

金沙江下游水沙序列变异诊断及归因分析

陈柯兵, 杨成刚, 熊 明*, 朱玲玲

长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年4月27日; 录用日期: 2022年6月7日; 发布日期: 2022年6月29日

摘 要

金沙江中下游干流、支流雅砻江梯级水电站相继建成运行, 使得进入金沙江下游水沙特性出现了一些新变化。本文采用水文变异诊断系统对金沙江下游干流关键控制站的年径流量、年输沙量序列进行了变异诊断及归因分析。主要结果为, 金沙江下游水沙关系发生明显变化, 主要体现在径流量总体变化不大, 但输沙量明显减少。石鼓、白鹤滩、向家坝站年径流量序列未发生变异, 受面平均降水突变式跃升的影响, 攀枝花站年径流量序列在1997年发生向上的跳跃变异。因极端降水增加致使产沙变大, 石鼓站年输沙量在1997年发生向上的跳跃变异; 因金沙江中游水库建设的影响, 攀枝花、向家坝站年输沙量在2010年发生向下的跳跃变异; 因攀枝花至华弹区间年输沙量显著减少, 白鹤滩站年输沙量在2002年发生向下的跳跃变异。

关键词

金沙江下游, 水沙序列变异, 年径流量, 年输沙量, 归因分析

Variation Diagnosis and Attribution Analysis of Flow and Sediment Sequences in the Lower Reaches of Jinsha River

Kebing Chen, Chenggang Yang, Ming Xiong*, Lingling Zhu

Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

Received: Apr. 27th, 2022; accepted: Jun. 7th, 2022; published: Jun. 29th, 2022

作者简介: 陈柯兵, 男, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源分析计算研究, Email: chenkb@whu.edu.cn

*通讯作者 Email: xiongm@cjh.com.cn

Abstract

The cascade hydropower station in the middle and lower reaches of the Jinsha River and tributary Yalong River has been completed and put into operation, which has brought some new changes in the characteristics of flow and sediment entering the lower reaches of the Jinsha River. In this paper, the variation diagnosis and attribution analysis of the series of annual runoff and annual sediment load of key control stations in the lower reaches of the Jinsha River were carried out using the hydrological variation diagnosis method. The main results are that the relationship between flow and sediment in the lower reaches of the Jinsha River has changed significantly, which is mainly reflected in the fact that the overall change in runoff is not large, but the amount of sediment load is significantly reduced. The annual runoff sequence of Shigu, Baihetan, and Xiangjiaba stations did not change, but the annual runoff sequence of Panzhihua station jumped upward in 1997 due to the sudden jump in average precipitation. Due to the increase of extreme precipitation, the sediment production increased, and the annual sediment load at Shigu station jumped upward in 1997. Due to the influence of the construction of the reservoirs in the middle reaches of the Jinsha River, the annual sediment load of Panzhihua and Xiangjiaba stations experienced a downward jump variation in 2010. Due to the significant decrease in the annual sediment production from Panzhihua to Huatan, the annual sediment load at Baihetan station jumped downward in 2002.

Keywords

Lower Reaches of Jinsha River, Variation of Flow and Sediment Sequence, Annual Runoff, Annual Sediment Load, Attribution 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

2010~2015 年,金沙江中游干流梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉、观音岩等 6 个梯级水电站,2012~2021 年金沙江下游干流乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水电站相继建成运行,支流雅砻江锦屏一级、锦屏二级、官地、桐子林等梯级水电站陆续建成、蓄水运用,使得金沙江下游水沙特性出现了一些新变化,集中表现为水量过程的调平和沙量的大幅减少,整体改变了金沙江下游的水沙条件。

朱玲玲等[1]以金沙江下游干支流主要控制站水文、泥沙资料分析为基础,揭示了金沙江下游水沙变化特征及其影响。研究表明,金沙江下游水沙异源,中游及干流梯级相继建成运用后,下游沙量大幅度减少,对梯级水库库区及坝下游泥沙冲淤、三峡入库沙量影响显著。秦蕾蕾等[2]根据金沙江下游主要控制水文站的水沙资料,对不同时段不同区间的水沙变化特性进行统计分析,并采用输沙法计算溪洛渡和向家坝梯级水库运用以来的拦沙情况。研究表明,攀枝花站以上流域为少水少沙区,攀枝花至白鹤滩区间(不含雅砻江)为少水多沙区,白鹤滩至向家坝区间为多水多沙区。金沙江下游干流代表水文站的水沙相关关系以沙量单向减少为主。刘尚武等[3]以金沙江流域直门达、屏山等水文站实测资料为依据,采用 Manner-Kendall 趋势检验、水文统计等方法对金沙江悬移质输沙特性进行了分析。结果显示:金沙江水沙分布具有明显的水沙异源特性,不同区域水沙模数差异较大。1998 年前金沙江年径流量和年输沙量无明显趋势性变化,受人类活动影响较小;1998 年后金沙江流域不同区域水沙变化差异明显,金沙江上游年输沙量呈增加趋势,金沙江中、下游呈减沙趋势,特别是进

