

三峡工程蓄水后沙市水文站水文要素特性分析

贺延虎, 杜越凌, 闫明路

长江水利委员会水文局荆江水文水资源勘测局, 湖北 荆州

收稿日期: 2022年8月29日; 录用日期: 2022年10月21日; 发布日期: 2022年10月28日

摘要

三峡工程蓄水后,清水下泄,坝下河段水沙特性出现明显变化。本文利用沙市水文站1991年~2021年实测资料,系统分析了蓄水前后测站水位、径流量、悬移质输沙率等水文要素的变化情况。结果表明,三峡工程蓄水后,沙市水文站多年平均水位下降0.95 m,多年平均径流量变化不大,但汛期径流量减少8.5%,而非汛期径流量增加18.5%,多年平均含沙量、多年平均输沙量分别减少85.5%、85.8%,流量测验断面形态保持稳定,但是冲刷明显,2003~2021年左侧深泓(代表垂线200 m)冲深7.7 m,右侧边滩(代表垂线900 m)冲深4.0 m。研究成果可以为测验方式方法创新、河道治理、防洪规划等提供参考。

关键词

水沙特性, 沙市水文站, 三峡工程, 蓄水影响

Analysis on the Characteristics of Hydrological Elements in Shashi Hydrological Station after Three Gorges Reservoir Impounded

Yanhu He, Yueling Du, Minglu Yan

Bureau of Jingjiang Hydrology and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Jingzhou Hubei

Received: Aug. 29th, 2022; accepted: Oct. 21st, 2022; published: Oct. 28th, 2022

Abstract

After the Three Gorges Reservoir (TGR) impounded, the water and sand characteristics of the river

作者简介: 贺延虎, 河南洛阳人, 1981年12月出生, 本科, 工程师, 主要从事水文测验、整编工作。Email: 23732411@qq.com

section under the dam have changed significantly due to the release of clear water. This paper uses the measured data of Shashi Hydrological Station (SHS) from 1991 to 2021 to systematically analyze the changes of hydrological elements such as water level, runoff, and sediment transport rate at the station before and after impoundment. The results show that after the impoundment of the TGR, the multi-year average water level of the SHS decreased by 0.95 m, and the multi-year average runoff did not change much. The multi-year average sediment concentration and sediment transport decreased by 85.5% and 85.8% respectively. The flow test section shape remains stable, but the erosion is obvious. From 2003 to 2021, the deep shoal on the left (representing the vertical line of 200 m) is 7.7 m deep, and for the right side beach (representing the vertical line of 900 m), the drawing depth is 4.0 m. The research results can provide reference for the innovation of testing methods, river management, flood control planning, etc.

Keywords

Water Characteristics, Shashi Hydrological Station, Three Gorges Reservoir, Impoundment 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

沙市水文站是长江中游干流重要控制站，国家基本水文站，担负着为长江中下游防洪、荆江河段及洞庭湖的整治、流域水资源合理规划及调配等提供水文资料的责任，其水文要素的变化将直接影响到防洪安全、水资源利用以及航运的规划决策。三峡工程蓄水后，对荆江河段年径流量影响不大，但是对径流的年内分配有一定影响，对沙市水文站的主要影响表现为：多平平均水位下降 0.95 m，年最低水位不断刷新；枯季流量增大，汛期流量减小，年内变幅减小；清水下泄，测验断面被冲刷，流量单值化关系持续右偏；多年平均输沙量较蓄水前减少 85.8%，非汛期悬移质含沙量几乎为零等系列问题。三峡工程蓄水运用之后，不少专家学者对大坝蓄水前后坝下游河段的水沙与河道冲淤特性进行了分析研究[1] [2] [3] [4] [5]，成果较为丰富。本文借鉴已有研究结论，利用沙市水文站 1991~2021 年实测资料，对三峡工程蓄水前(1991~2002 年)后(2003~2021 年)测验断面水、沙变化、断面冲淤趋势进行分析，进一步提炼了沙市水文站水文特性。

