

三峡水库蓄水后上下游河段水沙特性 变化及影响因素分析

毛海涛^{1,2}, 王正成¹, 林荣³, 邹敏⁴

(1. 重庆三峡学院 土木工程学院, 重庆 404100; 2. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038;
3. 巫溪县后溪河水电开发有限公司, 重庆 405806; 4. 长江水利委员会水文局 长江上游水文水资源勘测局, 重庆 400021)

摘要: 泥沙淤积问题是三峡工程的关键技术问题之一, 关系着长江水资源的开发利用、生态环境保护、经济发展。基于2002-2016年期间, 三峡水库上、下游设置的11所重要控制性水文站水文泥沙监测资料, 深入系统地探讨水文泥沙参量的变化特征, 进一步分析水文泥沙参量的相关性和三峡水库的冲淤特性, 探究了泥沙特性变化的原因。研究表明: 三峡水库自施工期蓄水、初期蓄水、试验性蓄水的整个过程, 对三峡水库上下游河道的水沙特性影响较大。越靠近三峡大坝的河段, 受三峡水库的影响越大; 三峡水库抬高水位, 导致上游大部分河道流速变小, 河道过水断面和水动力条件发生改变, 导致入库泥沙越来越少, 越来越细; 三峡水库上游长江干流和支流上修建的梯级电站拦蓄了大量的泥沙, 年输沙量、年均含沙量、中值粒径、年输沙模数都显著降低。年径流量和输沙量、年均含沙量、年输沙模数在2004-2013年间具有较好的相关性, 曲线变化规律类似, 2013年后受三峡水库蓄水的影响, 出现弱相关; 年径流量能表征泥沙参量的变化特性; 年输沙量和年均含沙量在2002-2016年间皆具有较好的相关性。2007年前三峡水库淤积量呈增长趋势, 其后三峡水库泥沙淤积量逐渐降低。在水库冲淤和泥沙特性方面, 汛期三峡水库水位对其影响较大; 枯水期的高水位对其影响并不大。研究成果将为长江流域梯级电站和航道的规划设计、三峡水库的运行管理提供理论支撑。

关键词: 水库蓄水; 泥沙淤积; 年径流量; 水沙特性; 三峡水库; 长江

中图分类号: TV147

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0161-09

Analysis of water – sediment characteristics and influence factors of upper and lower river reaches before and after impoundment of Three Gorges Reservoir

MAO Haitao^{1,2}, WANG Zhengcheng¹, LIN Rong³, ZOU Min⁴

(1. College of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China; 2. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. Wuxi Houxihe Hydropower Development Limited Company, Chongqing 405806, China; 4. Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of the Upper Yangtze River, Changjiang Water Resources Commission, Chongqing 400021, China)

Abstract: The deposition of sediment is one of the key technical problems of the Three Gorges Project, which is related to utilization of water resources in Yangtze River, ecosystem and environmental protection and economic development. This article obtained hydrological and sediment monitoring data of 11 important control hydrological stations from 2002 to 2016 at the upper and lower reach of the Three Gorges Reservoir, systematically studied the variation characteristics of hydrology and sediment parameters, correlation between hydrologic and sediment parameters, erosion and deposition characteristics of the Three Gorges Reservoir, and explored the reasons for the change of sediment characteristics. The results showed that the water storage of the Three Gorges Reservoir includes impounding during construction, early and trial impounding, which has a great influence on the water – sediment characteristics of upper and lower

收稿日期: 2019-05-20; 修回日期: 2019-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602367); 重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2018jcyjAX0673); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1601017)