入 21 世纪后,减沙趋势更加明显。杜泽东等[4]以金沙江溪洛渡水库干支流主要控制站的水沙资料及历年断面数据为基础,采用输沙量法、断面法和统计分析,对其入库水沙特征及泥沙冲淤规律进行研究。研究结果表明:与可行性研究阶段相比,2008~2019 年,溪洛渡入库年径流量变化不大,年径流量为 1334 亿 m^3 ,相较于可行性研究阶段偏少 7.36%;入库沙量大幅度偏少,年平均总入库沙量为 1.127 亿 t,相较于可行性研究阶段偏少 54.37%。

在上述研究的基础上,为加强对金沙江下游水沙序列的特性变化和整体分析、判断与归因,本文基于金沙江下游干流关键控制站长序列观测资料,针对年径流量、年输沙量序列进行统计分析 with 变异诊断,并对年径流量、年输沙量序列的变异时间、变异形式、变异程度以及变异的原因开展深入研究。

2. 水沙序列变异分析方法

由于水沙序列变异形式比较复杂,为得到可靠的径流、输沙量序列变异形式及程度,需要使用不同的统计方法进行综合分析。本文采用谢平等提出的水文变异诊断系统[5]对年径流量、年输沙量序列进行诊断分析,该系统曾用于西北江三角洲的水沙序列分析[6];针对洞庭湖三口洪峰流量和水位变异特性分析,孙思瑞、谢平等[7]使用该系统,取得了较好的结果。其分析流程简述如下,见图 1,具体步骤详见文献[5][7]。

诊断系统分析流程可分为三个阶段:初步诊断,即定性和定量判断序列是否存在变异,并对变异程度进行初步分类;详细诊断,即利用多种检测方法,综合判断和分析序列的跳跃、趋势变异;综合诊断,确定最终变异形式,同时导出结果。在具体使用中,诊断系统会进行多次循环计算,将扣除跳跃、趋势等确定性成分后的剩余序列作为新序列放入诊断系统中再次进行计算。为了合理量化各变异形式的显著性,系统将序列变异程度划分为无、弱、中、强、巨五个等级,无变异表示变异不显著。如 Hurst 系数法一般采用 R/S 分析原理来计算水文序列的 Hurst 系数,然后根据变异程度分级表[8]来判断序列的变异程度,如该系数位于 0.924 与 1.0 之间时,变异程度为巨变异。

