变后期, 进行二级聚类分析; 突变前期得到突变点为 1968 年和 2005 年, 突变后期的时段较短, 且整体 $S_n(\tau)$ 变化不大, 突变点不明显, 因此径流量在 2017 年处为一级突变点, 二级突变点为 1968 年和 2005 年。2) 寸滩站 2017 年径流量 $S_n(\tau)$ 有最小值, 将 1956—2017 年划分为突变前期, 2018—2020 年划分为突变后期, 突变前期得到突变点为 1968 年, 突变后期时段较短且整体 $S_n(\tau)$ 变化不大, 突变点不明显, 因此与朱沱站类似, 径流量在 2017 年处为一级突变点, 二级突变点为 1968 年。

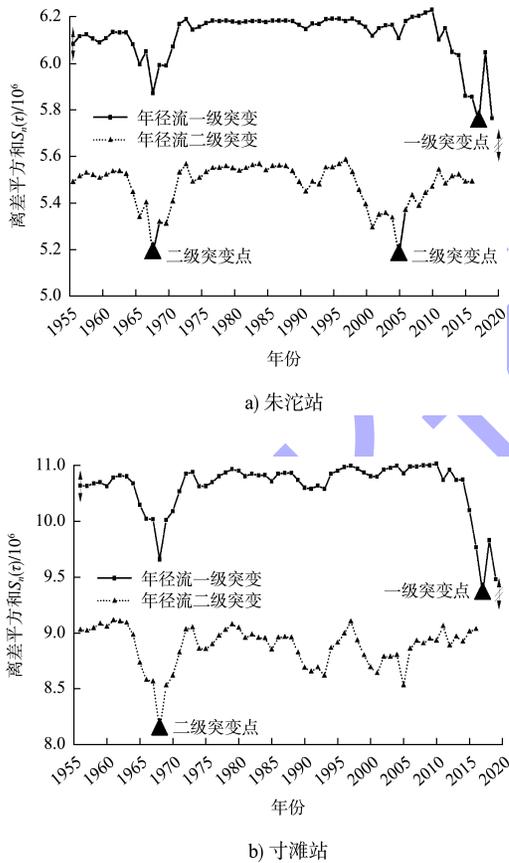


图 3 径流量突变性计算结果

Fig. 3 Calculation results of runoff mutability

2.2.2 输沙量

图 4 为朱沱站和寸滩站的输沙量突变性计算结果。可以看出: 1) 朱沱站在 2001 年时输沙量 $S_n(\tau)$ 最小, 朱沱站输沙量在 2001 年出现突变点, 以 2001 年为界划分突变前期、突变后期, 进行二级聚类分析; 在 1956—2001 年的突变前期发现无

明显突变点, 突变后期 2012 年 $S_n(\tau)$ 最小, 因此输沙量在 2001 年处为一级突变点, 二级突变点为 2012 年。2) 寸滩站输沙量在 2001 年存在突变点, 将 1956—2001 年划分为突变前期, 将 2002—2020 年划分为突变后期, 进行二级聚类分析; 在突变前期无明显突变点, 突变后期中 2012 年 $S_n(\tau)$ 最小, 因此输沙量在 2001 年处为一级突变点, 二级突变点为 2012 年。