2. 测站概况

沙市水位站设立于 1933 年 01 月，位于湖北省荆州市沙市区二郎矶，1991 年 01 月由水位站改为水文站，开始流量、悬移质输沙、悬移质颗粒分析等项目观测。流量测验断面形状偏“U”型，河床由沙质和黏土组成，断面位于长江中游荆江河段，其径流及泥沙主要来自上游长江干、支流，所处河段内除沮漳河入汇、引江济汉渠和太平口分流外(分、汇流量相对长江干流较小)，无其它分汇流。断面上游 3.5 km 的三八滩、下游 3.6 km 的金城洲的分流分沙作用及洲滩形态变化对本断面主泓摆动和冲淤影响较大。

长江三峡水利枢纽工程于 1994 年 12 月正式开工，2003 年 6 月初期蓄水，2010 年首次蓄水至高水位 175 m。蓄水运用后，大量泥沙拦蓄库内。清水下泄，坝下游河道水流处于不饱和状态，水流为寻求泥沙补给，持续冲刷河床，综合作用下水文要素发生明显变化。利用沙市站 1991~2021 年的实测资料统计，蓄水运用后的 2003~2021 年多年平均冻结水位较蓄水前下降 0.95 m，多年平均径流量变化不大，但是多年平均含沙量、输沙量分别减少达 85.8%、85.5%。详见表 1。

Table 1. Statistics of water and sediment characteristic values in Shashi hydrologic station

表 1. 沙市水文站水沙特征值统计

项目	冻结水位 m	流量 m ³ /s	径流量 10 ⁸ m ³	输沙量 10 ⁸ t	输沙率 t/s	含沙量 kg/m ³	中值粒径 mm
蓄水前(多年平均)	35.36	12,667	3996	35,500	11,251	0.875	0.014
蓄水后(多年平均)	34.41	12,456	3930	5039	1596	0.127	0.024
变化量	-0.95	-1.7%	-1.7%	-85.8%	-85.8%	-85.5%	0.010

3. 研究方法

三峡水库在汛期主要通过拦蓄洪峰流量以及河川径流来削峰、调峰，从而减小坝下河段抗洪压力。非汛期或枯水期则根据需要调控出库流量，以达到加大通航能力或是抗旱的目的。由于三峡大坝的拦截，部分泥沙在库区沉积，受此影响，坝下河段水文要素由原来的自然流态下的特征发生了较大的变化。以沙市测验断面为例，同流量级下水位降低、流量单值化关系持续右偏(尤其是中低水以下)、含沙量和输沙量大幅减少、同水位级下面积增大等。

3.1. 水位、流量变化

3.1.1. 年最低水位最小流量变化分析

统计 1998~2021 年历年最低水位和最小流量，点绘对比图(图 1)。由图可以看出，三峡工程蓄水前年最低水位与年最小流量变化基本相应。蓄水初期，受三峡调控影响，年最小流量保持在 4000~5000 m³/s 之间，最低水位与最小流量略有背离，但是依然相应。自 2010 年开始，年最小流量在维持在 6000 m³/s 左右，年最低水位成“剪刀叉”式背离向下，2003~2019 年最低水位下降 1.39 m。三峡工程蓄水后，对沙市断面最低水位影响明显，尤其是成功蓄水 175 m 后，年最低水位持续刷新，到目前为止，依然有出现新低的趋势。