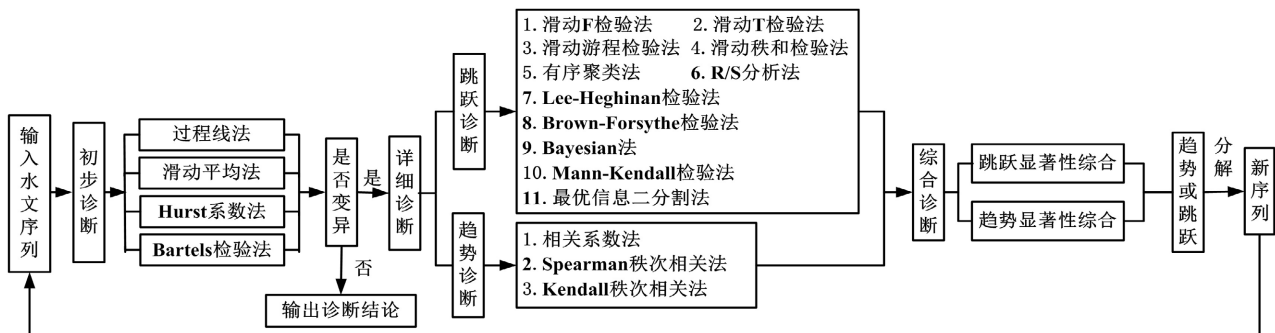


Figure 1. The flow chart of hydrological variation diagnosis system

图 1. 水文变异诊断系统流程图

3. 研究区域及数据

金沙江干流以石鼓和攀枝花为界,分为上、中、下游,研究以金沙江下游干流关键控制站点攀枝花、白鹤滩(华弹)、向家坝(屏山)的水文资料为主要分析对象,为了更好地对比分析水沙变化规律,将金沙江上游的干流控制站石鼓也纳入分析范围。其中,华弹站 2015 年 7 月由水文站改为水位站,其 2015 年以来的径流、泥沙观测资料改为下游 37.5 km 的白鹤滩站,其集水面积为 43.03 万 km^2 ,较华弹站集水面积 42.59 万 km^2 增加 0.44 万 km^2 ,增幅 1.0%。屏山水文站于 2012 年 6 月改为水位站,其后的径流、输沙资料改为向家坝水电站下游 2 km 的向家坝水文站,向家坝站集水面积为 45.88 万 km^2 ,较屏山站集水面积 45.85 万 km^2 增加 0.03 万 km^2 ,增幅不足 0.1%。表 1 统计了研究站点水沙年际变化情况,站点历年径流量、输沙量过程线如图 2 所示。

Table 1. Interannual variation statistics of runoff and sediment at hydrological stations
表 1. 水文站水沙年际变化统计

时段	石鼓		攀枝花		白鹤滩		向家坝	
	年径流量 (亿 m ³)	年输沙量 (万 t)	年径流量 (亿 m ³)	年输沙量 (万 t)	年径流量 (亿 m ³)	年输沙量 (万 t)	年径流量 (亿 m ³)	年输沙量 (万 t)
1998 年前均值	418	2190	540	4590	1220	17,400	1400	24,900
1998~2010 年	453	3510	638	6640	1380	13,600	1550	20,700
2011~2021 年	434	3335	570	590	1210	6705	1353	1985
2020 年	515.4	6280	647.9	212	1370	4380	1586	125
2021 年	449	2140	583	90.2	1055	438	1229	109
变化率 1 (%)	7.4	-2.3	8.0	-98.0	-13.5	-97.5	-12.2	-99.6
变化率 2 (%)	-0.9	-39.0	-8.6	-98.6	-23.6	-96.8	-20.7	-99.5
变化率 3 (%)	3.3	-35.8	2.2	-84.7	-12.8	-93.5	-9.1	-94.5
多年均值	427	2730	568	4350	1260	15,600	1420	20,600

注：1、1998 年前均值统计年份：石鼓、攀枝花、华弹、屏山站分别为 1952~1997 年、1966~1997 年、1958~1997 年、1954~1997 年；2、变化率 1、2、3 分别指 2021 年相对于 1998 年前均值、1998~2010 年及 2011~2021 年均值的变化。