作者简介: 毛海涛(1980-), 男, 山西平陆人, 博士, 教授, 硕士生导师, 从事河流泥沙研究工作。

通讯作者: 王正成(1991-), 男, 重庆开州人, 硕士, 实验师, 从事河流泥沙研究工作。

reaches of the Three Gorges Reservoir. The greater the influence is the closer to the dam. The water level was raised by the Three Gorges Reservoir, which caused the velocity of most upstream rivers became smaller, river flow section and hydrodynamic condition changed, the amount of sediment was less and less, and sediment grain size was finer. Cascade hydropower stations were built on the Yangtze River and tributaries on the upper reaches of the Three Gorges Reservoir, a lot of silt has been retained, annual sediment load, annual average sediment concentration, mediansize of sediment, modulus of sediment transport decreased dramatically. Annual runoff and sediment discharge, annual average sediment concentration, modulus of sediment transport had a good correlation during 2004 - 2013, change rule of curves are similar, there was a weak correlation after the impoundment of the Three Gorges Reservoir in 2013. Annual runoff can characterize the change characteristics of sediment parameters. Annual sediment load and annual average sediment concentration had a good correlation during 2004 - 2013. Sediment volume of the Three Gorges Reservoir showed an increasing trend before 2007, and then sediment volume of the Three Gorges Reservoir gradually decreased. The water level of the Three Gorges Reservoir in flood season had a great influence on the scouring and silting, sediment characteristics of reservoir, high water level in the dry season had little effect on them. The results will provide theoretical support for planning and design of cascade hydropower stations and channel in the Yangtze River Basin, operation and management of the Three Gorges Reservoir.

Key words: reservoir impoundment; sediment deposition; annual runoff; water-sediment characteristics; Three Gorges Reservoir; Yangtze River

1 研究背景

泥沙问题是三峡工程的关键技术问题,由于长江流域的雨量十分充沛,流域年产沙量达到 $5.3 \times 10^8 \text{ t}^{[1-2]}$ 。长江上游建设有大型梯级水利水电枢纽,对长江上游河道泥沙影响显著^[3]。此外,枢纽隔断了河流泥沙的连续性,致使下游河道来沙量骤降,下游河道水沙情势发生了较大变化^[4]。可见流域水沙变异、泥沙量骤降或陡增、泥沙重分配的不确定性与复杂性,对于长江水利水电枢纽安全及干流河道治理策略的制定具有显著影响^[5]。

目前,实测资料分析是研究长江泥沙淤积问题的主要方法之一,旨在探明长江泥沙淤积问题、水电站蓄水拦沙作用对泥沙淤积的影响^[6-7]。Dai等^[8]研究表明2003年6月三峡水库蓄水后长江中下游输沙量呈减少趋势。Yang Yunping等^[9-10]提出三峡水库对下游输沙量的影响沿顺水流方向逐渐减小,含沙量的减小趋势一直延续至河口区域。李义天等^[11]基于三峡水库蓄水前数据,预测蓄水后坝下游河床将产生冲刷,沙量恢复过程中各粒径组输沙量不会超过建库前均值。朱玲玲等^[12]提出三峡水库蓄水后,长江干流含沙量锐减。李琼芳等^[13]研究表明水库对河流泥沙的影响与水库库容大小、水库运行方式、研究站点与水库距离的远近有关;极端降雨事件的发生和河道的裁弯取直,会导致含沙量增

大。殷鸿福等^[14]基于长江中游站的监测资料,对长江中游的泥沙淤积问题展开分析。郭小虎等^[15]对比分析了三峡水库蓄水前后不同粒径泥沙的冲刷与淤积规律。

当前的研究主要集中在水沙和数值模型的建立、泥沙沉积规律、泥沙的沉积影响因素、截留泥沙、三峡水库蓄水对长江泥沙的影响等方面。但涉及三峡水库的蓄水过程、上游大型梯级水电站修建及其他影响因素对长江上下游水沙特性的影响规律,还缺乏系统的研究。因此,本文依据三峡水库上、下游重要控制站的水文及泥沙监测资料,从时间和空间上系统梳理长江上下游水沙特性变化规律,探寻不同水文和泥沙参数间的相关性,分析水电站等诸多因素对泥沙的影响,为正确评价泥沙对三峡水库的影响及长江泥沙治理策略的制定提供理论支撑。

