

改进双累积曲线法分析长江上游水沙关系累积变异规律

肖怡慧^{1,2}, 金中武¹, 张国帅¹, 金光球^{2,3}, 李志晶¹

(1. 长江科学院河流研究所, 武汉 430010; 2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098;

3. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098)

摘 要: [目的] 大型水库群拦沙条件下, 长江上游干流水沙关系出现累积变异, 年径流量不存在显著变化而年输沙量持续减少。[方法] 基于 1950—2022 年长江上游主要干支流年径流量、年输沙量观测值, 采用改进的双累积曲线法, 计算双累积曲线偏差序列并引入尺度缩放因子, 分析长江上游流域水沙累积变异规律。[结果] 长江上游水沙关系分别在 1985 年、1998 年、2002 年和 2013 年发生突变, 年均含沙量由 1.20 kg/m³ 依次下降为 1.02、0.77、0.12、0.03 kg/m³。结合长江上游大型水库群时空分布, 分析对长江上游水沙关系存在明显调控作用的大型水库发现, 长江上游发生 4 次水沙关系突变分别对应宝珠寺和乌江渡水库、二滩和三峡水库、向家坝水库、溪洛渡水库的蓄水运用, 由此导致长江上游年均输沙量减少 5.15 亿 t, 上游流域减沙率为 97.17%。[结论] 改进双累积曲线法可有效量化水沙关系累积变异, 识别多时间尺度突变点。长江上游水沙关系突变受水库群拦沙主导, 且支流与干流水库的时空叠加效应加剧了累积变异。研究成果可为流域水沙调控提供理论依据。

关键词: 长江上游; 泥沙; 改进双累积曲线法; 水沙关系突变; 累积变异

中图分类号: TV147

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0097-08

Analysis of Cumulative Mutations of the Relationship Between Annual Runoff and Sediment Load in the Upper Yangtze River Basin Based on Improved Double Mass Curve Method

XIAO Yihui^{1,2}, JIN Zhongwu¹, ZHANG Guoshuai¹, JIN Guangqiu^{2,3}, LI Zhijing¹

(1. River Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: [Objective] The relationship between annual runoff and sediment load in the Upper Yangtze River basin (UYRB) had a significant change under the operation of large reservoirs. There was no obvious variation in the annual runoff processes in the UYRB, while the annual sediment load decreased greatly. [Methods] Based on the annual runoff and sediment load observation series in the mainstream and main tributaries in the UYRB during 1950—2022, improved double mass curve method was utilized to calculate the deviation sequences of the double mass curves and introduce the scaling factors, thereby analyzing the cumulative mutation characteristics of the relationship between annual runoff and sediment load. [Results] The relationship between annual runoff and sediment load in the UYRB had significantly changed in 1985, 1998, 2002 and 2013, respectively. As a result, the average sediment content in the UYRB decreased from 1.20 kg/m³ to 1.02, 0.77, 0.12, 0.03 kg/m³, respectively. Combined with the distribution of large reservoirs in the river network, the four mutations in the relationship between annual runoff and sediment load in the UYRB were caused by the operation of Baozhusi

收稿日期: 2024-11-03

修回日期: 2024-12-24

录用日期: 2025-01-01

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-03-04

资助项目: 国家自然科学基金重点项目 (U2240226)

第一作者: 肖怡慧 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水力及河流动力研究。E-mail: 15347259885@163.com

通信作者: 金中武 (1976—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事河流泥沙及治河工程研究。E-mail: zhongwujin@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

Reservoir and Wujiangdu Hydropower Station, Ertan Reservoir, Three Gorges Dam, Xiangjiaba and Xiluodu Reservoir. Operation of large reservoirs led to a reduction of annual sediment load by 515 million tons in the upstream, with a 97.17% sediment reduction rate in the upstream. [Conclusion] Improved double mass curve method can effectively quantify the cumulative change in the relationship between runoff and sediment load and identify mutation points across multiple temporal scales. The mutations in the relationship between annual runoff and sediment load in the UYRB were predominantly driven by sediment interception from reservoir groups, while the spatiotemporal superposition effects of reservoirs in both tributaries and the mainstream further intensified the cumulative variations. The research findings can provide a theoretical basis for regulation of runoff and sediment load in the basin.

Keywords: the Upper Yangtze River basin; sediment; improved double mass curve method; mutations in the relationship between runoff and sediment load; cumulative mutations

Received: 2024-11-03

Revised: 2024-12-24

Accepted: 2025-01-01

Online(www.cnki.net): 2025-03-04

近 50 年来,长江上游流域众多大型水库相继建成运用,水库群拦沙导致的流域减沙效应引发国内外广泛关注^[1-3]。天然条件下长江上游流域存在显著的水沙异源现象,流域年径流量 70% 来自向家坝至三峡大坝区间水流补给,而年输沙量 50% 来自金沙江。随着长江上游水库群规模持续增加,上游流域输沙量逐步减小,尤其三峡水库建成后,宜昌水文站年输沙量锐减 90%^[4-7]。已有研究^[7-8]表明,大型水库群拦沙是长江上游水沙关系突变的主要原因,但是水库群总库容动态变化条件下,流域水沙关系累积变异规律仍不明晰。研究长江上游水沙关系累积变异规律,不仅能够揭示水库群库容增加对流域水沙关系突变的影响,还可以明晰长江上游流域减沙效应的关键调节水库。