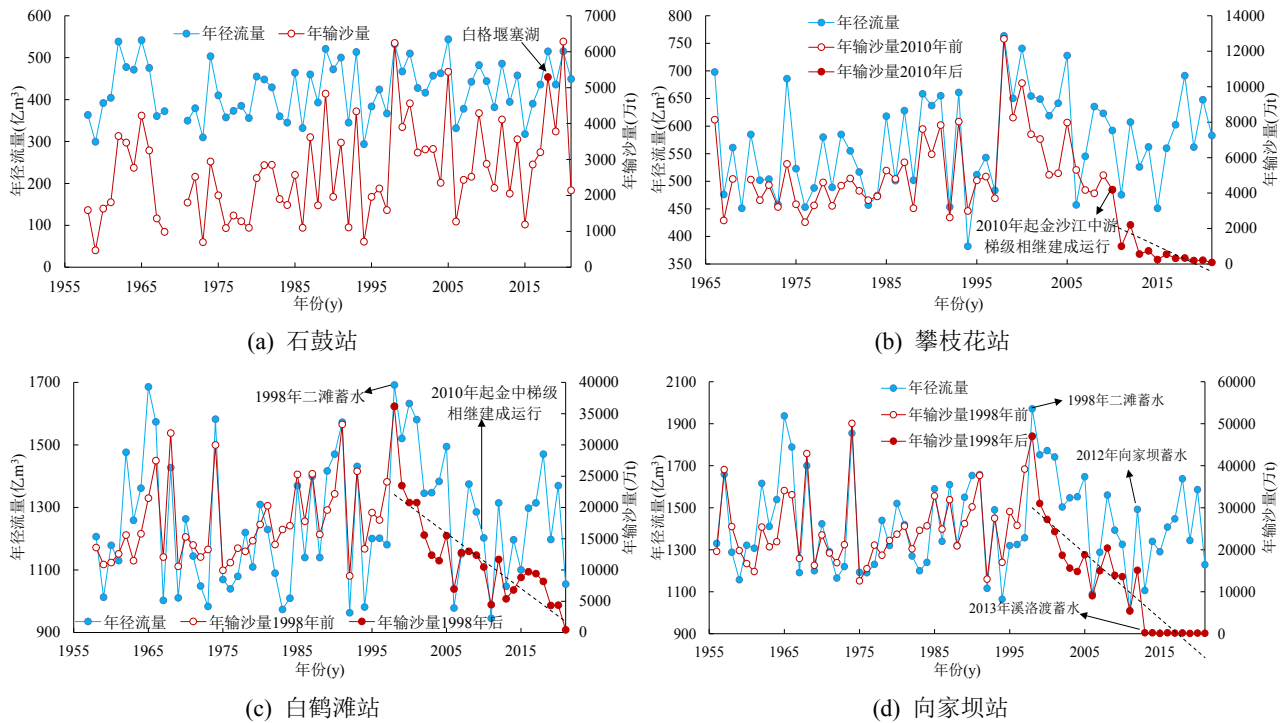


Figure 2. Process of runoff and sediment transport over the years
图 2. 历年径流量和输沙量过程线

4. 结果分析

4.1. 水沙序列变异诊断结果分析

借助水文变异诊断系统，对研究站点的年径流量、年输沙量序列进行变异分析，以石鼓站年输沙量序列为

例,在初步诊断序列存在中变异后,进行跳跃和趋势的详细诊断。多种跳跃诊断方法均显示有显著性跳跃发生,其中滑动 T、Lee-Heghinan、有序聚类、滑动秩和、Mann-kendall、BAYES 等多种检验方法得到变异点为 1997 年,而三种趋势检验方法得到序列可能存在趋势变异的结果。最后进行综合诊断,通过比较跳跃和趋势变异形式的效率系数,确定该序列为跳跃变异,变异点为 1997 年。各站诊断结果如表 2 所示。

金沙江上游石鼓站水沙量年际间呈波动性变化,水量无明显趋势性变化,沙量在 1997 年发生方向向上的跳跃弱变异(见图 3(a)),多年平均径流量和输沙量分别为 427 亿 m³ 和 2730 万 t,2021 年径流量和输沙量分别为 449 亿 m³ 和 2140 万 t,水量偏大 5.2%,沙量偏少 21.6%。与 2020 年相比,径流量仅偏小 12.9%,但输沙量偏少达 65.9%。2021 年输沙量减少可能与金沙江上游水库建设有一定关系,金沙江上游巴塘至石鼓长约 965 km,规划采用 13 级开发。叶巴滩、巴塘电站已分别于 2019 年、2020 年实现大江截流,苏洼龙水电站于 2021 年 1 月 31 日成功下闸蓄水,拉哇水电站于 2021 年 11 月 29 日实现大江截流。

Table 2. Variant diagnostic results
表 2. 变异诊断结果

水文站点	水沙序列变异时间点(变异强度)	
	年径流量	年输沙量
石鼓	无变异	1997↑中变异
攀枝花	1997↑中变异	2010↓强变异
白鹤滩	无变异	2002↓中变异
向家坝	无变异	2010↓强变异

攀枝花站水沙量年际间呈波动性变化,水量在 1997 年发生方向向上的跳跃中变异,沙量在 2010 年发生方向向下的跳跃强变异(见图 3(b))。2011~2021 年,攀枝花站年平均径流量和输沙量分别为 570 亿 m³ 和 590 万 t,径流量与多年均值基本相当,但输沙量较多年均值偏少 86.4%。2011 年后输沙量减少与金沙江中游水库建设有一定关系,共 6 个梯级水库自 2010 年相继建成和运行后(梨园(2014 年 11 月)、阿海(2011 年 12 月)、金安桥(2010 年 11 月)、龙开口(2012 年 11 月)、鲁地拉(2013 年 4 月)、观音岩(2014 年 10 月)),来自于金沙江上游和中游的泥沙基本被这 6 级水库拦截,使得攀枝花站径流量变化不大,但输沙量大幅度减少。