2 研究区域概况及数据来源

2.1 研究区域概况

研究区域为起于青海省玉树藏族自治州,至安徽省池州市的长江河段。长江水利委员会和地区水文部门在该区域共设置有直门达、石鼓、攀枝花、向家坝、朱沱、寸滩、宜昌、沙市、汉口、大通、黄帝陵等11个重要控制性水文站。其中①~⑤水文站位于三峡库区上游,下文中统称“上游站”,寸滩站位于

三峡库区;⑦~⑩水文站位于三峡库区下游,下文统称“下游站”,研究区长江流域水文站^[21]及水利水电工程分布示意图如图 1 所示。

研究时段包括了三峡水库从施工期蓄水、初期蓄水到正常蓄水,共计 15 a(2002-2016 年)。三峡水库蓄水过程时间表如表 1 所示。

表 1 三峡库区蓄水水位

蓄水阶段	实施年份	库水位/m
施工期蓄水(2003-2006 年)	2003	135
初期蓄水(2007-2012 年)	2007	156
正常蓄水(2013 年至今)	2013	175

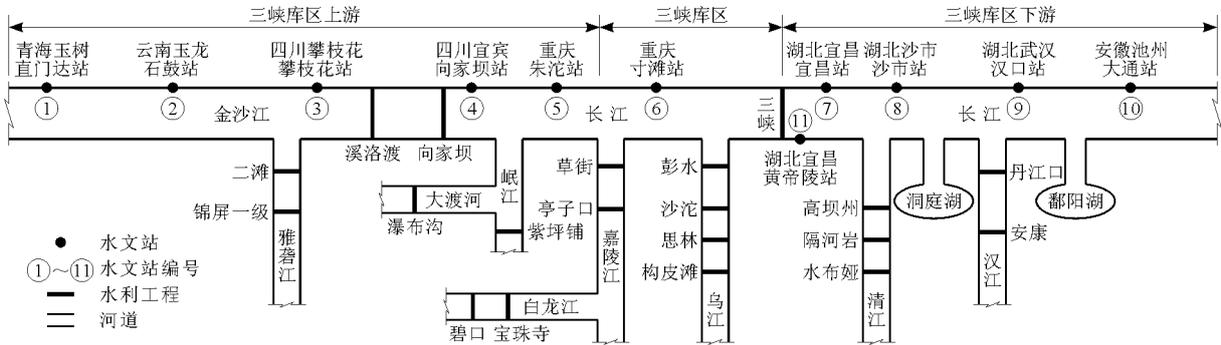


图 1 长江流域水文站及水利水电工程分布示意图

由图 1 可知,研究区域内三峡水库上、下游还修建了许多大型水电站,其中包括锦屏一级和溪洛渡等 10 余座大型水电站的蓄水时间均在三峡水库蓄水之后。

2.2 参数来源

文中收集了三峡水库蓄水以来(2002-2016 年)长江水利委员会设置的重要控制站的观测资料作为数据来源。与本文相关的重要水文泥沙观测项目包括:年径流量、年输沙量、年均含沙量、泥沙中值粒径、年输沙模数、泥沙入库和出库量等数据。基于观测数据,综合考虑各类影响因素,系统地梳理三峡水库上下游水沙特性及变化规律。

3 水文及泥沙特性分析

为了较准确判断三峡水库对水文泥沙等参数的影响,文中根据各测站的位置,将 2002-2016 年三峡水库上游、库区及下游各测站数据分别进行梳理和归纳。

河流输沙量为一定时段内通过河道某断面的泥沙数量,其大小取决于含沙量和径流总量。因此,需要从径流量、含沙量和输沙量等方面进行数据梳理和分析。此外,针对泥沙的特性,还需要阐述输沙模数和泥沙中值粒径。