众多学者采用趋势检验分析方法,分析流域水沙变化规律,其中广泛应用的方法为 MK 突变检验法、R/S 分析法、Pettite 检验法等^[8-10],这些方法均是用于分析年径流量、年输沙量的单变量变化规律,无法反映流域水沙变化一致性变化规律。穆兴民等^[11]利用双累积曲线法分析流域水沙关系突变特征,通过分析水沙累积曲线斜率拐点,表征流域水沙关系突变年份。该方法能够有效表征水库导致的水沙关系突变,主要体现为径流不发生显著突变,而输沙量锐减,水沙双累积曲线斜率明显减小。目前该方法广泛应用于水沙关系突变检验,但是针对流域水沙关系累积变异情况,仍存在不足:1)水沙双累积曲线斜率拐点选取主要依据工程经验,缺少量化基准;2)水沙关系累积变异条件下,相邻较近的突变年份难以区分;3)水沙关系急剧变化年份对变异幅度较小的年份存在遮蔽作用。因此,传统双累积曲线法无法准确识别长江上游水沙关系累积变异规律^[12-13]。

依据双累积曲线法的理论基础,计算流域水沙双累积曲线的偏差序列,并引入尺度缩放因子,用以改进双累积曲线法对流域水沙关系累积变异规律的识别精度^[14-15]。研究基于 1950—2022 年长江上游主要干支流年径流量、年输沙量观测值,运用改进的双累积曲线法,分析大型水库群持续建设条件下,长江上游流域水沙关系累积变异规律。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

长江上游流域(24°46′00″~35°75′00″N, 90°54′00″~111°46′00″E)位于中国西南地区,水流落差大,水能资源丰富。长江上游干流长度约 4 500 km,流域面积近 1.08×10^6 km²,占长江流域总面积的 56%,三峡水库几乎控制整个长江上游区域(图 1)。金沙江、嘉陵江、岷江、横江、乌江、沱江等河流是长江上游径流和泥沙的主要来源,地区分布上水沙异源现象明显,水沙关系不协调^[16]。

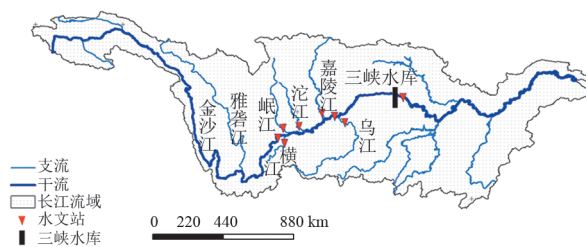


图 1 长江上游主要水文站

Fig. 1 Main hydrological stations in the Upper Yangtze River basin

为研究长江上游干支流水沙变化情况,本文收集 1950—2022 年金沙江向家坝站、岷江高场站、沱江富顺站、横江站、嘉陵江北碛站、乌江武隆站和长江干流宜昌站的径流量、输沙量等实测资料进行分析^[17]。水文站基本概况见表 1。

表 1 长江上游主要水文站概况

Table 1 Basic information of major hydrological stations in the Upper Yangtze River basin

河名	流域面积/ 万 km ²	水文站	出口水文站控制 流域面积/万 km ²
金沙江	47.32	向家坝站	45.86
岷江	17.59	高场站	13.54
沱江	2.78	富顺站	2.33
横江	1.50	横江站	1.48
嘉陵江	15.98	北碚站	15.67
乌江	8.79	武隆站	8.30
长江	108.12	宜昌站	100.55

1.2 研究方法

1.2.1 双累积曲线法理论基础 双累积曲线法是分析水沙变化,检验径流量及输沙量二者间一致性及其变化的一种方法。该方法通过对径流量、输沙量随时间变化的数据进行累加处理,有效地对随机过程进行滤波,减少随机噪声的干扰,从而更清晰地展现出被分析要素的趋势性特征,能够揭示某一要素是否发生趋势性变化,确定变化开始的时间点。通过建立径流量与输沙量的双累积曲线,可以深入分析河流含沙量的趋势性变化^[11-12]。

1.2.2 改进双累积曲线法 本文主要采用ZHANG等^[14-15]提出的改进双累积曲线方法,能够通过具体的量化指标找出水沙趋势突变的年份,有效解决双累积曲线法中多个突变点之间的相互遮蔽作用,提升方法的判断精度,准确识别长江上游水沙趋势突变点。本文对长江上游流域水沙变化趋势进行分析,主要步骤为:

首先计算同时段内流域径流量、输沙量随时间的连续累积值。

$$Q' = \sum_{i=1}^n Q_i \tag{1}$$

$$S' = \sum_{i=1}^n S_i \tag{2}$$

式中: Q' 为流域径流量的连续累积值,亿 m³; Q_i 为统计序列中第*i*年的流域径流量,亿 m³; n 为统计序列的样本数目; S' 为流域输沙量的连续累积值,亿 t; S_i 为统计序列中第*i*年的流域输沙量,亿 t。

分别以径流量、输沙量累积值为横轴、纵轴绘制双累积曲线。双累积曲线斜率代表流域内径流量与输沙量的比率关系。在研究流域水沙特性变化过程时,通常采用水沙量双累积曲线以识别水沙变化的关键转折点^[13]。当双累积曲线上偏时,相同径流量对应的输沙量增加;反之,当曲线下偏时,流域内径流输沙能力降低。

为分析流域水沙趋势是否发生突变,首先结合流域水沙累积值的极值建立线性回归,再基于水沙累积值样本与回归曲线的偏差分布,判断样本空间内流域水沙趋势变化特性。由于水沙连续累积值均为单调递增序列,极大值与极小值分别对应序列的两端,因此流域水沙累积值的线性回归表达为:

$$S'_i = a_0 Q'_i + S'_1 \tag{3}$$

$$a_0 = \frac{S'_n - S'_1}{Q'_n - Q'_1} \tag{4}$$

式中: S'_i 、 Q'_i 分别为输沙量、径流量累积值序列中第*i*个数值; a_0 为线性回归的斜率; S'_1 为输沙量累积值的初始值; n 为流域水沙序列的样本数目; Q'_1 为径流量累积值的初始值; S'_n 为输沙量累积值的末端值; Q'_n 为径流量累积值的末端值。

$$\lambda_i = S'_i - S'_1 - a_0 Q'_i \tag{5}$$

式中: λ_i 为第*i*个输沙量累积值与极值线性回归的偏差。

$$\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \tag{6}$$

式中: λ 为每年水沙累积值对应的偏差序列。

考虑到极端异常值对偏差分布的影响较大,根据累积值与回归曲线的偏差绝对值大小,定义尺度缩放因子对偏差序列进行均质化处理。

$$\lambda'_i = \lambda_i \eta_i \tag{7}$$

$$\eta_i = \begin{cases} \frac{1}{\ln(1 - \lambda_i)} & \lambda_i < 0 \\ 0 & \lambda_i = 0 \\ \frac{1}{\ln(1 + \lambda_i)} & \lambda_i > 0 \end{cases} \tag{8}$$