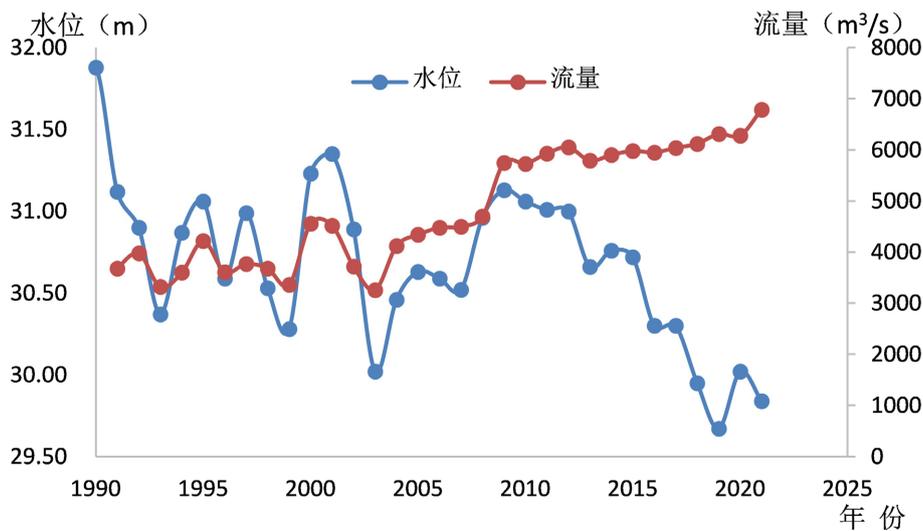


Figure 1. Comparison chart of minimum water level and minimum flow changes from 1991 to 2021

图 1. 1991~2021 年最低水位、最小流量变化对比图

3.1.2. 流量、径流量变化

通常情况下，每年 6 月份三峡大坝通过放水增大库容，为主汛期防汛作好准备。主汛期出现大洪水时，通过控制下泄量，拦蓄一部分洪水达到防汛的目的。汛后根据来水情况，在 9 月、10 月份开始蓄水，保证发电以

及枯水期抗旱、通航的需要。大坝蓄水前, 自然河流状态下, 年径流量主要集中在主汛期, 而大坝蓄水后, 通过调蓄调度很大程度上改变了年径流量的年内分布。

根据统计分析, 沙市站 2003 年 6 月以后多年平均径流量与蓄水前(1991~2002 年)多年平均相比较减少 1.7%, 总体变化不大; 蓄水前后, 月平均流量、月平均径流量的年内分布变化特征相同, 表现为汛期(5~10 月)减少, 分别减少 10.1%、8.2%, 非汛期(1~4 月、11~12 月)增加, 分别增加 15.9%、18.5%, 如表 2 所示。

Table 2. Statistics of monthly average flow and runoff at Shashi hydrological station

表 2. 沙市水文站月平均流量、径流量统计

月份	蓄水前		蓄水后		月径流量变化%
	月平均流量 m^3/s	月径流量 10^8 m^3	月平均流量 m^3/s	月径流量 10^8 m^3	
1	4905	131	6311	175	33.2
2	4484	108	6047	149	37.4
3	5051	135	6664	183	35.3
4	6988	181	8481	225	24.2
5	11,075	297	12,378	330	11.2
6	17,017	441	15,818	411	-6.8
7	26,850	719	23,294	635	-11.7
8	24,192	648	20,449	567	-12.5
9	19,667	510	18,182	487	-4.5
10	15,208	407	12,344	344	-15.5
11	9680	251	9228	243	-3.2
12	6234	167	6541	179	7.2
1~4 月、11~12 月	6224	162	7212	192	18.5
5~10 月	19,001	504	17,078	462	-8.2
年均	12,667	3996	12,456	3930	-1.7

3.2. 含沙量、输沙量变化

据沙市(新厂)站 1955~2021 年水文资料统计, 本河段一般不存在小水大沙年; 水沙年内分配极不均匀。沙市站 2003 年 6 月以后月平均含沙量、月平均输沙量较蓄水前(1991~2002 年)均大幅减少, 减少幅度均在 50.0% 以上。多年平均含沙量、多年平均输沙量较蓄水前分别减少 85.5%、85.8%, 详见表 3。尤其 2014 年后, 年输沙量多年处在 3000 万 t 以下, 与蓄水前多年平均输沙量相比, 占比不足十分之一, 预计这一现状还将继续出现。

Table 3. Statistics of monthly average sediment content and sediment transport rate at Shashi hydrological station

表 3. 沙市水文站月平均含沙量、输沙率统计

月份	蓄水前		蓄水后		月平均含沙量变化%	月平均输沙率变化%
	月平均含沙量 kg/m^3	月平均输沙量 10^4 t	月平均含沙量 kg/m^3	月平均输沙量 10^4 t		
1	0.086	427	0.031	163	-64.2	-61.8
2	0.073	331	0.033	166	-54.5	-50.0
3	0.086	462	0.039	212	-55.0	-54.1

