

乌江流域水沙序列变化特征及趋势分析

杨成刚, 李思璇, 熊 明*

长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年5月19日; 录用日期: 2022年6月18日; 发布日期: 2022年8月31日

摘 要

乌江流域作为三峡库区重要水沙来源, 其水沙条件变化对三峡入库水沙特性有着直接影响。本文基于长时段水沙序列, 采用小波分析和跃变分析等统计分析方法, 对三峡库区入库控制站之一的乌江武隆站水沙资料开展深层规律分析。分析结果表明, 武隆站年径流量呈现周期性变化规律, 在24a特征时间尺度上, 乌江武隆站年径流量变化的平均周期为17年左右, 当前乌江水量正处于历史偏枯期, 未来2~3年仍将维持偏枯状态, 之后将转入丰水期; 武隆站2003年以来年输沙量下降趋势明显, 但今后输沙量进一步减少的空间有限, 未来仍将维持当前较低水平。

关键词

三峡库区, 乌江流域, 小波分析, 输沙跃变, 趋势分析

Variation Characteristics and Trend Analysis of Runoff-Sediment Sequences in Wujiang River Basin

Chenggang Yang, Sixuan Li, Ming Xiong*

Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

Received: May 19th, 2022; accepted: Jun. 18th, 2022; published: Aug. 31st, 2022

Abstract

As an important source of flow and sediment into the Three Gorges Reservoir (TGR), the Wujiang River basin has a direct impact on the condition of inflow and sediment of the TGR. Based on a long series of flow and sediment sequences, this paper adopts the methods of wavelet analysis and jump analysis to analyze the deep regularity of the multi-year runoff and sediment data of Wulong station. The analysis

作者简介: 杨成刚, 男, 工程师, 主要从事水水泥沙及河床演变方面的分析。

*通讯作者 Email: 2474411087@qq.com

文章引用: 杨成刚, 李思璇, 熊明. 乌江流域水沙序列变化特征及趋势分析[J]. 水资源研究, 2022, 11(4): 357-365.

DOI: 10.12677/jwrr.2022.114039

results show that the annual runoff presents a cyclical variation law. On a characteristic time-scale of 24a, the average period of annual runoff variation on the Wujiang River is about 17 years. It will remain in a dry state for 2~3 years, and then it will enter the wet season. The sediment has decreased significantly since 2003, and the low amount of sediment will remain in the future.

Keywords

Three Gorges Reservoir, Wujiang River Basin, Wavelet Analysis, Jump Analysis, Trend Analysis

Copyright © 2022 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/>



Open Access

1. 引言

乌江流域位于长江南岸,是长江上游南岸最大的入库支流,是三峡水库重要的水沙来源。乌江于重庆涪陵入汇长江,属于三峡水库常年回水区末端,乌江水沙直接进入三峡水库常年回水区内。因此,乌江水沙条件变化对三峡库区水沙及冲淤特性有着直接影响[1] [2] [3] [4]。关于乌江流域水沙特性变化,陈松生[5]、吴晓玲[6]等基于实测资料,对乌江流域水沙变化特征进行研究并开展了归因分析;邵俊[7]、郭文献[8]等从多个方法入手,分析了乌江流域径流变化特征及归因识别;石国珏、许全喜等[9]-[15]从长江上游总体出发,分析了长江上游来沙变化及对三峡入库水沙的影响。以上研究成果对揭示乌江流域水沙变化及其对三峡入库泥沙的影响起到了一定的支撑作用。然而,已有研究成果多基于对实测资料成果的表观分析,对资料序列规律的深度挖掘还不够。本文采用多种统计理论,对三峡库区入库水沙控制站之一的乌江武隆站多年水沙资料开展深层规律分析。本文所采用的实测水沙资料均来自于长江水利委员会水文局。

2. 武隆站水沙变化特征

2.1. 水沙总体变化情况

武隆水文站位于乌江口上游约 70 km 处,设立于 1951 年,隶属于长江水利委员会水文局。武隆站径流量资料系列起讫年份为 1952~2021 年,输沙量资料系列起讫年份为 1955~2021 年。同时,为深入分析乌江水沙补给对三峡入库水沙特性的影响,将时间段划分为 1991~2002 年、2003~2012 年、2013~2021 年三个时段。

实测资料表明,乌江武隆站多年平均径流量和输沙量分别为 485.8 亿 m^3 、2070 万 t,年径流量、输沙量最大值分别出现在 1954 年、1977 年,最小值分别出现在 2006、2013 年。