式中: λ'_i 为第*i*个偏差对应的均质化值; η_i 为偏差 λ_i 对应的尺度缩放因子。

由公式(8)可知,当偏差<0时,尺度缩放因子与偏差大小为正相关;偏差=0时,尺度缩放因子也为0;当偏差>0时,尺度缩放因子与偏差大小为负相关。因此当累积值越偏离极值回归曲线,尺度缩放因子越小。通过对极端异常值进行缩放,均质化的偏差序列能有效减少水沙波动对趋势判断的影响。运用公式(9)计算得到标准化的偏差序列。

$$\lambda' = \{\lambda'_1, \lambda'_2, \dots, \lambda'_n\} \tag{9}$$

式中: λ' 为每年对应水沙累积值的均质化偏差序列。

运用统计学*t*检验方法判断均质化偏差序列是否与0为中心的正态分布存在显著差异。当*t*检验得到的检验值*p*>0.05时,说明标准化偏差序列分布中心与0不存在显著差异,偏差分布于0左右两侧的有限边界内,水沙连续累积值与极值满足的线性关系基本吻合,双累积曲线不存在趋势变化;反之,检验

值 $p < 0.05$, 说明偏差分布显著偏离以 0 为中心的对称区间, 此时水沙连续累积值与极值满足的线性关系差异较大, 双累积曲线存在趋势变化。

为方便选取双累积曲线突变点, 同时消除不同变化趋势对偏差正负值的影响, 对偏差序列进行二次方处理, 将所有偏差转化为正值。

$$\lambda'' = \{\lambda_1'^2, \lambda_2'^2, \dots, \lambda_n'^2\} \quad (10)$$

式中: λ'' 为均质化偏差的二次方序列, λ'' 的极大值即对应双累积曲线突变点。

根据双累积曲线突变点位置, 可以将流域水沙趋势划分为自然基准期和响应期。为检验响应期内水沙趋势是否又发生变化, 应结合突变点以后的水沙序列, 重新运用改进的双累积曲线方法分析趋势变化, 直至所有的水沙趋势突变点被找出。

2 结果与分析

2.1 长江上游水沙变化过程

采用宜昌站实测径流量及输沙量作为三峡水库出库水沙总量, 1950—2022 年三峡出库(宜昌水文站)年水沙量变化过程见图 2。长江上游流域径流量总体呈周期性变化, 多年平均径流量为 4 316.405 亿 m^3 , 径流量最大值出现在 1954 年, 最小值位于 2006 年。流域的多年平均输沙量为 3.655 亿 t, 输沙量的最大值同样位于 1954 年, 最小值为 2017 年的 1.431 亿 t。年输沙量在 1998 年以后明显减少, 1998—2004 年长江上游流域年输沙量下降 99%。

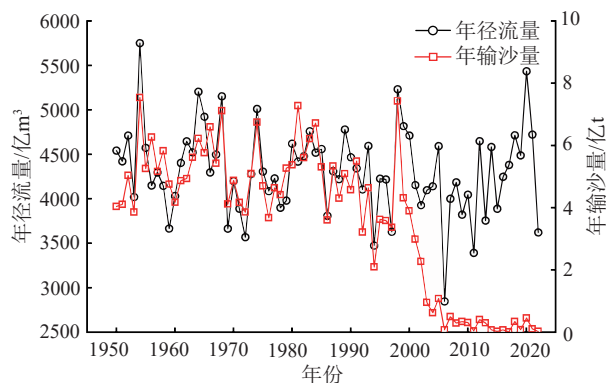


图 2 长江上游流域年径流量与年输沙量变化过程

Fig. 2 Changing processes of annual runoff and sediment load in the Upper Yangtze River basin

2.2 长江上游水沙关系突变特性

基于长江上游流域出口—宜昌站的径流量、输沙量绘制水沙量双累积曲线(图 3)。宜昌站年输沙量和年径流量的双累积曲线在 2002 年大幅度向流量轴偏转, 斜率减小, 即年输沙量减小, 2002 年前多年平均含沙量为 1.13 kg/m^3 , 2002 年后多年平均含沙量为 $6.55 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$, 减小幅度达 94.21%, 说明 2002 年为水沙关系变化的一个突变点。

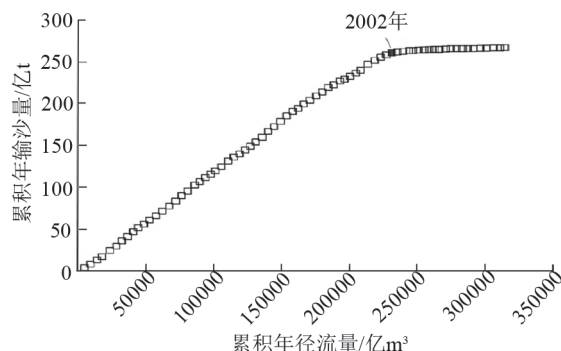


图 3 长江上游流域水沙双累积曲线

Fig. 3 Double mass curve of cumulative annual runoff and sediment load in the Upper Yangtze River basin