Continued

4	0.181	1269	0.058	397	-67.7	-68.7
5	0.362	4332	0.066	722	-81.7	-83.3
6	0.876	15,253	0.099	1408	-88.7	-90.8
7	1.482	41,550	0.273	5582	-81.6	-86.6
8	1.363	35,146	0.213	4896	-84.4	-86.1
9	1.023	21,410	0.178	2703	-82.6	-87.4
10	0.632	9743	0.055	664	-91.3	-93.2
11	0.311	5463	0.034	281	-89.0	-94.8
12	0.122	777	0.026	152	-78.4	-80.4
1~4 月、11~12 月	6.596	1455	1.105	229	-83.2	-84.3
5~10 月	5.738	21,239	0.884	2662	-84.6	-87.5
年平均	0.875	35,500	0.127	5039	-85.5	-85.8

3.3. 中值粒径变化

中值粒径，是泥沙分析时样品的累计粒度分布百分数达到 50%时所对应的粒径，它的物理意义是粒径大于它的颗粒占 50%，小于它的颗粒也占 50%。三峡工程蓄水后，泥沙被拦截，清水下泄，坝下河段在缺少泥沙补给的情况下，河床冲刷成为补给重要来源。受此影响，沙市水文站悬移质泥沙多年平均中值粒径由蓄水前(1991~2002 年)的 0.014 mm 增大到蓄水后(2003~2021 年)的 0.024 mm。由此看出，蓄水后的沙市断面泥沙较蓄水前明显粗化，并且从趋势上看，这一变化仍在加剧。蓄水前后沙市测验断面悬移质中值粒径变化过程如图 2 所示。

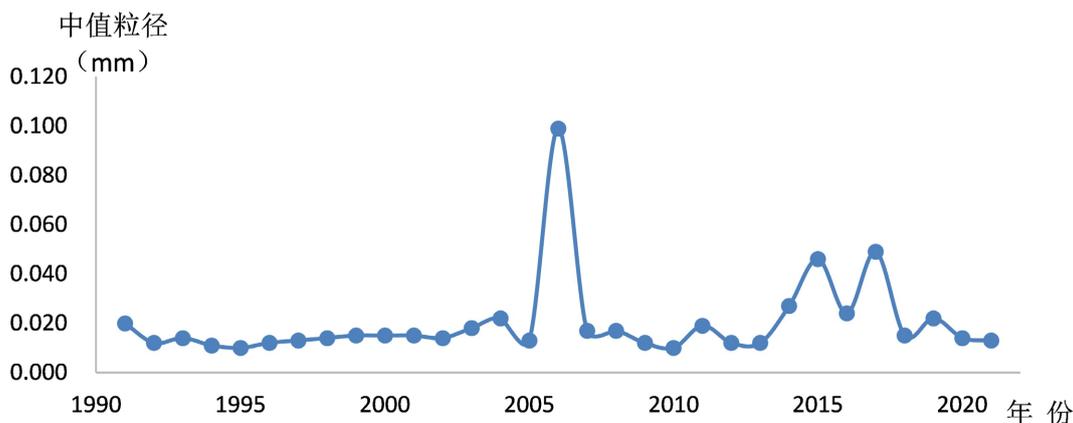


Figure 2. Changes in median particle size before and after water storage
图 2. 蓄水前后中值粒径变化图

4. 断面冲淤变化

水流作用于断面河床，使河床发生变化；河床也反过来作用于水流，影响水流的结构。而水流与河床的相互作用，是通过泥沙运动的纽带作用来达到和体现。挟带泥沙的水流，在一种情况下，通过泥沙的淤积，使河床抬高，过水断面面积减小；在另一种情况下，通过泥沙的冲刷，使河床降低，过水断面面积增大。因此，泥沙不仅是水流的组成部分，而且还是河床组成部分。

4.1. 年内断面冲淤变化

统计多年汛前、主汛后(年最大洪水过后)两次大断面成果,将年内大断面图进行对比。分析发现,当出现 $40,000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右流量级时,当年的大断面多表现为“冲槽淤滩”,代表年份如2004年、2014年、2020年等;如果当年最大流量在 $30,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下时,大断面变化则多表现为“冲滩淤槽”,代表年份如2006年、2011年、2017年等。同时,次年如果未出现极端水情沙情,大断面的冲淤变化则会稍做修复。综合来看,沙市断面年内变化冲淤互现,如图3、图4所示。