根据对三峡水库不同蓄水时期乌江来水来沙变化情况的分析,武隆站 1991~2002 年多年平均径流量和输沙量分别为 532 亿 m^3 、2040 万 t,与 1990 年以前相比,径流量增加 39 亿 m^3 ,增幅为 8%,而输沙量减小 930 万 t,减幅达 31%;三峡水库蓄水运用后,2003~2012 年武隆站年径流量有所减小,与 1991~2002 年均值相比减幅约为 21%,而输沙量再次减少 1470 万 t,减幅高达 72%;金沙江下游溪洛渡、向家坝水库相继蓄水运用后,三峡入库水沙特性进一步发生显著变化,2013~2021 年武隆站多年平均径流量和输沙量分别为 495 亿 m^3 、298 万 t,与 2003~2012 年相比,径流量增幅为 17%,而输沙量呈进一步减小态势,减幅为 48%。总体来看,乌江武隆站年径流量呈现波动变化,在不同时期有增有减,而输沙量呈现持续减小态势,特别是 2003 年以来尤为明显。综上分析,对于径流量变化而言,可能存在着年际间的周期性变化规律,对于输沙量变化而言,年际间的跃变特征更为显著。武隆站历年来水来沙变化过程见图 1。

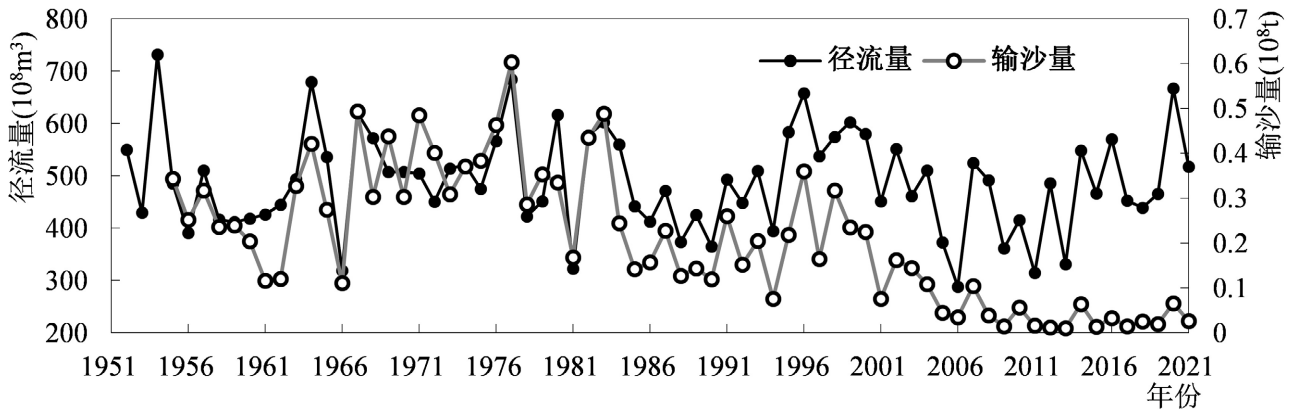


Figure 1. Annual flow and sediment transport process of Wulong station

图 1. 武隆站年径流量与年输沙量变化过程

从不同时期乌江水沙补给对三峡入库水沙条件的影响程度来看(表 1), 乌江来水和三峡入库总径流量基本保持稳定, 占比波动变化; 而输沙量占比表现为持续减小, 1990 年以前, 乌江来沙占三峡入库总沙量的 6.1%; 1991~2002 年, 乌江入库沙量占比减小至 5.8%; 2003 年至今, 占比又进一步减小至 3.0%。值得注意的是, 在三峡入库沙量整体大幅减少的情况下, 乌江来沙占比仍在不断减小, 说明乌江流域输沙量减少的情况较三峡入库总沙量减少更为突出。

Table 1. The ratio of flow and sediment between Wujiang and TGR at different time periods

表 1. 不同时段乌江水沙补给占三峡入库水沙总量比值

时段	径流量(10^8 m^3)			输沙量(10^4 t)		
	武隆站	三峡入库总量	占比	武隆站	三峡入库总量	占比
1990 年以前	486.4	3844.6	12.7%	2970	48,870	6.1%
1991~2002 年	531.7	3733.1	14.2%	2040	35,060	5.8%
2003~2021 年	456.9	3743.7	12.2%	441	14,801	3.0%