运用改进双累积曲线方法计算长江上游流域水沙累积值与极值线性回归的偏差与均质化偏差, 并分析二者随时间变化过程。径流量输沙量双累积曲线反映控制断面以上水沙变化情况, 曲线的转折对应水沙变化^[12]。绘制不同时间段的双累积曲线(图 4), 并判断转折点。1950—2022 年累积值偏差的分布范围为 6 624.64 亿 t, 均质化偏差平均值为 752.03 亿 t, 均质化偏差与偏差的总体变化趋势相同, 且能大幅削弱异常值对总体变化趋势的影响。通过 t 检验方法分析均质化方差分布特性, 检验值 $p < 0.05$, 说明均质化偏差分布中心与 0 存在显著差异, 双累积曲线发生趋势变化。

由改进双累积曲线方法中突变点选取准则可知, 均质化偏差序列的极大值即为流域水沙趋势突变点。图 4a 中均质化偏差对应平方序列的极大值均位于 2002 年, 表明 2002 年为长江上游流域的第 1 个水沙突变年份。1950—2002 年长江上游流域多年平均径流量为 4 367.47 亿 m^3 , 多年平均输沙量为 4.918 亿 t; 2003—2022 年多年平均径流量为 4 181.08 亿 m^3 , 多年平均输沙量为 0.31 亿 t。2002 年前后长江上游流域多年平均径流量发生不明显变化, 而多年平均输沙量降低 93.73%。

根据上文计算出长江上游流域的第 1 个水沙突变年份后, 利用改进的双累积曲线方法进一步确定 1950—2002 年、2003—2022 年双累积曲线是否存在趋势变化。首先以 1950 年长江上游水沙量为初始值, 计算得到流域在 1950—2002 年的累积值偏差及均质化偏差分布(图 4b), 累积值偏差及均质化偏差对应的极大值位置均为 1985 年, 因此 1985 年为长江上游流域水沙趋势变化的另一个突变点。再以 2002 年长江上游水沙量为初始值, 按上述步骤计算 2003—2022 年累积值偏差及均质化偏差(图 4c), 发现极大值在 2013 年的位置, 由此确定水沙趋势变化的第 3 个突变点。最后以 1985 年为初始年, 制作

1985—2002年的双累计曲线(图4d)发现,1998年为

第4个突变点。

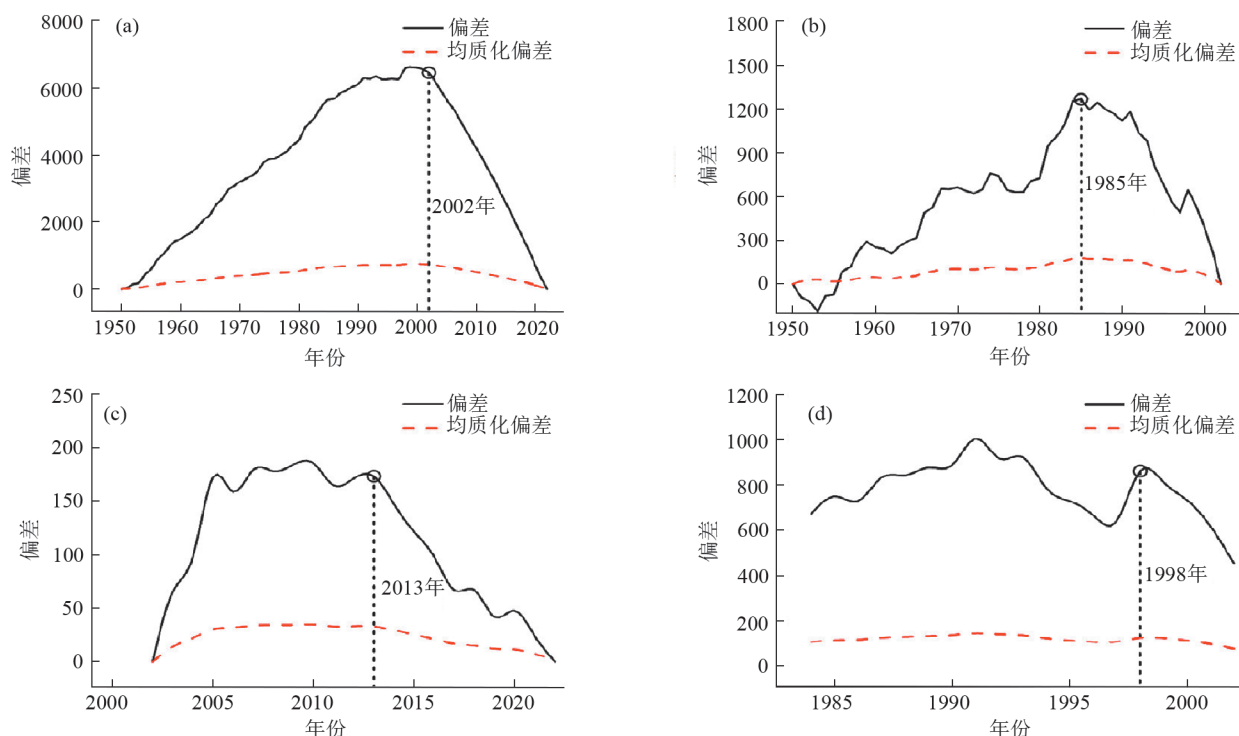


图4 长江上游流域累积值偏差及均质化偏差曲线

Fig.4 Cumulative deviation curve and homogenized deviation curve of the Upper Yangtze River basin