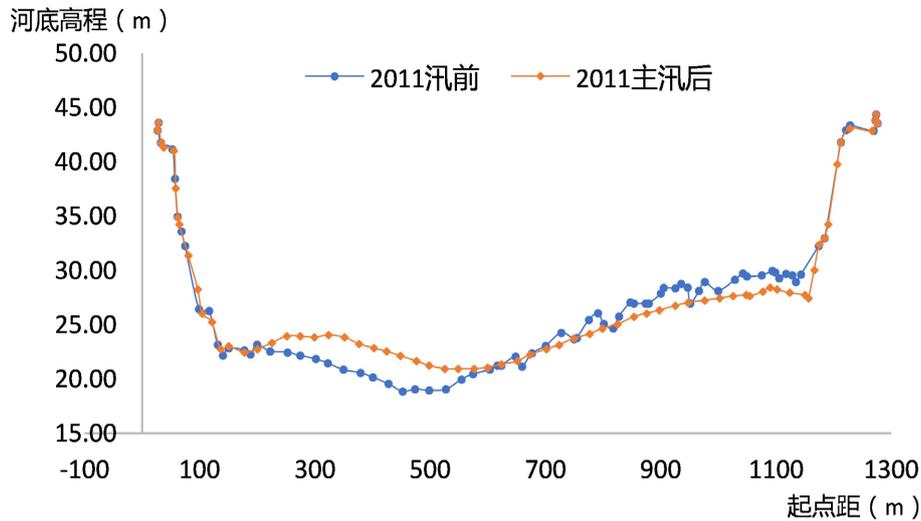


Figure 3. Comparison chart of large sections before and after the main flood in 2011

图3. 2011年汛前、主汛后大断面对比图

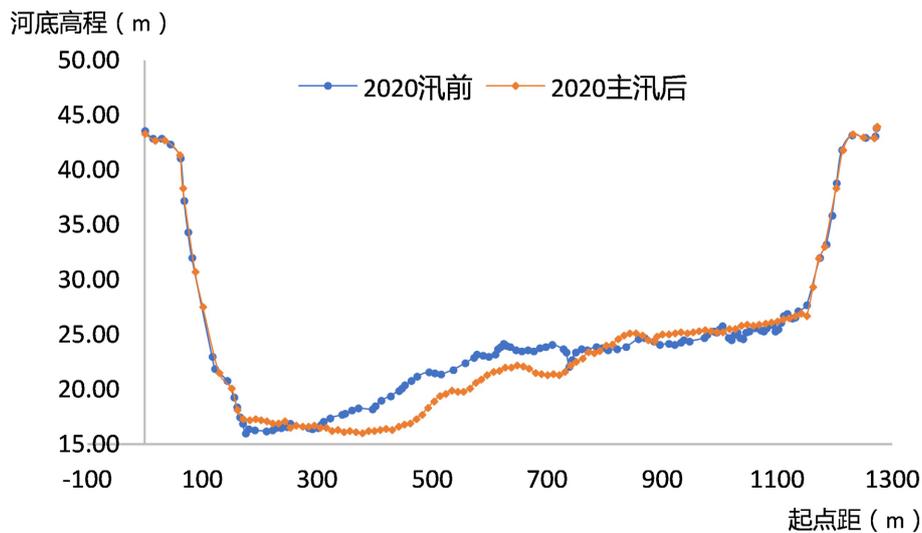


Figure 4. Comparison of large sections before and after the main flood in 2020

图4. 2020年汛前、主汛后大断面对比图

4.2. 38 m 以下面积、年输沙量变化

采用1998年至2021年汛后大断面数据,计算水位面积关系,选取水位38 m(中水期中值水位、冻结吴淞基面)时对应测验断面面积,点绘变化过程图,与年输沙量变化过程做对比(图5),输沙量的减少程度可以反映