3.1 年径流量分析

基于研究区域三峡水库上、下游测站径流资料,作年径流量变化曲线如图 2 所示。

由图 2(a)可看出,由于各测站集雨面积和支流

入江(研究区域从上游开始依次有雅砻江、岷江、嘉陵江和乌江等主要支流汇入长江)等原因,年径流量也随着测站的下移而逐渐增大。朱沱站和寸滩站年径流量呈上下波动变化趋势,2002-2016 年仅有较小的增幅,分别增大 12.76%、7.47%。石鼓、攀枝花、向家坝、直达门站至 2016 年,分别降低 11.8%、11.91%、9.74%、40.68%。

由图 2(b)可得,从 2002 至 2016 年,长江下游测站的宜昌、沙市、大通站总体呈上升趋势,分别增大 8.55%、6.49%、5.28%;汉口站降低 2.64%。从宜昌至大通站,年径流量先降低后增大;以 2016 年为例进行阐述,从宜昌至沙市站降低 6.47%,从沙市至汉口站增大 87.66%,原因在于汉江汇入长江,从汉口至大通站增大 39.63%。

3.2 年均含沙量分析

进一步分析研究区内年均含沙量的变化特性,作年均含沙量变化曲线如图 3 所示。

由图 3(a)可得,直门达、攀枝花、向家坝、朱沱、寸滩站年均含沙量总体呈下降趋势;至 2016 年分别降低 36.79%、84.21%、98.85%、82.18%、80.06%;向家坝站降低最为显著,从 2012 至 2013 年降低 98.22%,随后趋于稳定。但石鼓站至 2016 年反而增大 28.77%。

由图 3(b)可得,宜昌、沙市、汉口、大通站年均含沙量从 2002 至 2016 年分别降低 96.54%、91.9%、70.65%、47.65%,越靠近上游降低幅度越大,反之则越小。各年均含沙量曲线变化规律类似,

从2007年开始近似趋于稳定,2013年存在小幅度降低,随后又趋于稳定。

3.3 年输沙量分析

进一步分析年输沙量的变化规律,作年输沙量变化曲线如图4所示。由图4(a)可得,直门达、攀枝花、

向家坝、朱沱和寸滩站的输沙量虽存在上下波动的情况,但总体呈下降趋势,至2016年分别降低62.64%、86.22%、98.92%、79.79%、78.21%,向家坝站降低最为显著。朱沱和寸滩站在2006-2008年期间年输沙量曲线近似重合,2014年后各曲线趋于稳定。

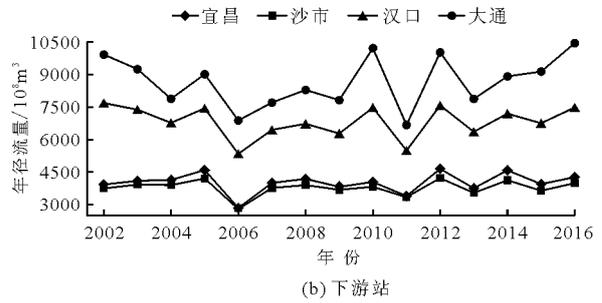
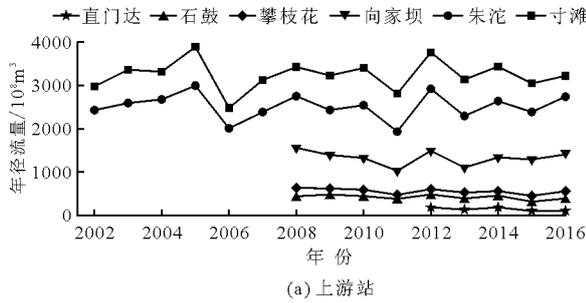