注: 在三峡建库前后, 均采用朱沱站 + 北碚站 + 武隆站水沙之和作为三峡入库水沙总量。

2.2. 径流量周期性变化特征

从实测资料分析来看, 武隆站多年径流过程呈现波动变化特征, 具有一定的周期性。本文采用小波分析理论, 对武隆站径流量的年际间周期性变化特征展开研究。

从武隆站径流量小波等值线(图 2)可以看出, 径流量从上至下存在着 24~26a, 15~16a, 10~12a 和 6~7a (a 为无量纲时间尺度)四类尺度的周期变化规律, 且各尺度的周期变化波动性明显。从尺度较大的 24~26a 分析来看, 武隆站径流量多年过程经历了 4 次丰枯交替, 其中在 1964~1969 年、1980~1984 年、1995~2001 年、2009~2016 年 4 个时期小波系数为正值, 表示为历史多水期, 其余各时间段为少水期, 呈现显著的丰枯交替规律。而在其他较小尺度下, 相关性相对较弱。同时从小波方差图(图 3)也可以看出, 1952 年以来共出现了 4 个峰值, 对应径流量变化的主周期分别为 24a, 16a, 10a 和 6a, 其中尤其以 24a 为第一主周期的变化最为显著。由此可见, 武隆站径流量在一定程度上存在着丰枯交替的周期性变化规律。

2.3. 输沙量跃变特征

跃变是水文系统所具有的非线性特殊表现形式, 指时间序列在某时刻发生急剧变化的一种形式, 表现为跳

跃点前后平均值发生陡升或是陡降。跳跃分析的本质是有序聚类分析，首先找出跳跃点，然后进行检验[14]。一般把由子序列均值作为检测跃变的基本量而得到的跃变叫做第 I 类跃变，由子序列方差作为检测跃变的基本量而得到的跃变叫做第 II 类跃变。