出测验断面的冲刷程度。

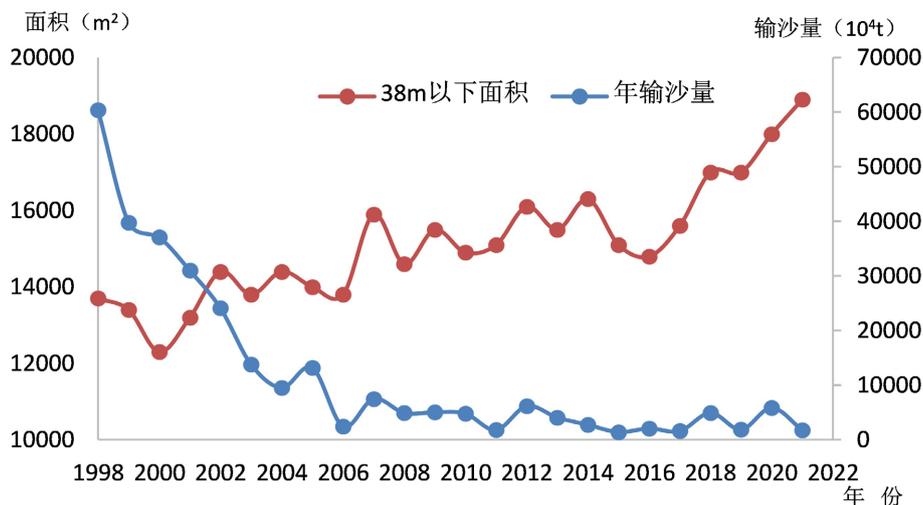


Figure 5. Comparison diagram of area change and annual sediment discharge of discharge measurement section (Below 38 m Water Level)
图 5. 流量测验断面(水位 38 m 以下)面积变化、年输沙量对比图

从多年趋势分析来看,自 2003 年三峡工程蓄水以来,水位 38 m (冻结吴淞)以下断面面积持续变大,断面持续冲刷的趋势明显(图 5)。尤其自 2018 年至 2021 年最近四年,有冲刷加剧的趋势,以每年约 800 m² 的冲刷面积值递增。与年输沙量相对应,2003~2010 年多平均输沙量为 7663 万 t,2011~2021 年多年平均输沙量为 3131 万 t,减少 59.1%。

统计分析多年大断面数据,三峡工程蓄水初期(2003 年~2013 年),沙市流量测验断面右岸边滩冲刷更为明显,代表垂线 900 m 冲 4.8 m,主槽则冲淤互现;2013 年之后,主槽冲刷加剧,代表垂线 200 m 冲 6.2 m、500 m 冲 5.7 m,右侧边滩则相对稳定,代表垂线河底高程变化趋势见图 6。

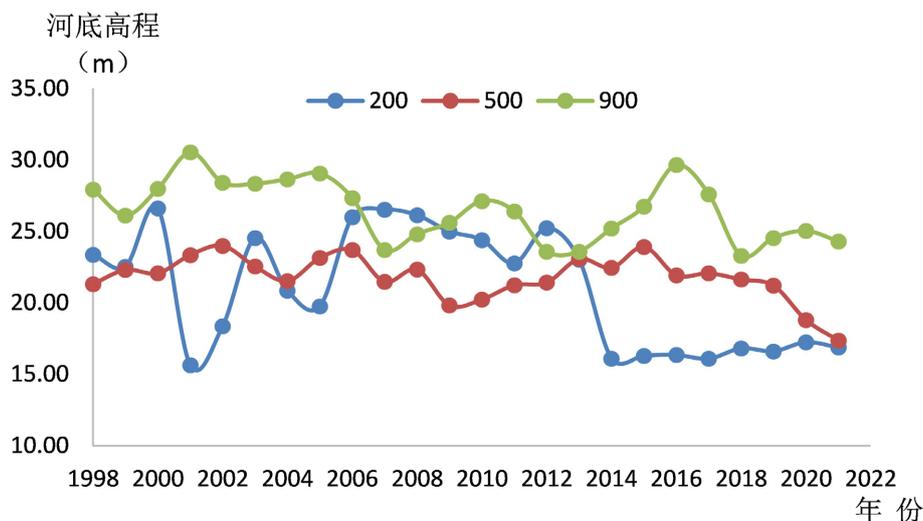


Figure 6. Main channel (200 m, 500 m) and right bank beach (900 m) river bottom elevation change
图 6. 主槽(200 m, 500 m)、右岸边滩(900 m)河底高程变化