2.3 长江上游水沙分布变化规律

2.3.1 长江上游水库减沙效应 长江上游流域水沙趋势变化共存在4个突变点,分别为1985年、1998年、2002年和2013年,突变点位置与图2中长江上游水沙变化过程基本吻合。基于长江上游流域水沙趋势的突变年份,将流域水沙变化过程分为5个时期,分别为1950—1985年、1986—1998年、1999—2002年、2003—2013年和2014—2022年。对比5个时期内流域水沙变化特性(图5)发现,宜昌水文站,年径流量不发生明显趋势性变化,多年平均年径流量为3 978.00~4 403.25亿 m^3 ,多年输沙量呈递减趋势,多年平均年输沙量由5.30亿t依次减小为4.34亿、3.37亿、0.46亿、0.15亿t,2013年以后宜昌站年平均输沙量下降86.35%。

结合长江上游大型水库建设历程,分析流域水沙趋势突变与大型水库空间分布关系(图6)。1985年长江上游水沙关系变异,长江上游流域水库总库容由1956年的2.21亿 m^3 增加至1985年的85.26亿 m^3 ,年平均含沙量由1950—1985年的1.20 kg/m^3 减小至1986—1998年的1.02 kg/m^3 ,对应嘉陵江流域宝珠寺水库(25.50亿 m^3)、乌江流域乌江渡水库(23.00亿 m^3)的建设;1998年水库总库容增加至183.16亿 m^3 ,1999—2002年的年平均含沙量减小至0.77 kg/m^3 ,对应金沙江流域二滩水库(58.00亿 m^3)

的蓄水;2002年长江上游流域的含沙量大幅下降,水沙趋势发生突变^[18],2003—2013年的年平均含沙量减小至0.12 kg/m^3 ,年平均含沙量相较于上一时间段减少84.41%,水库总库容增加至276.31亿 m^3 ,对应三峡水库(393.00亿 m^3)的修建;2013年水库总库容增加至1 199.83亿 m^3 ,2014—2022年的年平均含沙量减小至0.03 kg/m^3 ,相较于上一时间段减少75.00%,对应向家坝水库(51.63亿 m^3)、溪洛渡水库(115.70亿 m^3)的初期蓄水。

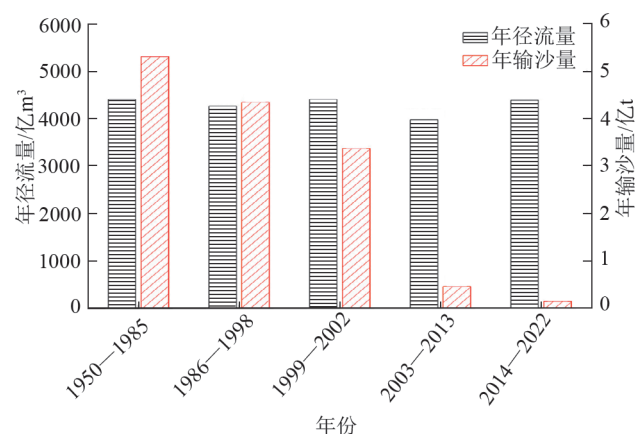


图5 不同时期长江上游水沙分布(宜昌站)

Fig.5 Distribution of annual runoff and sediment load in the Upper Yangtze River basin in different periods (Yichang Station)

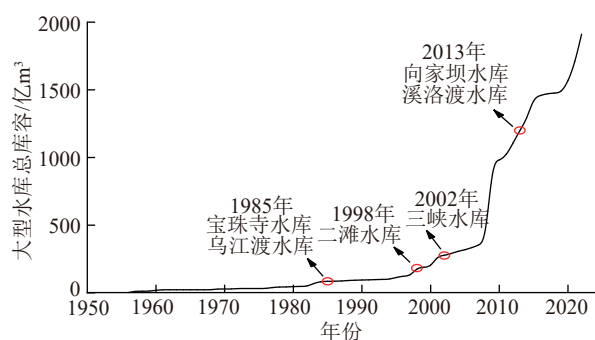


图 6 长江上游流域大型水库库容变化过程

Fig. 6 Changing processes of large reservoir capacity in the Upper Yangtze River basin

2.3.2 长江上游水沙时空分布变化 根据向家坝、高场、富顺、横江、北碚、武隆这6个水文站的实测资料,分析长江上游主要干支流年均径流量和输沙量变化(图7)。多年来各河流径流量相对稳定,长江上游流域年径流量最多的河流是金沙江,其次是岷江、嘉陵江和乌江,沱江与横江径流量相对较少。多数时间嘉陵江径流量大于乌江,但在1999—2002年嘉陵江的径流量出现减小,同期乌江径流量增大,导致嘉陵江径流量略小于乌江。

1985年之前,长江上游流域年输沙量最多的河流是金沙江,其次是嘉陵江。相较于径流量,嘉陵江的输沙量超过径流量更大的岷江。表明各支流汇入长江的径流量与输沙量并非呈正相关,支流汇入长江干流的

水沙输送不同步,存在异源、不平衡现象^[19]。

1986—1998年,由于金沙江径流增加,输沙量也增加。支流中除横江外,输沙量都随着径流量的减少而有所减少。随着嘉陵江流域宝珠寺、碧口、鲁班和升钟水库的建设^[20],嘉陵江北碚站在1986—1998年的输沙量减小近1亿t,1985年前后输沙量减少26.8%。随着乌江干流上乌江渡水电站(总库容23亿m³)的运行,1985年前后乌江的输沙量也由0.32亿t下降至0.19亿t,减少40.62%。

1999—2002年,长江上游干支流来沙量均减少,嘉陵江因梯级电站的建设、径流量减少、水土保持措施的实施等多重因素,输沙量减少最多,由0.57亿t减少到0.22亿t,减少61.41%。2003—2013年,干支流来沙进一步减少,金沙江输沙量较1999—2002年均值减少49%,但金沙江年输沙量仍为最大,达2.53亿t;同期乌江梯级水库建设完成,其输沙量减少70%,接近沱江输沙量;嘉陵江修建亭子口与草街等控制工程,其减沙幅度较大,沱江与乌江基本一致,而横江的输沙量最小。