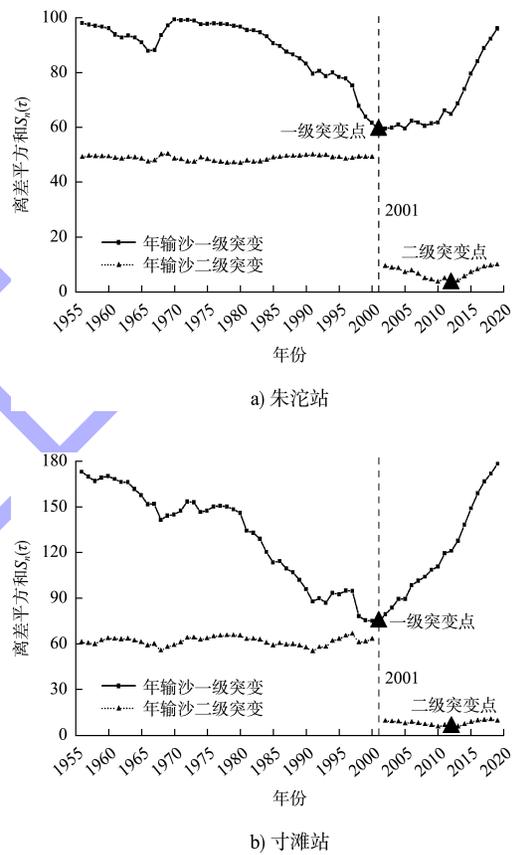


图 4 输沙量突变性计算结果

Fig. 4 Calculation results of sediment load mutability

2.3 周期性特征

2.3.1 径流量

图 5~7 为朱沱站和寸滩站的径流量周期性计算结果。结果表明:

1) 朱沱站 1956—2020 年径流量的小波方差见图 5a), 7、16、28、39 a 是方差曲线上 4 个较大的极值点, 序列的主要周期分别与这 4 个时间尺度对应, 小波方差最大极值点在 28 a 尺度下; 小波方差曲线中, 点极值越大对应的时间尺度下震荡越强烈, 序列变化的主周期与该尺度对应,

因此，28 a 尺度下的周期震荡最剧烈，周期性变化最明显，是该径流序列的首要主周期，又称第 1 主周期，7、16、39 a 为次要主周期，其中 39 a 为第 2 主周期，见图 6a)。小波系数实部图见图 7a)，小波系数 $W_f(a,b) > 0$ 表示径流量较多， $W_f(a,b) < 0$ 表示径流量较少；朱沱站径流量在 23~33 a 处震荡最强烈，周期性表现最突出，且具有全域性，光线明暗相交替出现，周期中心约位于 28 a；在 35~45 a 处，周期性表现也较为突出，周期中心约位于 39 a，但震荡能量相对较弱；13~20 a 处也表现出一定的周期性，周期中心约位于 16 a，这与径流量小波方差的曲线变化相对应；在 28 a 时间尺度下，流域径流变化的平均周期约为 19 a，相当于经历了 3.5 个丰水期和枯水期的转换；而

在 39 a 时间尺度下，流域的平均周期约为 28 a，相当于经历了 2.5 个丰水期和枯水期的转换。

2) 在寸滩站年径流量小波方差曲线见图 5b)，3 个较大的极值点中，28 a 尺度下方差最大，因此在 28 a 尺度下的周期性变化最明显，是该径流序列的第 1 主周期，14、47 a 为次要主周期，其中 14 a 为第 2 主周期见图 6b)；在小波系数实部图 7b) 中，20~35 a 周期性表现最突出，周期中心约位于 28 a；在 10~17 a 处，周期中心约位于 14 a，具有相对较弱的震荡能量；在 28 a 时间尺度上，流域径流变化的平均周期约为 19 a，大约经历了 3.5 个丰-枯转换期；而在 14 a 时间尺度时，流域的平均周期约为 9 a。