综合来看,三峡工程蓄水后,上游来沙减少,年输沙量减少,水流的挟沙能力增大,势必带动河床表面的

泥沙向下游运动, 在没有泥沙形成有效补充的情况下, 河床则被冲刷。近几年的实测资料表明, 本断面实测含沙量和年输沙量大幅减少, 河床得不到有效补充和修复, 继续向下冲刷的可能性很大。

5. 结论

1) 三峡工程蓄水前后, 沙市水文站多年平均水位降低 0.95 m, 多年平均径流量没有明显变化, 但年内分布变化明显, 汛期 6 个月(5~10 月)多年平均径流量减少 8.2%, 非汛期 6 个月, 多年平均径流量增大 18.5%; 受大坝拦截影响, 泥沙变化较大, 多年平均含沙量、多年平均输沙量分别减少 85.5%、85.8%。同时, 从泥沙中值粒径的变化可以看出, 蓄水后泥沙粗化明显, 并且变化趋势有可能加剧。

2) 沙市水文站流量测验断面位于长江中游荆江河段, 堤防条件良好, 堤岸对水流控制作用较好, 测验断面在顺直河段中间, 水流形态比较稳定, 主泓摆动幅度不大。测验断面遵从“涨冲落淤”的普遍规律, 年内变化表现为冲淤互现, 而多年冲淤变化的趋势以冲刷为主导, 2003~2021 年间主槽冲刷达 7.7 m、边滩冲刷达 4.0 m, 全断面冲刷明显。

综合来看, 三峡工程蓄水后, 坝下游河段长期形成的水沙条件发生改变, 河床在调整的过程中, 水文要素的特性、断面河床的冲淤也随之发生了改变, 对水文测验方式方法及测验成果精度等带来了挑战。由于河床调整和重塑是一个长期的演变过程, 沙市水文站应加强水文要素监测, 及时地分析总结, 以便适时地改变测验方式方法, 提高测验精度和成果质量, 为长江防洪治理、水资源规划等提供水文资料。

参考文献

- [1] 许全喜, 朱玲玲, 袁晶. 长江中下游水沙与河床冲淤变化特性研究[J]. 人民长江, 2013, 44(23): 16-21.
XU Quanxi, ZHU Lingling and YUAN Jing. Research on water-sediment variation and deposition-erosion in middle and lower Yangtze River. Yangtze River, 2013, 44(23): 16-21. (in Chinese)
- [2] 许全喜. 三峡工程蓄水运用前后长江中下游干流河道冲淤规律研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 146-154.
XU Quanxi. Study of sediment deposition and erosion patterns in the middle and downstream Changjiang mainstream after impoundment of TGR. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 146-154. (in Chinese)
- [3] 熊明, 许全喜, 袁晶. 三峡水库初期运用对长江中下游水文河道情势影响分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 120-125.
XIONG Ming, XU Quanxi and YUAN Jing. Study of the influences of Three Gorges project's initial operation on river regime of the middle and lower Yangtze River. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 120-125. (in Chinese)
- [4] 卢金友, 黄悦, 王军. 三峡工程蓄水运用后水库泥沙淤积及坝下游河道冲刷分析[J]. 中国工程科学, 2011, 13(7): 129-136.
LU Jinyou, HUANG Yue and WANG Jun. The analysis on reservoir sediment deposition and downstream river channel scouring after impoundment and operation of TGP. China Engineering Science, 2011, 13(7): 129-136. (in Chinese)
- [5] 陈建湘, 彭艳明. 三峡工程蓄水前 10 年螺山断面泥沙特性浅析[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2006(1): 12-14.
CHEN Jianxiang, PENG Yanming. A simple analysis of the sediment feature at Luoshan section during the 10 years before the storage of the Three Gorges project. Journal of Changjiang Engineering Vocational College, 2006(1): 12-14. (in Chinese)