2014年以后,随着金沙江下游溪洛渡、向家坝水库的蓄水运行,年平均输沙量仅为0.01亿t,金沙江来沙量较上一时段减少99.2%,成为干流中输沙量最小的河流。长江上游来沙地区发生根本性变化,岷江来沙是决定长江上游来沙特性的关键因素^[21],年平均输沙量为0.2亿t。

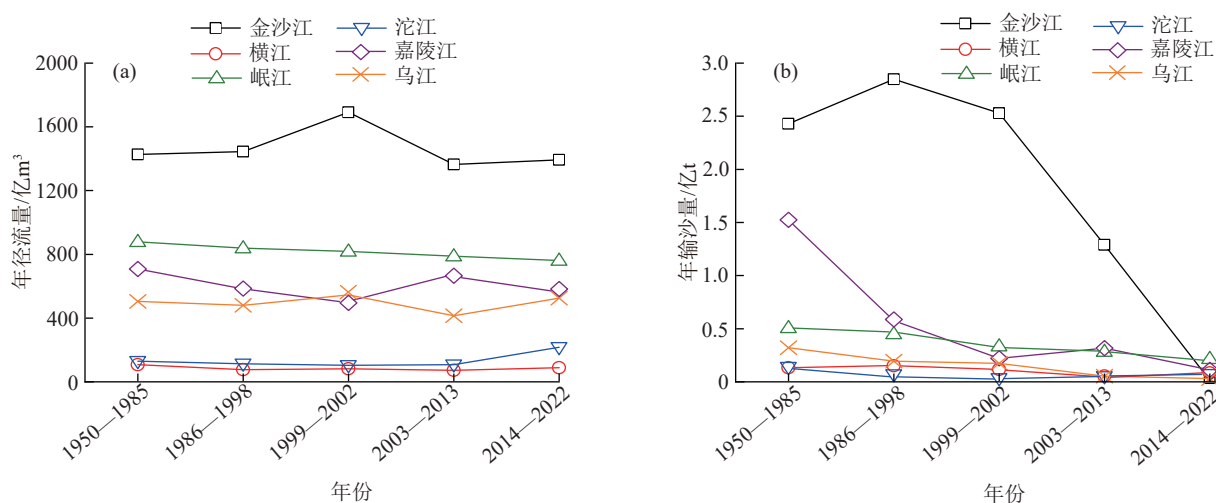


图 7 长江上游主要干支流年平均径流量和输沙量变化

Fig. 7 Changes of average annual runoff and sediment load in the mainstream and tributaries in the Upper Yangtze River basin

3 讨论

长江上游干支流水库拦沙,对流域减沙效应存在关键调节作用,随着流域水库群总库容持续增加,流域水沙关系发生多次累积变异^[22-24]。为讨论总库容动态变化对流域水沙关系累积变异的影响,对传统的双累积曲线法进行改进:计算水沙双累积曲线

的偏差序列,并引入尺度缩放因子对偏差序列进行均质化变换,利用均质化偏差曲线的极值点,量化表征流域水沙关系累积突变不同年份。采用改进的双累积曲线法,分析1950—2022年长江上游水沙关系累积变异规律发现,流域水沙关系累积发生4次变异,其中1985年对应宝珠寺水库、乌江渡水库建成运

用;1998年对应二滩水库建成运用;2002年对应三峡水库建成运用;2013年对应金沙江下游梯级水库群运行,长江上游大型水库群拦沙导致流域年均含沙量由 1.20 kg/m^3 依次降至 1.02 、 0.77 、 0.12 、 0.03 kg/m^3 。

已有学者^[25-27]运用趋势检验方法,对长江上游流域水沙变化规律开展大量研究。对比本研究与相关研究成果(图8)发现,由于不同研究运用的水沙序列时段、检验方法存在较大差异,长江上游水沙关系存在多个变异年份,包含1968年、1984年、1991年、2001—2003年、2013年。由此表明,气候变化及水库运用条件下长江上游水沙关系存在累积变异规律。根据1950—2022年长江上游含沙量变化过程(图8),分析流域水沙总体变化趋势,流域年输沙量在2002年以后显著减少,而对于其他变异年份,年输沙量并未出现明显趋势性变化。结合水库群工程建设情况可知,2002年三峡水库建成运用对长江上游流域存在关键调节作用,而其他大型水库则主要分布于支流水系,导致三峡水库拦沙效应对其他大型水库拦沙效应存在遮蔽作用。

运用改进的双累积曲线法识别长江上游水沙关系累积变异年份,基本与其他研究检验突变点保持一致,说明该方法检验结果的准确性、可靠性较高。改进双累积曲线法是研究流域水沙关系累积变异的有效手段,本文研究揭示长江上游水沙关系累积变异规律,阐明对长江上游水沙关系存在关键调控作用的大型水库,对流域水沙调控存在工程指导意义。

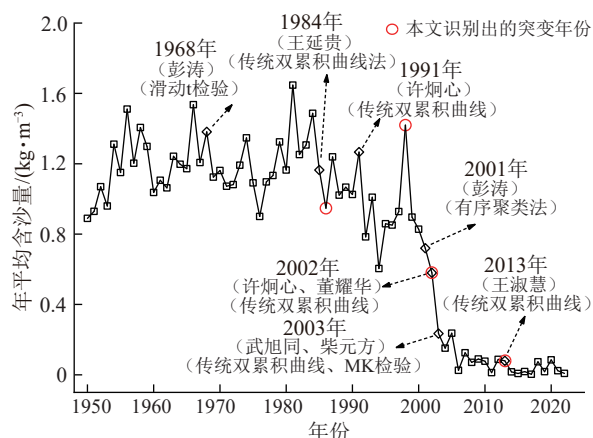


图8 不同趋势分析方法检验长江上游水沙关系变异结果对比
Fig. 8 Different results of several trend test methods in the relationship between annual runoff and sediment load in the Upper Yangtze River basin