图2 2002-2016年三峡水库上游、库区及下游各测站年径流量变化曲线

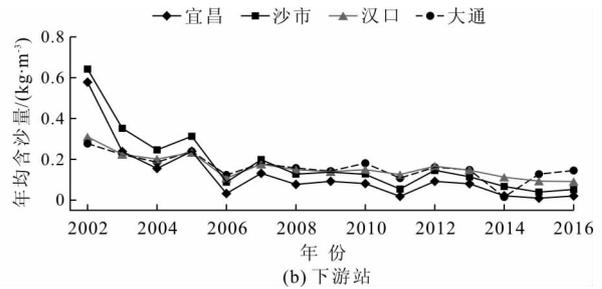
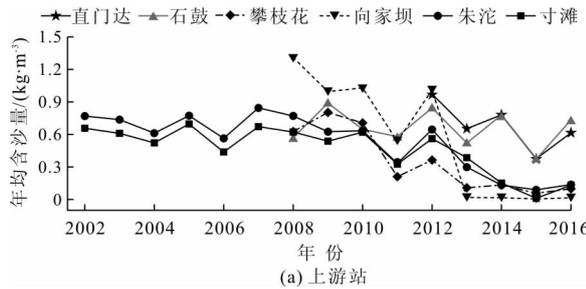


图3 2002-2016年三峡水库上游、库区及下游各测站年均含沙量变化曲线

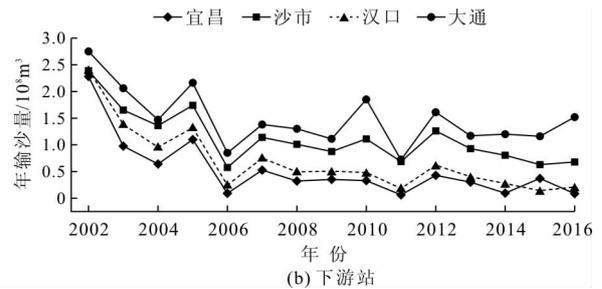
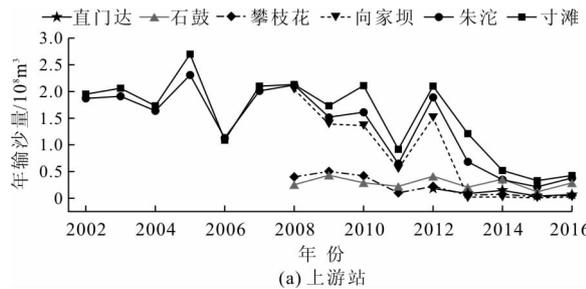


图4 2002-2016年三峡水库上游、库区及下游各测站年输沙量变化曲线

图4(b)中各曲线波动较小;从2002至2016年,宜昌站、沙市站、汉口站、大通站输沙量呈下降趋势,分别降低96.27%、91.33%、71.59%、44.73%,宜昌站降低幅度最大,2013年后各曲线逐渐趋于稳定。下游各测站年含沙量自上而下呈增大趋势,从宜昌至大通站增大20.61%~1688.24%。

3.4 泥沙中值粒径分析

随着河道径流量和泥沙量的变化,泥沙的粒径也会发生了较大变化。部分学者研究发现水力条件与河床组成沿程变化情况下,粗颗粒在床沙中所占比例沿程减小,细颗粒所占比例沿程增加。具体分析时,中值粒径是最具代表性的参数,需要系统梳理其沿程变化规律。以朱沱站2003-2012年泥沙为