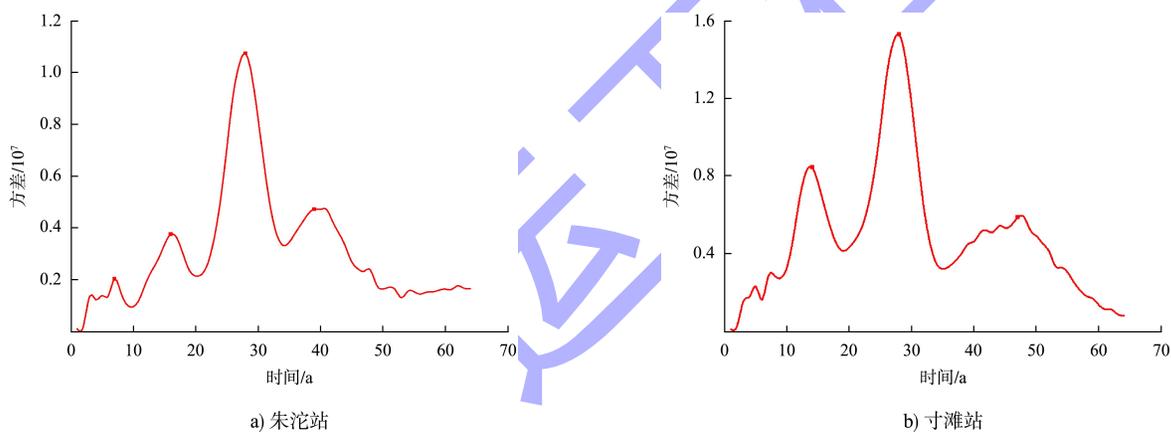


图 5 径流量方差
Fig. 5 Variance of runoff

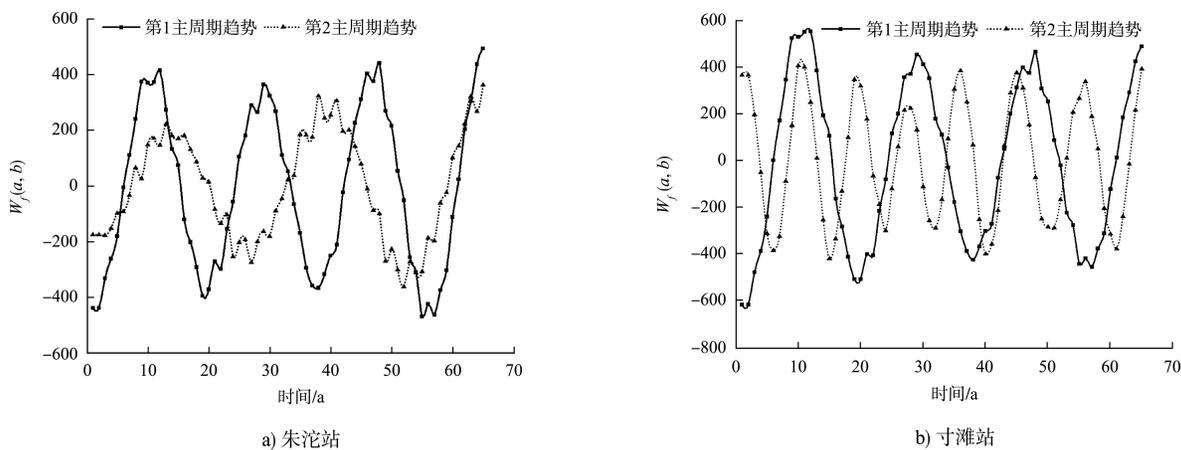


图 6 径流量主周期趋势
Fig. 6 Primary period trend of runoff

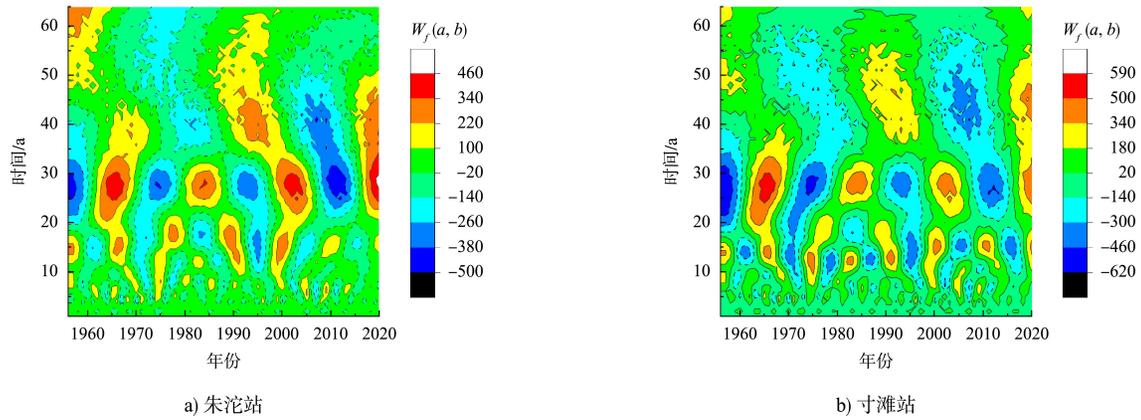


图 7 径流量实部
Fig. 7 Real part of runoff

2.3.2 输沙量

图 8~10 为朱沱站和寸滩站的输沙量周期性计算结果。可以看出: 1) 朱沱站 1956—2020 年输沙量的小波方差见图 8a), 曲线上有 2 个极值点, 分别为 65、93 a 处对应的主要周期, 其中 93 a 尺度处小波方差极值点最大, 是该输沙序列的首要主周期, 又称第 1 主周期, 65 a 为次要主周期, 见图 9a)。2) 朱沱站年输沙量小波系数实部见图 10a), 85~105 a 处周期性表现最明显, 光线明暗相交替出现, 周期中心约位于 93 a; 55~70 a 的周期性表现也较为突出, 周期中心约位于 65 a, 但

震荡能量相对较弱, 这与输沙量小波方差图的曲线变化相对应; 在 93 a 时间尺度上, 流域径流变化的平均周期约为 57 a; 而在 65 a 时间尺度时, 流域的平均周期约为 41 a, 大约经历 1.5 个丰-枯变化。3) 寸滩站 1956—2020 年输沙量小波方差见图 8b), 有 1 个较大的极值点, 在 93 a 处对应的主要周期, 93 a 为该输沙序列的第 1 主周期见图 9b); 年输沙量小波系数实部见图 10b), 80~105 a 处震荡最为强烈, 周期性表现最为突出, 周期中心约位于 93 a, 与输沙量小波方差图的曲线变化相对应; 93 a 主周期条件下的平均周期约为 60 a。