受多种因素影响，长江上游各支流上泥沙跃变情况较为普遍且突出。根据武隆站 1955~2021 年共 67 年输沙

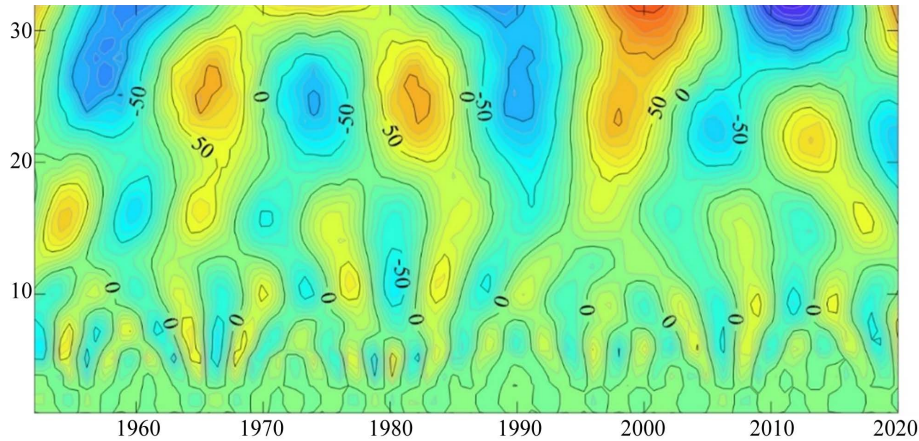


Figure 2. Wavelet analysis of annual runoff at Wulong station

图 2. 武隆站年径流量小波分析

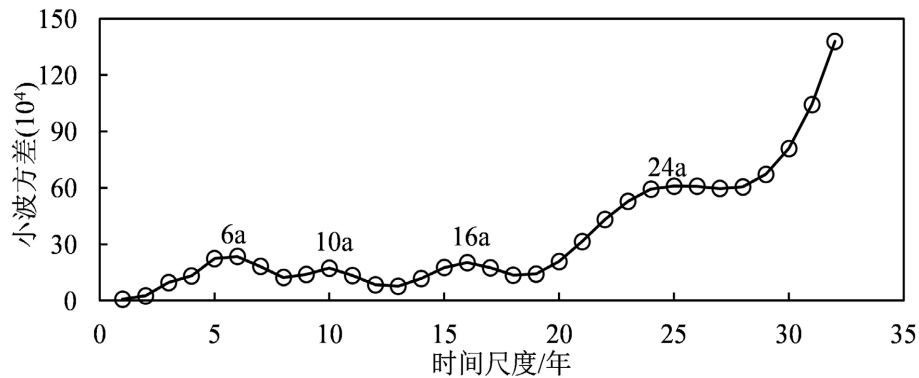


Figure 3. The main cycle of runoff changes at Wulong station

图 3. 武隆站径流量变化主周期

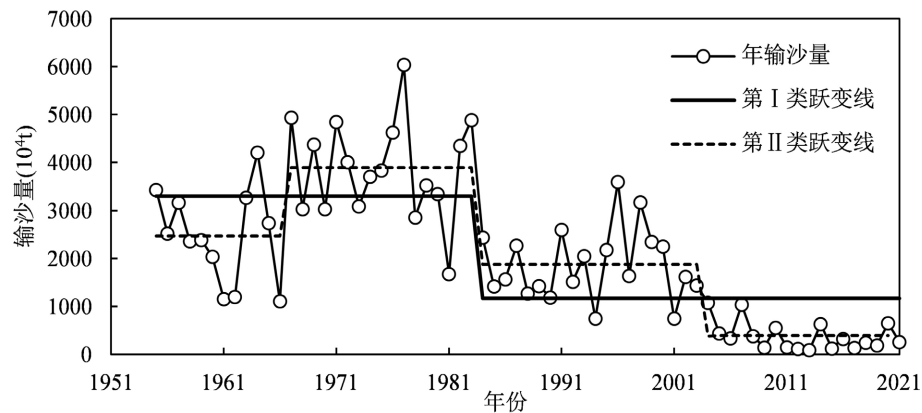


Figure 4. Jump phenomenon of sediment transport at Wulong station

图 4. 武隆站年输沙量跃变图

量序列计算结果来看(图 4), 武隆站多年输沙过程经历了一次第 I 类跃变, 两次第 II 类跃变。其中 1983 年为一
级跳跃点, 输沙量明显骤降, 输沙量减小幅度达到了 64.5% (见表 2)。1966 年、2003 年为次级跳跃点, 其中 1966
年为跃升点, 输沙量明显增加, 跳跃幅度为 57.5%; 2003 年为跃降点, 输沙量减小幅度为 79.3%。

Table 2. The sediment transport in different periods at Wulong station

表 2. 武隆站各分期年平均输沙量

年份	1955~1983 年			1984~2021 年			变幅
	1955~1966 年	1967~1983 年	变幅	1984~2003 年	2004~2021 年	变幅	
年均输沙量 (10 ⁸ t)	0.247	0.389	+57.5%	0.188	0.039	-79.3%	
		0.330			0.117		-64.5%

3. 主要影响因素及后续影响分析

已有研究成果表明, 影响长江上游地区流域产输沙的主要因素包括流域下垫面条件、降水、人类活动等 3
个主要方面[10]。具体到乌江流域, 主要影响因素可归纳为大型水利枢纽建设和土地利用方式改变两个方面。

3.1. 大型水利枢纽建设

乌江流域水能资源丰富, 水利枢纽建设密度较大。乌江流域来沙减少的最主要原因就是水库拦沙, 尤其是
与大型水利枢纽建设有密切关联[5] [6]。从乌江流域水库总库容变化来看(图 5), 1960 年, 支流猫跳河上的红枫
湖水库建成, 水库库容为 7.53 亿 m³, 乌江流域水库总库容迎来第一次显著增大; 1982 年, 乌江干流乌江渡水
库建成, 这是乌江流域首座大 I 型水库, 水库库容 23 亿 m³; 2002 年, 支流六冲河上洪家渡水库建成, 水库库
容 49.47 亿 m³; 2009 年, 乌江干流构皮滩水库建成, 水库库容 64.54 亿 m³, 乌江流域水库总库容增长迅速。

大型水利枢纽修建, 极大程度上导致乌江河道泥沙输移受阻, 进入三峡库区内的泥沙不断减少。实测资料
表明, 在这些大型水库蓄水运用后, 下游输沙量锐减, 拦沙作用显著[16] [17]。如洪家渡水电站于 2004 年 4 月
正式蓄水, 蓄水前下游多年平均输沙量为 611 万 t, 而 2004 年实测输沙量仅为 11 万 t, 基本拦截了支流六冲河
的全部沙量, 对乌江流域输沙影响极为显著。

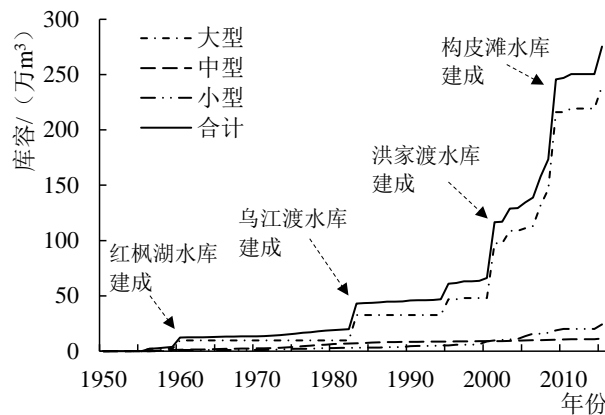


Figure 5. Accumulative diagram of reservoir storage change in the Wujiang River basin since 1956

图 5. 1956 年以来乌江流域水库库容变化累计图

大型水利枢纽修建对水沙输移的影响可通过径流量 - 输沙量双累积曲线进行反映。从武隆站年径流量 - 输
沙量双累积曲线来看(图 6), 1954 年以来, 武隆站径流 - 输沙关系主要经历了 3 次明显变化, 分别出现在 1966