白鹤滩站水量序列无明显趋势性变化,沙量在 2002 年发生方向向下的跳跃中变异(见图 3(c))。2011~2021 年,白鹤滩站年平均径流量和输沙量分别为 1210 亿 m³ 和 6705 万 t,径流量与多年均值基本相当,但输沙量较多年均值偏少 57%。2021 年,白鹤滩站径流量和输沙量分别为 1055 亿 m³ 和 438 万 t,水量偏小,沙量减少明显。与 1998 年前均值相比,水量偏小 13.5%,沙量偏少 97.5%;与 1998~2010 年均值相比,水量偏小 23.6%,沙量则偏少 96.8%;与 2011~2021 年均值相比,水量偏小 12.8%,沙量则偏少 93.5%。与白鹤滩电站可研阶段设计采用值(径流量 1321 亿 m³,输沙量 16,800 万 t)相比,水量偏小 20.1%,沙量偏少 97.4%。受上游白鹤滩电站蓄水的影响,2021 年白鹤滩站的输沙量变化明显,与 2020 年相比偏少 90.0%。

向家坝站水量序列无明显趋势性变化,沙量在 2010 年发生方向向下的跳跃强变异(见图 3(d))。2011~2021 年,向家坝年平均径流量和输沙量分别为 1353 亿 m³ 和 1985 万 t,径流量较多年均值偏小 4.7%,但输沙量较多年均值减少 90.4%。近年来,受上游水库拦蓄作用,该站沙量大幅减少,如 2020 年、2021 年输沙量分别为 125、109 万 t,不足多年均值 1%的水平。