例,颗粒级配曲线如图5所示,其他水文站颗粒级配曲线的获取方法相同,不再赘述。

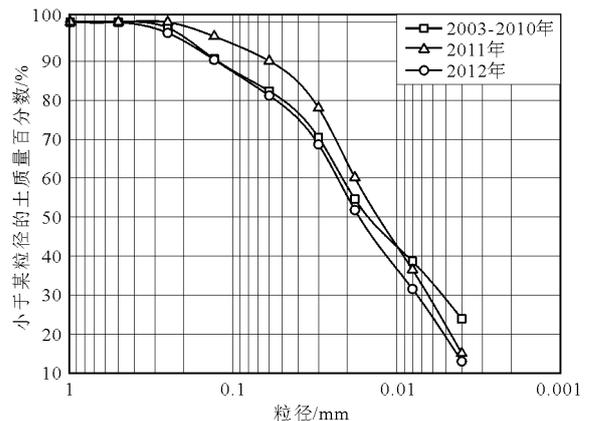


图5 朱沱站泥沙颗粒级配曲线

颗粒级配曲线上含量 50% 对应的泥沙粒径为中值粒径 d_{50} ,能反应泥沙的粗细程度;作各水文站泥沙中值粒径变化曲线如图 6 所示。

由图 6(a)可得,攀枝花、朱沱、寸滩站泥沙中值粒径整体上趋于稳定,波动幅度较小;至 2016 年攀枝花、朱沱站分别增大 9.09%、10%,石鼓、寸滩站分别降低 20%、9.09%;仅向家坝站波动幅度较大,至 2016 年降低 31.25%,2011 至 2012 年降低 60%。

分析图 6(b)不难发现,宜昌、汉口、大通站泥沙中值粒径波动幅度较小,至 2016 年仅增大 0~16.67%。但沙市站波动较大,从 2005 至 2007 年,中值粒径先增大 6.6 倍后又降低 82.83%,在 2006

年出现极大值。

4 各参数相关性分析

天然河道中年径流量、泥沙参量、年输沙量、年均含沙量等关键参数相辅相成,相关性强。但是随着三峡大坝和上下游大型水电站的运行,上述参数相关性如何,仍需深入研究。

4.1 径流量与输沙量的相关性

随着观测系统和技术的逐步完善,本文所有监测资料中,在 2016 年具有相对完善的水文泥沙资料。因此,基于该年的数据进行相关性分析。以 2016 年为例作月径流量和月输沙量的变化曲线如图 7 所示。

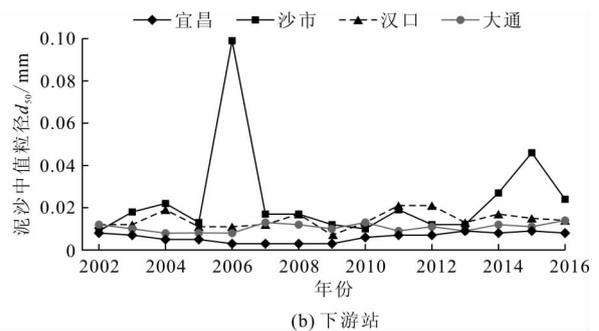
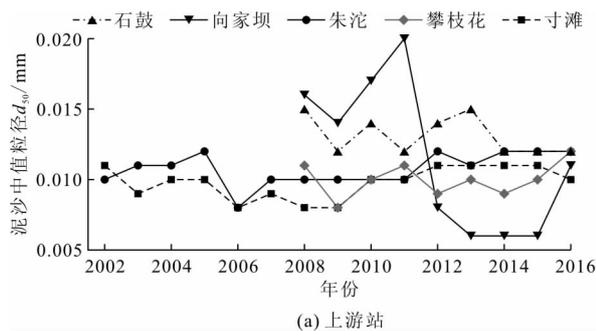


图 6 泥沙中值粒径变化曲线

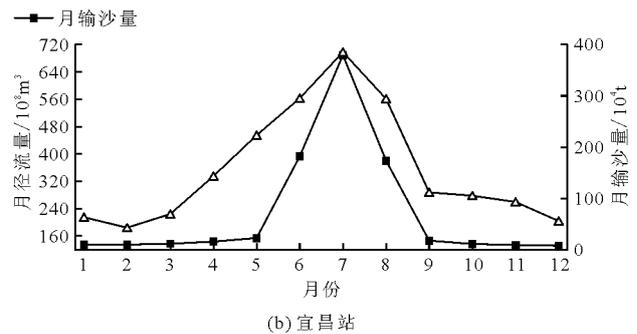
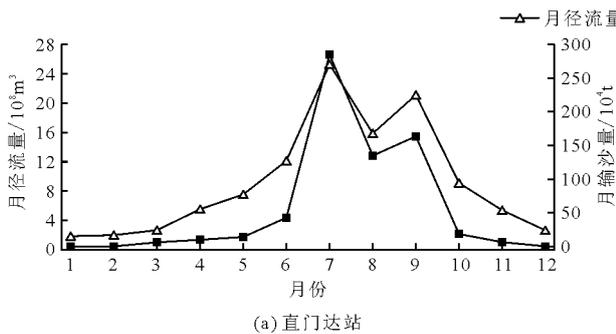