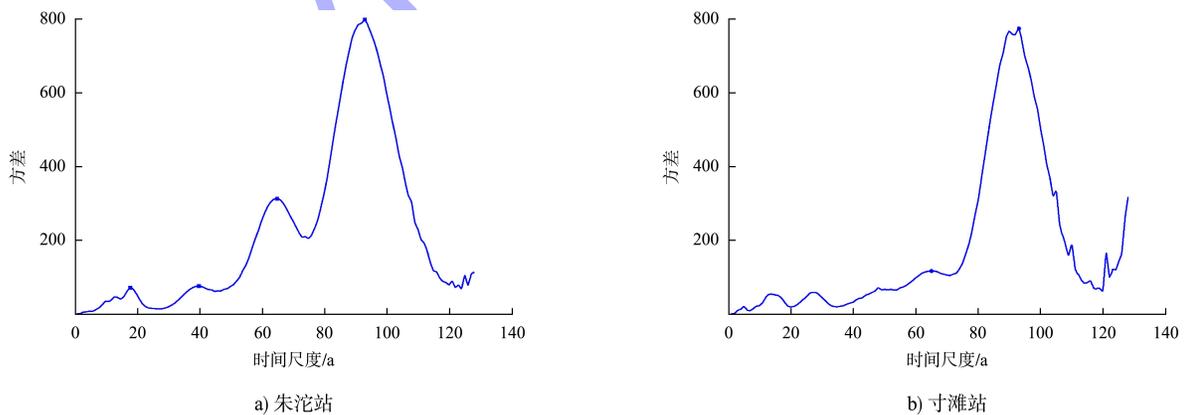


图 8 输沙量方差
Fig. 8 Variance of sediment load

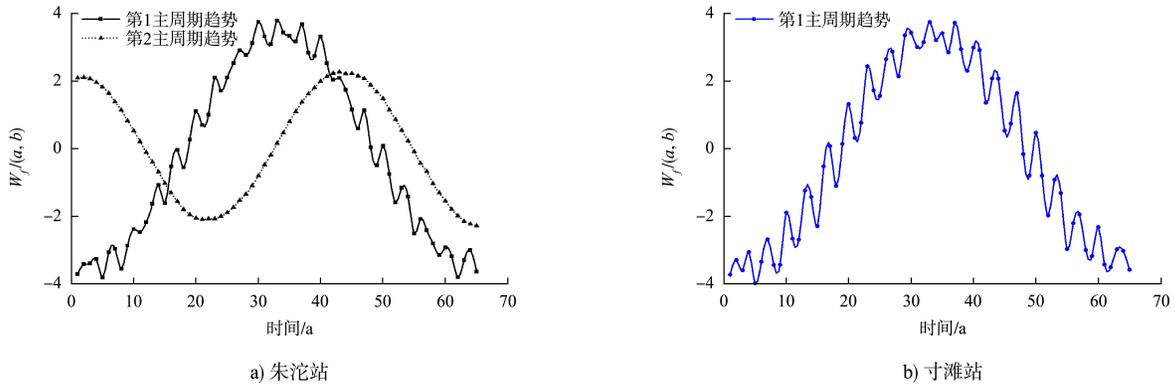


图 9 输沙量主周期趋势
Fig. 9 Primary period trend of sediment load

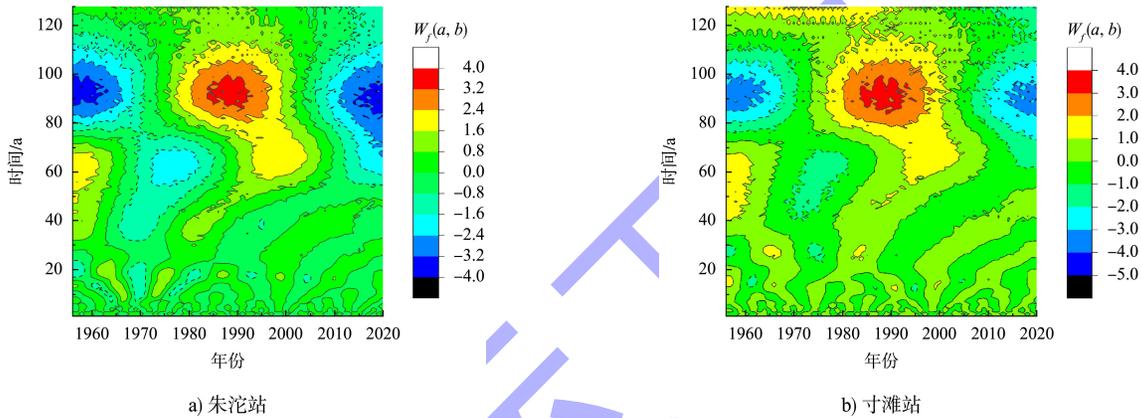


图 10 输沙量实部
Fig. 10 Real part of sediment load

3 结论

1) 朱沱站 1956—2020 年径流量呈上升趋势，但未通过 90% 的显著性检验，为上升但不显著趋势，年输沙量为异常显著下降趋势；寸滩站 1956—2020 年径流量未通过 90% 的显著性检验，呈下降但不显著趋势，寸滩站年输沙量呈下降趋势，且通过 99% 的显著性检验。

2) 各水文站径流量和输沙量均出现突变；径流量突变发生于 1960—1969 年，2000 年以来也存在径流量突变情况；而输沙量的突变主要发生在 2000 年至今。

3) 朱沱站年径流量以 28 a 的时间尺度显示最剧烈的周期性波动，流域径流变化平均每 19 a 经历约 3.5 次丰水期和枯水期的转换；而年输沙量在 93 a 的时间尺度下呈现出最为显著的周期性，

流域径流变化平均每 57 a 出现一次完整的循环。在寸滩站径流量序列中，14、28、47 a 时间尺度下周期性变化最明显，93 a 处对应寸滩站输沙量的主要周期。

参考文献:

[1] KALYUZHNYI I L, ROMANYUK K D. Variations of the water regime of bogs of northern and northwestern Russia under influence of climatic factors [J]. Russian meteorology and hydrology, 2010, 35(7): 490-499.