4.2. 变异归因分析

石鼓、白鹤滩、向家坝年径流量未发生变异,此结果也同已有研究成果[3]较为一致。张海荣等[9]分析了金

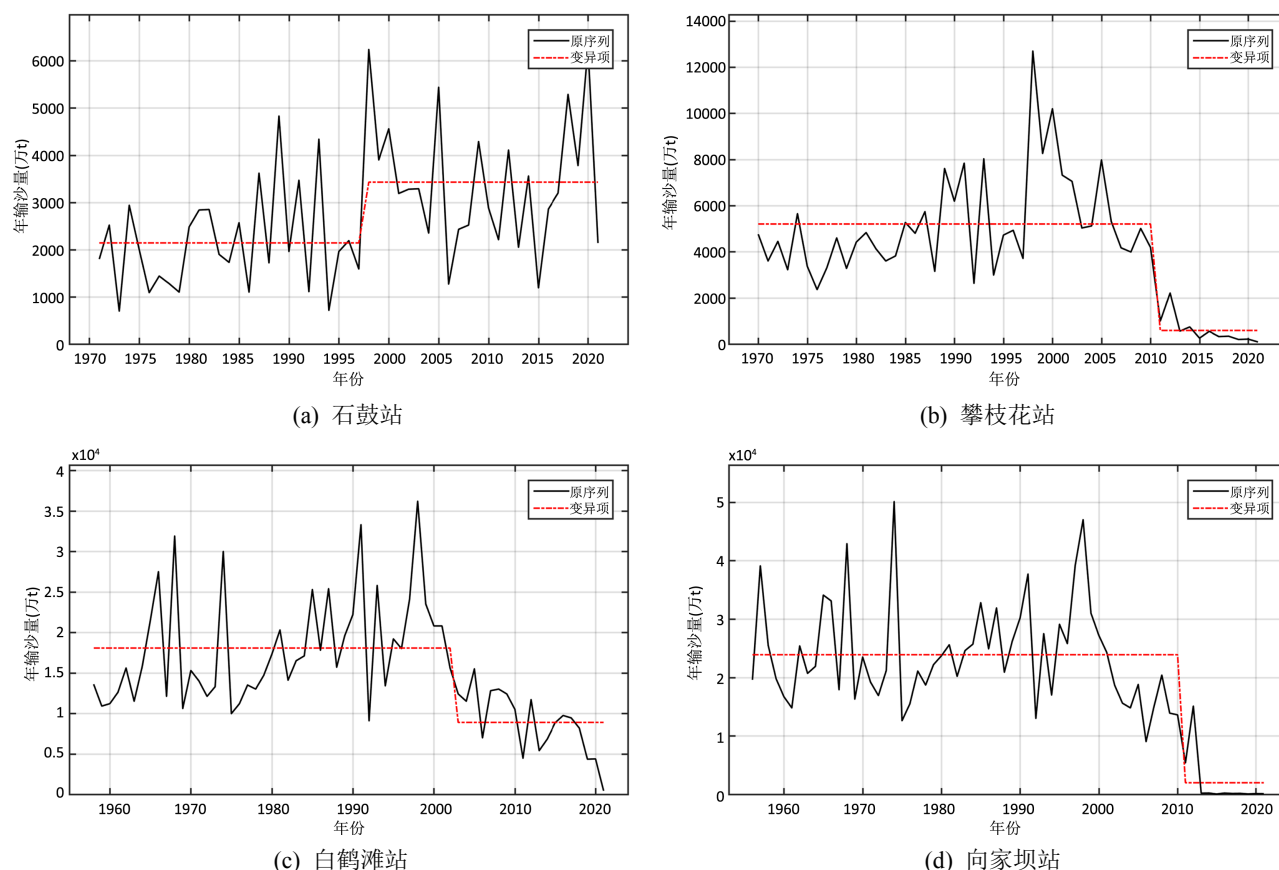


Figure 3. Variation diagram of sediment sequence

图 3. 输沙量序列变异图

沙江流域 1966~2010 年降水和径流资料, 得到攀枝花站集水区域的面平均年降水趋势存在突变点, 在 1997 年之后显著增加的结论。降水量的变化可能导致了径流变化, 致使攀枝花站年径流发生向上的突变。

已有研究表明[10], 基于 1961~2017 年长江流域逐日降水量资料, 金沙江石鼓以上易发生极端多雨事件, 除 1993 年外均发生在 1998 年(含)以后; 考虑到极值降水是区域侵蚀产沙及河流输沙的主要动力, 石鼓站年输沙量在 1997 年发生向上的跳跃变异, 与极端降水的增加可能存在一定的关联。袁晶等[11]基于 1956 年以来流域内水库及实测水沙资料, 分析了金沙江流域水库拦沙情况, 得到 2011 年以来, 随着金沙江中下游以及雅砻江梯级水库群的陆续建成, 流域内水库群年均拦沙量达 1.92 亿 t, 对屏山站同期年均输沙量的减少权重在 90%以上的结论。故因金沙江中游水库建设的影响, 可能导致攀枝花、向家坝站年输沙量在 2010 年发生向下的跳跃变异。比较两站跳跃变异的计算过程, 攀枝花站跳跃综合权重为 0.91 大于向家坝站的 0.70, 跳跃综合显著性前者为 6 较后者的 4 更大, 考虑两站点的地理位置分布情况, 攀枝花站距金沙江中游水库更近, 因此其输沙量受影响的程度更为显著。而对于白鹤滩站的年输沙量, 有研究表明[3]攀枝花至华弹区间年输沙量显著减少, 在 2003 年出现向下的突变点, 故白鹤滩站输沙量因区间来沙减小, 提前发生了变异。

考虑到金沙江上游苏洼龙、叶巴滩、巴塘、拉哇等电站, 下游乌东德、白鹤滩电站投入运营不久的情况, 今后一段时期有必要进一步加强观测, 进行水沙序列分析, 总结得到水库建设后研究区域水沙序列的最新规律。

5. 结论

为探讨金沙江中下游干流、支流雅砻江梯级水电站相继建成运行对金沙江下游水沙情势的影响, 本文借助

水文变异诊断系统, 基于石鼓、攀枝花、白鹤滩(华弹)、向家坝(屏山)等水文站长系列的年径流量、年输沙量数据, 开展数据统计与序列变异分析, 得到研究结论如下:

1) 2011~2021 年, 研究站点年径流量与多年均值相比变化程度不大, 而输沙量除石鼓外均明显减少, 攀枝花、白鹤滩、向家坝输沙量分别为 590、6705、1985 万 t, 较之多年均值沙量分别偏少 86.4%、57.0%、90.4%。表明金沙江下游水沙关系发生明显变化, 主要体现在径流量总体变化不大, 但输沙量明显减少。