图 7 月径流量和月输沙量变化曲线

由图 7 可得,直门达和宜昌站月径流量和月输沙量变化规律类似,月径流量和月输沙量皆以 7 月为分界线,类似正态分布。两参量具有较好的相关性,月径流量能表征月输沙量的大小。

此外,宜昌站 7 月份月径流量和月输沙量分别达到最大值 $7.0 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、 $3.79 \times 10^6 \text{ t}$,分别占全年总量的 16.37%、44.64%。月径流量和月输沙量主要集中在 6-9 月份,分别占全年的 49.47%、88.52%。可见,在汛期降,对于河道某一断面而言,月径流量越大,流速就越大,水流挟沙能力越强,月输沙量自然就越大;其余月份(1-5、10-12 月),月输沙量相对较小。

基于月径流量和月输沙量相关性,进一步分析年径流量和年输沙量的相关性。选取三峡水库上游站朱沱、寸滩以及下游的宜昌、沙市、汉口、大通站作为代表,作年径流量和年输沙量的变化曲线如图 8 所示。

由图 8 可得,各监测站年径流量和年输沙量在 2004-2013 年间具有较好的相关性,年径流量与年输沙量的升降规律类似。在 2002-2003、2003-2013 年间相关性较差,以寸滩站为例进行分析。

由图 8(b)可得,在 2004-2013 年间年径流量与年输沙量的升降趋势是一致的,皆在 2005、2012 年达到极大值,在 2006、2011 年达到极小值。2006-

2007年、2011-2012年均出现显著增幅,2005-2006、2012-2013年则出现大幅度下降。

4.2 其他关键参数相关性分析

寸滩站位于三峡库区中,其各参数变化更能反映三峡水库调蓄过程对相关参数的影响。作年径流量和年输沙模量、年输沙量和年均含沙量的变化曲线如图9、10所示。

由图9、10可得,年输沙模量主要受到年径流量

与年均含沙量的影响,在2004-2013年期间,年径流量和年输沙模量具有较好的相关性,升降规律相同,都是在2005、2012年达到极大值,在2006、2011年出现极小值。同理,年输沙量与年均含沙量的相关性依然采用寸滩站监测资料。年输沙量与年均含沙量变化曲线变化规律类似,相关性较好;2012年前降低幅度较小,两参量总体都呈下降趋势,2002-2016年分别降低79.79%、82.18%。