年、1983年、2003年，其中尤以1983年和2003年最为突出，双累积曲线斜率明显减小，反映出同径流量下输沙量大幅减少。这与2.3节得到的武隆站输沙量跃变节点基本一致，也与上述大型水库修建时间节点基本吻合，反映出大型水利枢纽修建对乌江水沙输移的直接影响。但2003年之后，尽管乌江流域水库建设仍在继续，但双累积曲线再未出现过显著转折，可见水库修建对河道输沙的影响已逐渐达到上限，输沙量进一步减少的空间十分有限。

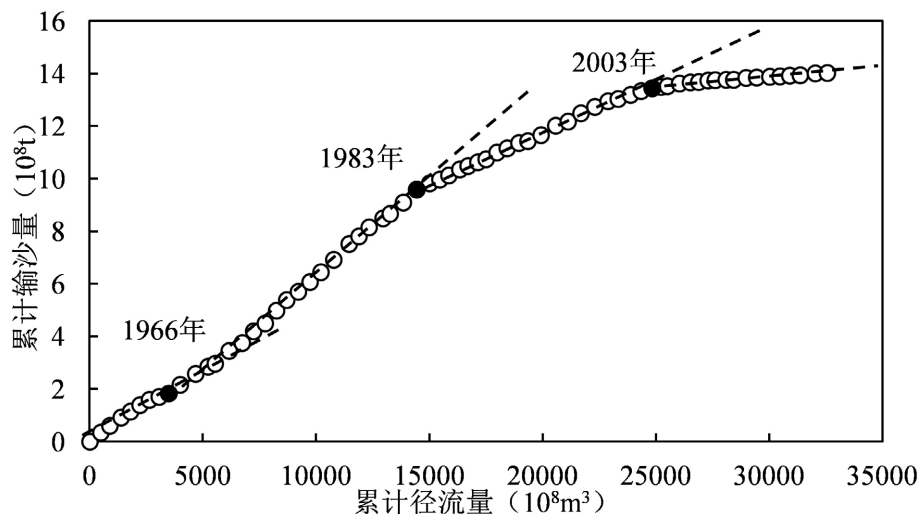


Figure 6. Double mass curve between annual runoff and sediment transport at Wulong station
图 6. 武隆站年径流量 - 输沙量双累积曲线

3.2. 土地利用方式改变

土地利用方式改变对流域产输沙具有一定的影响，尤其是退耕还林(草)及水土保持工程，对治理流域水土流失具有重要意义。但土地利用方式改变对流域产输沙的影响效果相对滞后，与水沙变化关键节点的呼应较差，其中间往往存在一定的时间差。

乌江上游毕节地区是乌江流域水土流失较为严重的地区，自1989年开展“长江上游水土保持重点防治区综合治理工程”以来，水土流失情况逐渐好转，初步估计，1989~2004年毕节地区水土保持措施年均减蚀量在1000万t左右，极大程度从源头上减少了乌江入河泥沙总量，这也是2003年以来武隆站泥沙输移量锐减的主要原因之一。

从乌江流域土地利用方式变化来看，长期以来，乌江流域各土地类型变化特征具体表现为“四增两减”，即林地、建设用地、水域与未利用地的面积增加；耕地、草地的面积减少。根据2017年调查结果[18]，目前贵州乌江流域林地面积为35,741.05 km²，占流域总面积的比重为53.43%；其次为耕地，面积为21,056.33 km²，占流域总面积的比重为31.48%；草地面积为8344.43 km²，占流域总面积的比重为12.47%。林地、耕地与草地构成了贵州乌江流域土地利用的主体，三者面积之和占流域总面积的97.38%，其中林地和草地占比为65.9%。总体来看，乌江流域土地利用方式整体上是朝着流域产沙减少的方向发展的，这是未来乌江流域产沙继续维持较低水平的重要前提。

4. 水沙变化趋势分析

4.1. 径流量趋势研究

通过前文分析可知，武隆站径流量年际间呈现着周期性变化特征，存在着丰枯交替的变化规律。基于小波

方差检验的结果,得到乌江武隆站径流演变的第一和第二主周期小波系数(图 7)。在不同的时间尺度下,流域径流存在着平均周期及丰水期~枯水期变化特征。如在 16a 特征时间尺度上(图 7(a)),流域的平均变化周期为 10 年左右,大约 6 个周期的丰水期~枯水期变化;在 24a 特征时间尺度上(图 7(b)),乌江武隆站年径流量变化的平均周期为 17 年左右,大约经历了 3 个丰水期~枯水期的循环阶段。根据较大尺度(24a)的小波系数变化趋势,初步可以看出乌江武隆站年径流过程自 2016 年以来进入偏枯期,未来 2~3 年内武隆站来流将持续偏枯态势,后将由偏枯期转为偏丰期。