2) 对于研究四站点, 年输沙量整体变异强度为中、强, 年径流量为无、中变异, 输沙量的变化更加明显。石鼓、白鹤滩、向家坝站年径流量序列未发生变异, 受流域面平均降水突变式跃升的影响, 攀枝花站年径流量序列在 1997 年发生向上的跳跃变异。因极端降水增加致使产沙变大, 石鼓站年输沙量在 1997 年发生向上的跳跃变异; 因金沙江中游水库建设的影响, 攀枝花、向家坝站年输沙量在 2010 年发生向下的跳跃变异; 因攀枝花至华弹区间年输沙量显著减少, 白鹤滩站年输沙量在 2002 年发生向下的跳跃变异。

基金项目

研究内容得到长江水科学研究联合基金(U2040218)资助。

参考文献

- [1] 朱玲玲, 陈翠华, 张继顺. 金沙江下游水沙变异及其宏观效应研究[J]. 泥沙研究, 2016(5): 20-27.
ZHU Lingling, CHEN Cuihua and ZHANG Jishun. Study on variations of runoff and sediment and effect to the lower Jinsha River. Journal of Sediment Research, 2016(5): 20-27. (in Chinese)
- [2] 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 Leilei, DONG Xianyong, DU Zedong, et al. Processes of water-sediment and deposition in cascade reservoirs in the lower reach of Jinsha River. Journal of Sediment Research, 2019, 44(3): 24-30. (in Chinese)
- [3] 刘尚武, 张小峰, 许全喜, 等. 近 50 年来金沙江流域悬移质输沙特性研究[J]. 泥沙研究, 2020, 45(3): 30-37.
LIU Shangwu, ZHANG Xiaofeng, XU Quanxi, et al. Transport characteristics and contributing factors of suspended sediment in Jinsha River in recent 50 years. Journal of Sediment Research, 2020, 45(3): 30-37. (in Chinese)
- [4] 杜泽东, 董先勇, 张锋, 等. 金沙江溪洛渡水库水沙特征及泥沙冲淤规律[J]. 泥沙研究, 2022, 47(2): 22-28.
DU Zedong, DONG Xianyong, ZHANG Feng, et al. Study on runoff and sediment characteristics and reservoir deposition in Xiluodu Reservoir of the Jinsha River. Journal of Sediment Research, 2022, 47(2): 22-28. (in Chinese)
- [5] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 水文变异诊断系统[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 85-91.
XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu, et al. Hydrological alteration diagnosis system. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 85-91. (in Chinese)
- [6] 谢平, 唐亚松, 陈广才, 等. 西北江三角洲水文泥沙序列变异分析——以马口站和三水站为例[J]. 泥沙研究, 2010(5): 26-31.
XIE Ping, TANG Yasong, CHEN Guangcai, et al. Variation analysis of hydrological and sediment series in North River and West River Delta: Case study of Makou Station and Sanshui Station. Journal of Sediment Research, 2010(5): 26-31. (in Chinese)
- [7] 孙思瑞, 谢平, 赵江艳, 等. 洞庭湖三口洪峰流量和水位变异特性分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(3): 812-824.
SUN Sirui, XIE Ping, ZHAO Jiangyan, et al. Variability in the annual flood peak discharge and water level in three outlets of Lake Dongting. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(3): 812-824. (in Chinese)
- [8] 谢平, 陈广才, 雷红富. 基于 Hurst 系数的水文变异分析方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(1): 32-39.
XIE Ping, CHEN Guangcai and LEI Hongfu. Hydrological alteration analysis method based on Hurst coefficient. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(1): 32-39. (in Chinese)
- [9] 张海荣, 周建中, 曾小凡, 等. 金沙江流域降水和径流时空演变的非一致性分析[J]. 水文, 2015, 35(6): 90-96.
ZHANG Hairong, ZHOU Jianzhong, ZENG Xiaofan, et al. Inconsistency analysis of spatial and temporal evolution of precipitation and runoff in Jinshajiang River basin. Journal of China Hydrology, 2015, 35(6): 90-96. (in Chinese)
- [10] 郭广芬, 杜良敏, 肖莺, 等. 长江流域夏季极端降水时空分布特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(2): 235-243.
GUO Guangfen, DU Liangmin, XIAO Ying, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of summer extreme precipitation in the Yangtze River basin. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(2): 235-243. (in Chinese)
- [11] 袁晶, 许全喜. 金沙江流域水库拦沙效应[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 482-491.
YUAN Jing, XU Quanxi. Sediment trapping effect by reservoirs in the Jinsha River basin. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 482-491. (in Chinese)