[2] DU Y L, PENG W Q, WANG S Y, et al. Modeling of water quality evolution and response with the hydrological regime changes in Poyang Lake [J]. Environmental earth sciences, 2018, 77(7): 1-16.

[3] LI P J, XUE J, XIA W, et al. Health Assessment of the Waterway from Chongqing to Yibin in the Upper Yangtze

- River, China[J]. Water, 2022, 14(19): 3007.
- [4] MEMARIAN H, BLALSUNDRAM S K, TALIB J B, et al. Trend analysis of water discharge and sediment load during the past three decades of development in the Langat basin, Malaysia[J]. Hydrological sciences journal, 2012, 57(6): 1207-1222.
- [5] LU X R, WANG X L, YANG C, et al. Changes and driving forces of the water-sediment relationship in the middle reaches of the Hanjiang River [J]. Water, 2018, 10(7): 887.
- [6] 万家全. 西江流域干流近年水沙变化特征[J]. 水运工程, 2020(6): 120-129.
- [7] 丁晶. 洪水时间序列干扰点的统计推估[J]. 武汉水利电力学院学报, 1986(5): 36-41.
- [8] 张敬平, 黄强, 赵雪花. 漳泽水库水文序列突变分析方法比较[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 837-844.
- [9] 刘茜, 王延贵. 江河水沙变化突变性与周期性分析方法及比较[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(2): 17-23.
- [10] 张曦泽, 杨丽虎, 宋献方. 黄河上游近 60 年水沙变化特征及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2024, 36(2): 602-621.
- [11] CHEN Y M. Periodicity and multi-scale analysis of runoff and sediment load in the wulanghe river, Jinsha river [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, Bristol, 2018, 108(3): 032067.
- [12] ZHOU H Y, WANG Z L, WU X S, et al. Spatiotemporal variation of annual runoff and sediment load in the Pearl River during 1953—2017 [J]. Sustainability, 2019, 11(18): 5007.
- [13] LIU F, CHEN S L, PENG J, et al. Temporal variability of water discharge and sediment load of the Yellow River into the sea during 1950—2008 [J]. Journal of geographical sciences, 2011, 21(6): 1047-1061.
- [14] GUO W X, JIAO X Y, HUANG L T, et al. Analysis of sediment variation and influencing factors in the upper Yangtze River in the past 50 years, China [J]. Water supply, 2022, 22(5): 5012-5027.
- [15] BENSON N C, DAGGETT V. Wavelet analysis of protein motion [J]. International journal of wavelets, multiresolution and information processing, 2012, 10(4): 1250040.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 60 页)

参考文献:

- [1] 杨云兰, 司银云, 王汝凯. 基于功能的深水岛式斜坡式防波堤方案设计[J]. 中国港湾建设, 2013, 33(6): 18-21.
- [2] 王君辉, 姜宁林. 涌浪作用下岛式防波堤堤顶高程设计[J]. 水运工程, 2019(1): 84-88.
- [3] 查恩尧, 王汝凯, 韩国军, 等. 中委广东石化项目原油码头工程平面设计创新[J]. 水运工程, 2014(2): 72-77.
- [4] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港水文规范: JTS 145-2—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015(2022 版)[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
- [7] 杨正己, 贺辉华, 潘少华. 波浪作用下抛石堤的稳定性及消浪特性[J]. 水利水运科学研究, 1981(3): 34-45.
- [8] VAN DER MEER J W. Data on wave transmission due to overtopping: report H986 [R]. Delft: Delft University of Technology, 1990.
- [9] D'ANGREMOND K, VAN DER MEER J W, DE JONG R J. Wave transmission at low-crested structures[C]//EDGE B L. Coastal engineering 1996. Reston: American Society of Civil Engineers, 1996: 2418-2427.
- [10] EurOtop. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures[S]. London: Environment Agency, 2018.

(本文编辑 王璁)