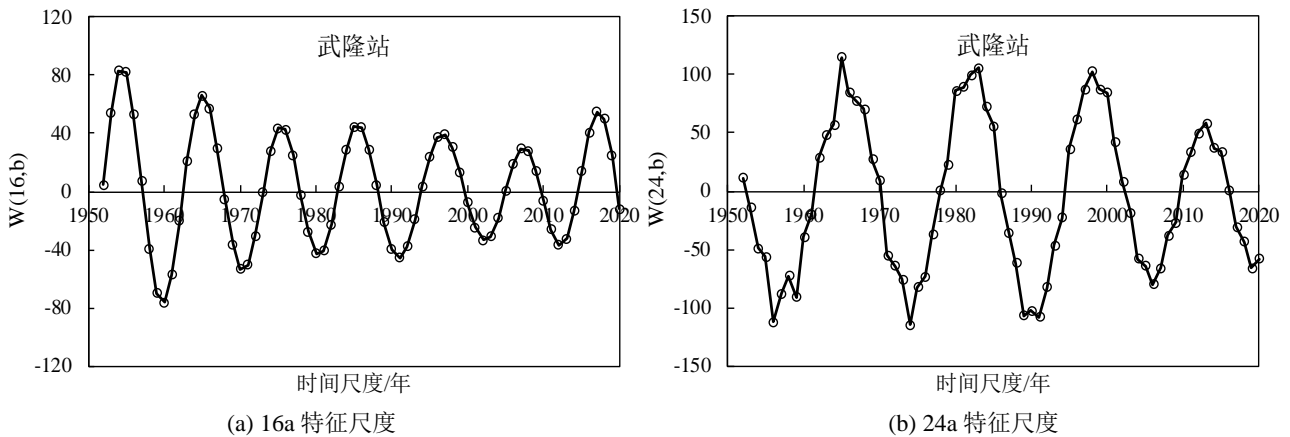


Figure 7. Wavelet real part process line of annual runoff change at Wulong station
图 7. 武隆站年径流量变化小波实部过程线

4.2. 输沙量趋势研究

Mann-Kendall 法是一种非参数统计检验方法,在水文学中常常被用来分析水文时间序列的变化趋势和突变年份。本节即基于 Mann-Kendall 秩相关检验法的统计理论,对乌江流域泥沙趋势性变化展开分析。

利用趋势分析,可判断时间序列中是否具有上升或是下降的趋势。其基本原理是:对于时间序列 x_1, x_2, \dots, x_N , 先确定其对偶值,记为 P (即当 $x_i < x_j$, 且 $i < j$ 出现的次数);若序列按顺序前进的值全部大于前一个值,即具有上升趋势,则 $P = (N-1) + (N-2) + \dots + 1 = (N-1)N/2$;若序列倒过来,即为下降趋势,则 $P = 0$ 。因此,对于无趋势的序列 $E(P) = N(N-1)/4$;当 $P < E(P)$ 表示序列可能是有下降趋势的; $P > E(P)$ 时序列可能是上升趋势。此检验采用统计量:

$$U = \frac{\tau}{[Var(\tau)]^{1/2}} \quad \tau = \frac{4P}{N(N-1)} - 1 \quad Var(\tau) = \frac{2(2N+9)}{9N(N-1)} \quad (1)$$

当 N 增加时, U 很快收敛于标准化正态分布。设置信水平 $\alpha = 0.05$, 查正态分布表得临界值 $U_{0.05/2} = 1.96$ 。

根据上述趋势分析方法对乌江武隆站的输沙量变化趋势进行分析,分析结果表明,在 0.05 显著水平下,乌江武隆站输沙量呈明显减小趋势。具体来看(图 8),1968 年以前,乌江武隆站年输沙量 M-K 值基本在 0 值以下,表明该时段年输沙量呈下降趋势,1968~1990 年,年输沙量表现为上升趋势,而 1991 年以来,武隆站年输沙量再次呈下降趋势。2003 年,UF 和 UB 曲线相交,且交点在置信水平区间 $[-1.96, 1.96]$ 内,说明 2003 年武隆站输沙量呈现突变性下降状态;此后 M-K 值突破了显著水平的临界值下限,年输沙量下降趋势显著。但考虑到当前乌江流域水利规划实施已较为充分,水利工程修建对泥沙输移的影响已接近饱和,尤其是受干流几座大型水库的拦截,武隆站的年输沙量已接近最低值,未来进一步减少的空间十分有限。因此,未来乌江流域进入三峡库区的泥沙量将维持当前的较低水平。