4 结论

1)1950—2022年长江上游流域年径流量过程未发生显著变化,流域多年平均径流量为 $4\,316.41\text{ 亿 m}^3$,而年输沙量因水库群拦沙显著下降,由基准期

(1950—2002年)的 4.92 亿 t 降低至近期(2003—2022年)的 0.31 亿 t 。

2)通过改进的双累积曲线法识别出流域水沙关系的4次变异年份(1985年、1998年、2002年、2013年),流域不同阶段的多年平均含沙量由 1.20 kg/m^3 依次减小为 1.02 、 0.77 、 0.12 、 0.03 kg/m^3 ,总减幅 97.0% 。解决传统方法对多时间尺度突变点辨识的局限性,可精准识别流域水沙关系的多尺度累积变异特征。

3)长江上游水沙关系累积变异主要受干支流大型水库的时空叠加效应影响,长江上游水沙调控的关键水库包括宝珠寺水库、乌江渡水库(1985年)、二滩水库(1998年)、三峡水库(2002年)、溪洛渡水库、向家坝水库(2013年),导致长江上游年均输沙量由1950—1985年的 5.3 亿 t 减小至2014—2022年的 0.15 亿 t ,流域减沙率达 97.17% ,可为流域水沙协同管理提供科学依据。

参考文献:

- [1] MAMEDE G L, GUENTNER A, MEDEIROS P H A, et al. Modeling the effect of multiple reservoirs on water and sediment dynamics in a semiarid catchment in Brazil [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018, 23 (12): e05018020.
- [2] XU J X, YAN Y X. Effect of reservoir construction on suspended sediment load in a large river system: Thresholds and complex response [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(14): 1666-1673.
- [3] ZHANG Q, HARMAN C J, BALL W P. An improved method for interpretation of riverine concentration-discharge relationships indicates long-term shifts in reservoir sediment trapping [J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(19): 10, 215-224.
- [4] 胡春宏,方春明,史红玲.三峡工程重大泥沙问题研究进展[J].中国水利,2023(19):10-16.
HU C H, FANG C M, SHI H L. Research progress of major sediment problems in the Three Gorges Project [J]. China Water Resources, 2023(19): 10-16.
- [5] 秦蕾蕾,董先勇,杜泽东,等.金沙江下游水沙变化特性及梯级水库拦沙分析[J].泥沙研究,2019,44(3):24-30.
QIN L L, DONG X Y, DU Z D, et al. Processes of water-sediment and deposition in cascade reservoirs in the lower reach of Jinsha River [J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(3): 24-30.
- [6] 王淑慧,苏伯儒,王云琦,等.近16年三峡库区径流输沙变化分析[J].中国水土保持科学,2021,19(1):69-78.
WANG S H, SU B R, WANG Y Q, et al. Change analysis of runoff and sediment in the Three Gorges Res-

- ervoir Region in recent 16 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(1): 69-78.
- [7] 杨成刚, 李圣伟, 董炳江. 三峡水库试验性蓄水以来长江上游来水来沙变化[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(增刊1): 38-44.
- YANG C G, LI S W, DONG B J. Changes of incoming water and sediment in the upper reaches of the Yangtze River since the experimental impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(S1): 38-44.
- [8] ZHANG J, HU Q W, WANG S H, et al. Variation trend analysis of runoff and sediment time series based on the R/S analysis of simulated loess tilled slopes in the Loess Plateau, China[J]. Sustainability, 2018, 10(1): e32.
- [9] SHAUKAT R, KHAN M M, SHAHID M, et al. Quantitative contribution of climate change and land use change to runoff in Tarbela Catchment, Pakistan[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29(5): 3295-3304.
- [10] WANG X X, YANG X M, LIU T X, et al. Trend and extreme occurrence of precipitation in a mid-latitude Eurasian steppe watershed at various time scales[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(22): 5547-5560.
- [11] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文, 2010, 30(4): 47-51.
- MU X M, ZHANG X Q, GAO P, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(4): 47-51.
- [12] BAEZ-VILLANUEVA O M, ZAMBRANO-BIGIARINI M, RIBBE L, et al. Temporal and spatial evaluation of satellite rainfall estimates over different regions in Latin-America[J]. Atmospheric Research, 2018, 213: 34-50.
- [13] CHANG K L, SCHULTZ M G, LAN X, et al. Trend detection of atmospheric time series: Incorporating appropriate uncertainty estimates and handling extreme events[J]. Elementa-Science of the Anthropocene, 2021, 9(1): e00035.
- [14] ZHANG G S, DENG A J, CHEN J G, et al. Improving the double mass curve method to analyse the variation trend of runoff and sediment load in watersheds[J]. Gene-Luteinizing Hormone Subunit Beta, 2023, 109(1): e2236971.
- [15] ZHANG G S, DENG A J, LU Q, et al. Analyzing the adjustment mechanism of daily sediment content under large reservoir operations[J]. Science of the Total Environment, 2024, 947: e174729.
- [16] 李思璇, 杨成刚, 董炳江, 等. 长江上游高洪水期泥沙输移特性[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(12): 6-11.
- LI S X, YANG C G, DONG B J, et al. Sediment transport characteristics during high floods in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(12): 6-11.
- [17] LIU S W, WANG D Y, MIAO W, et al. Characteristics of runoff and sediment load during flood events in the upper Yangtze River, China[J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: e129433.
- [18] 朱玲玲, 许全喜, 董炳江, 等. 金沙江下游溪洛渡水库排沙效果及影响因素[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 544-555.
- ZHU L L, XU Q X, DONG B J, et al. Study on the effect and influencing factors of sand discharge of Xiluodu Reservoir in the lower Jinsha River[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 544-555.
- [19] ZHANG Q, XU C Y, BECKER S, et al. Sediment and runoff changes in the Yangtze River basin during past 50 years[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331(3/4): 511-523.
- [20] 刘洁, 杨胜发, 沈颖. 长江上游水沙变化对三峡水库泥沙淤积的影响[J]. 泥沙研究, 2019, 44(6): 33-39.
- LIU J, YANG S F, SHEN Y. Impact of runoff and sediment from the upper Yangtze River on deposition in the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(6): 33-39.
- [21] 周银军, 王军, 金中武, 等. 三峡水库来沙的地区组成变化分析[J]. 泥沙研究, 2020, 45(4): 21-26.
- ZHOU Y J, WANG J, JIN Z W, et al. Study on processes of sediment sources to the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Sediment Research, 2020, 45(4): 21-26.
- [22] 彭涛, 田慧, 秦振雄, 等. 气候变化和人类活动对长江径流泥沙的影响研究[J]. 泥沙研究, 2018, 43(6): 54-60.
- PENG T, TIAN H, QIN Z X, et al. Impacts of climate change and human activities on flow discharge and sediment load in the Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 2018, 43(6): 54-60.
- [23] 王延贵, 胡春宏, 刘茜, 等. 长江上游水沙特性变化与人类活动的影响[J]. 泥沙研究, 2016, 41(1): 1-8.
- WANG Y G, HU C H, LIU X, et al. Study on variations of runoff and sediment load in the upper Yangtze River and main influence factors[J]. Journal of Sediment Research, 2016, 41(1): 1-8.
- [24] 许炯心. 长江上游干支流近期水沙变化及其与水库修建的关系[J]. 山地学报, 2009, 27(4): 385-393.
- XU J X. Recent variations in water and sediment in relation with reservoir construction in the upper Changjiang River basin[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(4): 385-393.