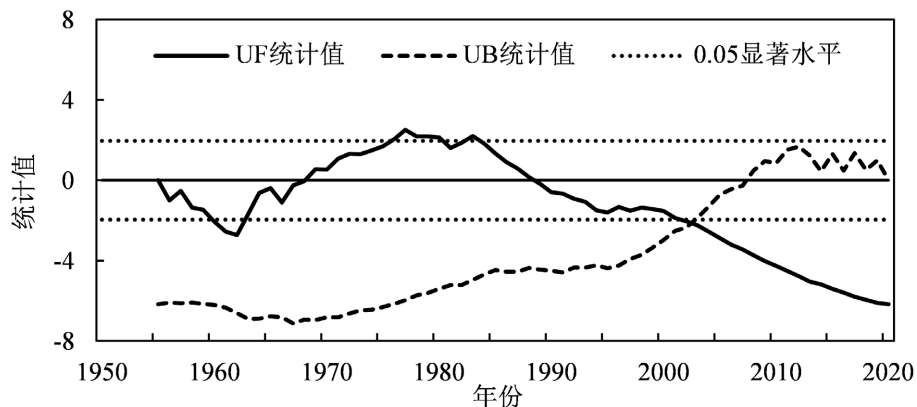


Figure 8. M-K statistic series of annual sediment transport at Wulong station from 1950 to 2020
图 8. 1955~2020 年武隆站年输沙量 M-K 统计量序列

5. 结论

1) 实测资料表明, 乌江武隆站多年径流过程(1952~2021 年)呈现波动变化特征, 具有一定的周期性, 大尺度上存在着丰枯交替的规律; 输沙量(1955~2021 年)则表现为年际间跃变特征显著, 其中 1983 年为一级跳跃点, 输沙量明显骤降, 减小幅度达到了 64.5%。1966 年、2003 年为次级跳跃点, 其中 1966 年为跃升点, 跳跃幅度为 57.5%; 2003 年为跃降点, 减小幅度为 79.3%。

2) 大型水利枢纽修建极大程度上阻碍了乌江河道泥沙输移, 尤其是 1982 年乌江渡水库和 2002 年洪家渡水库的修建, 对乌江流域输沙减少影响最为显著。但 2003 年之后, 水库修建对河道输沙的影响已逐渐达到上限, 加上乌江流域土地利用方式总体朝着流域产沙减少方向发展, 未来乌江流域产输沙将继续维持当前较低水平。

3) 水沙变化趋势分析表明, 武隆站年径流量呈现周期性变化规律, 在 24a 特征时间尺度上, 乌江武隆站年径流量变化的平均周期为 17 年左右, 当前乌江正处于水量偏枯期, 未来 2~3 年仍将维持偏枯状态, 之后将转入丰水期; 武隆站 2003 年以来年输沙量下降趋势明显, 但今后输沙量进一步减少的空间有限, 未来仍将维持当前较低水平。

基金项目

研究内容得到国家自然科学基金联合基金项目(U2040218)资助。

参考文献

- [1] 渠庚, 沈俊, 巩艳国. 长江上游地区来水来沙变化趋势及其影响研究[J]. 水利科技与经济, 2005, 11(12): 752-756.
 QU Geng, SHEN Jun and GONG Yanguo. Analysis on flow and sediment trend of upper reaches of Yangzi River and its affects. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2005, 11(12): 752-756. (in Chinese)
- [2] 师长兴, 杜俊. 长江上游输沙量阶段性变化和原因分析[J]. 泥沙研究, 2009(4): 17-24.
 SHI Changxing, DU Jun. Causes for stepped changes of sediment load in the upper Yangtze River. Journal of Sediment Research, 2009(4): 17-24. (in Chinese)
- [3] 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(S1): 38-44.
 YANG Chenggang, LI Shengwei and DONG Bingjiang. Changes of runoff and sediment in the upper reaches of the Yangtze River since the trial impoundment of the Three Gorges Reservoir. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(S1): 38-44. (in Chinese)
- [4] 魏丽, 卢金友, 刘长波. 三峡水库蓄水后长江上游水沙变化分析[J]. 中国农村水利水电, 2010(6): 1-4+8.
 WEI Li, LU Jinyou and LIU Changbo. An analysis of changing characteristics of runoff and sediment transport in upper Changjiang River after the impounding of Three Gorges Reservoir. China Rural Water and Hydropower, 2010(6): 1-4+8. (in Chinese)

- [5] 陈松生, 许全喜, 陈泽方. 乌江流域水沙变化特性及其原因分析[J]. 泥沙研究, 2008(5): 43-48.
CHEN Songsheng, XU Quanxi and CHEN Zefang. Analysis on variation characteristics and influencing factors of runoff and sediment in the Wujiang River Basin. *Journal of Sediment Research*, 2008(5): 43-48. (in Chinese)
- [6] 吴晓玲, 张欣, 向小华, 陈喜, 王船海, 李晓东. 乌江流域上游水沙特性变化及其水电站建设的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(3): 642-650.
WU Xiaoling, ZHANG Xin, XIANG Xiaohua, CHEN Xi, WANG Chuanhai and LI Xiaodong. Runoff and sediment variations in the upstream of Wujiang River Basin and the influences of hydropower station construction. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(3): 642-650. (in Chinese)
- [7] 邵骏, 范可旭, 邢建平, 张新田, 熊莹. 乌江干流年径流变化趋势及成因分析[J]. 水文, 2012, 32(6): 86-91+20.
SHAO Jun, FANG Kexu, BING Jianping, ZHANG Xintian and XIONG Ying. Variation trend and driving factors of annual runoff in Wujiang River. *Journal of China Hydrology*, 2012, 32(6): 86-91+20. (in Chinese)
- [8] 郭文献, 胡鉴闻, 王鸿翔. 乌江流域径流变化特征及归因识别[J]. 水电能源科学, 2022, 40(5): 14-17+33.
GUO Wenxian, HU Jianwen and WANG Hongxiang. Characteristics and attribution identification of runoff variation in Wujiang River Basin. *Water Resources and Power*, 2022, 40(5): 14-17+33. (in Chinese)
- [9] 石国钰, 陈显维, 叶敏. 长江上游已建水库群拦沙对三峡水库入库站沙量影响的探讨[J]. 人民长江, 1992(5): 23-28.
SHI Guoyu, CHEN Xianwei and YE Min. Discussion on the effect of sediment storage on the upper reaches of the Yangtze River to the Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 1992, 23(5): 23-28. (in Chinese)
- [10] 许全喜, 石国钰, 陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 420-426.
XU Quanxi, SHI Guoyu and CHEN Zefang. Analysis of recent changing characteristics and tendency runoff and sediment transport in the upper reach of Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 420-426. (in Chinese)
- [11] 张强, 陈桂亚, 许崇育, 许有鹏, 刘春玲, 姜彤. 长江流域水沙周期特征及可能影响原因[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 80-85.
ZHANG Qiang, CHEN Guiya, XU Chongyu, XU Youpeng, LIU Chunling and JIANG Tong. Periodic characters of sediment load and runoff changes in the Yangtze River basin in the past 40 years, China. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 80-85. (in Chinese)
- [12] 张强, 陈桂亚, 姜彤, 任国玉. 近 40 年来长江流域水沙变化趋势及可能影响因素探讨[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 257-263.
ZHANG Qiang, CHEN Guiya, JIANG tong and REN Guoyu. Changing characteristics of sediment yield and discharge during past 40 years in catchment of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(2): 257-263. (in Chinese)
- [13] 张敏, 黄晓荣, 王延珺. 金沙江流域径流演变过程及影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 27-31.
ZHANG Min, HUANG Xiaorong and WANG Yanjun. Analysis of runoff evolution process and influencing factors in Jinshajiang River Basin. *Water Resources and Power*, 2022, 40(7): 27-31. (in Chinese)
- [14] 许全喜, 张小峰, 袁晶. 长江上游河流输沙量时间序列跃变现象研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(6): 555-562.
XU Quanxi, ZHANG Xiaofeng and YUAN Jing. Study of frequency jump phenomenon of sediment transport time series in the upper Changjiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(6): 555-562. (in Chinese)
- [15] 邬玉琴, 何太蓉, 钟博星. 乌江流域 1956-2014 年降雨特征及输沙效应[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 1-7.
WU Yuqin, HE Tairong and ZHONG Boxing. Characteristics of precipitation and sediment effect in Wujiang River basin during 1956-2014. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(1): 1-7. (in Chinese)
- [16] 刘家应, 柴方福. 乌江渡水库泥沙淤积观测研究(二) [J]. 贵州水力发电, 1994(1): 33-43.
LIU Jiaying, CHAI Fangfu. Observational study on sediment deposition in Wu-Jiang-Du reservoir (II). *Guizhou Hydroelectric Power Generation*, 1994(1): 33-43. (in Chinese)
- [17] 袁晶, 陈薇薇, 杨成刚, 熊明. 乌江流域水库拦沙及其减沙作用研究[J]. 水资源研究, 2022, 11(3): 249-259.
YUAN Jing, CHEN Weiwei, YANG Chenggang and XIONG Ming. Study on sediment retention and reduction of reservoirs in Wujiang River Basin. *Journal of Water Resources Research*, 2022, 11(3): 249-259. (in Chinese)
- [18] 刘纯军. 贵州乌江流域土地利用变化及其生态环境效应研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
LIU Chunjun. Study on land use change and its effects on eco-environment of Wujiang River basin in Guizhou Province. Master's Thesis, Guiyang: Guizhou Normal University, 2021. (in Chinese)