- tion patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 135-144.
- [15] IBRAHIM A, USMAN A R A, AL-WABEL M I, et al. Effects of conocarpus biochar on hydraulic properties of calcareous sandy soil: Influence of particle size and application depth[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017, 63(2): 185-197.
- [16] ZHANG J, CHEN Q, YOU C F. Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil[J]. Pedosphere, 2016, 26(2): 265-272.
- [17] XU J, NIU W Q, ZHANG M Z, et al. Effect of biochar addition on soil evaporation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11): 3505-3513.
- [18] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227-241.
- WU K N, ZHAO R. Soil texture classification and its application in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 227-241.
- [19] LIU Z H, CAI L, DONG Q G, et al. Effects of microplastics on water infiltration in agricultural soil on the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 271: e107818.
- [20] 王娟, 陈安全, 宋文瑾, 等. 生物炭种类与施量对新复垦区土壤水分入渗过程的影响[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 388-394.
- WANG J, CHEN A Q, SONG W J, et al. Effect of biochar species and application amounts on soil water infiltration of newly reclaimed area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 388-394.
- [21] 张雅馥, 王金满, 王敬朋, 等. 生物炭添加对矿区压实土壤水力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 58-65.
- ZHANG Y F, WANG J M, WANG J P, et al. Effects of biochar addition on the hydraulic properties of compacted soils in mining areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(22): 58-65.
- [22] YANG B B, LI D D, YUAN S C, et al. Role of biochar from corn straw in influencing crack propagation and evaporation in sodic soils[J]. Catena, 2021, 204: e105457.
- [23] TAN Z X, LIN C S K, JI X Y, et al. Returning biochar to fields: A review[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 116: 1-11.
- [24] WANG C, ZHANG Z Y, FAN S M, et al. Effects of straw incorporation on desiccation cracking patterns and horizontal flow in cracked clay loam [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 182: 130-143.
- [25] SADASIVAM B Y, REDDY K R. Engineering properties of waste wood-derived biochars and biochar-amended soils [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 9(5): 521-535.
- [26] LU Y, GU K, SHEN Z T, et al. Biochar implications for the engineering properties of soils: A review[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 888: e164185.
- [27] YANG Y M, ZHONG M Y, BIAN X Q, et al. Preparation of carbon-based material with high water absorption capacity and its effect on the water retention characteristics of sandy soil[J]. Biochar, 2023, 5(1): e61.
- [28] VILLAGRA-MENDOZA K, HORN R. Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils [J]. Geoderma, 2018, 326: 88-95.
- [29] WONG J T F, CHEN Z K, NG C W W, et al. Gas permeability of biochar-amended clay: Potential alternative landfill final cover material[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(8): 7126-7131.
- [30] CASTELLINI M, GIGLIO L, NIEDDA M, et al. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 1-13.
- [31] XIAO Q, ZHU L X, SHEN Y F, et al. Sensitivity of soil water retention and availability to biochar addition in rainfed semi-arid farmland during a three-year field experiment [J]. Field Crops Research, 2016, 196: 284-293.

(上接第104页)

- [25] 董耀华, 惠晓晓, 蔺秋生. 长江干流河道水沙特性与变化趋势初步分析[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(2): 16-20.
- DONG Y H, HUI X X, LIN Q S. Preliminary analysis on characteristics and changing tendency of annual runoff and sediment load of Changjiang River main channels[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(2): 16-20.
- [26] 武旭同, 李娜, 王腊春. 近60年来长江干流水沙特征分析[J]. 泥沙研究, 2016, 41(5): 40-46.
- WU X T, LI N, WANG L C. Characteristics of runoff and sediment discharge in Yangtze River in recent 60 years[J]. Journal of Sediment Research, 2016, 41(5): 40-46.
- [27] 柴元方, 李义天, 李思璇, 等. 长江流域近期水沙变化趋势及成因分析[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3): 94-101.
- CHAI Y F, LI Y T, LI S X, et al. Analysis of recent variation trend and cause of runoff and sediment load variations in the Yangtze River basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(3): 94-101.