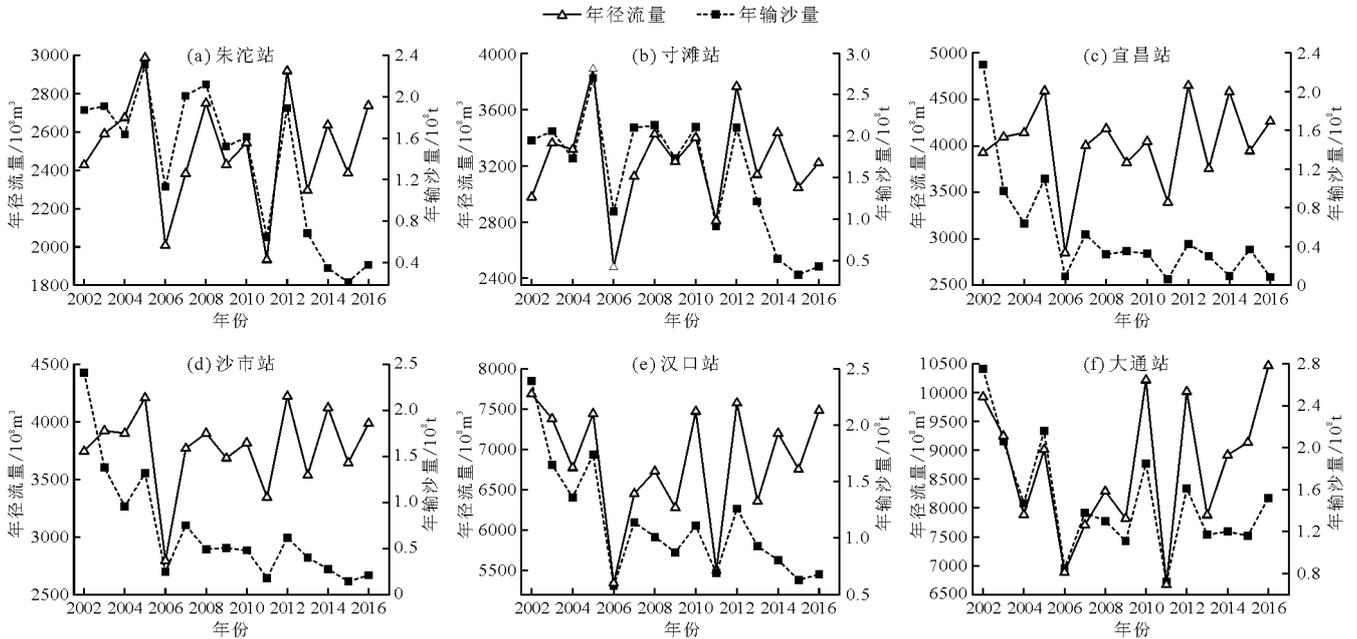


图8 年径流量和年输沙量变化曲线

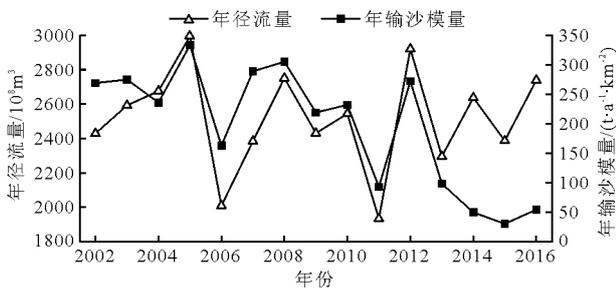


图9 寸滩站年径流量和年输沙模量变化曲线

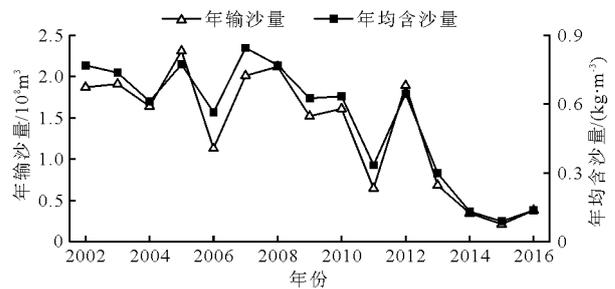


图10 寸滩站年输沙量和年均含沙量变化曲线

4.3 相关性影响因素分析

(1)径流量与输沙量方面,上游站2013年之前,径流量与输沙量相关性较好(图8)。但在2013年之后,二者的相关性明显减弱,越靠近三峡大坝受影响越大,远离大坝的上游河道测站受三峡水库蓄水影响不显著。

下游的宜昌站和沙市站径流量与输沙量关系有显著的3个阶段与三峡水库蓄水过程吻合,其中2004年前和2013年后相关性较差,期间相关性较

好;汉口站和大通站的流量与输沙量相关性较好。

(2)寸滩站位于库区内,受三峡水库调蓄影响相对较大,在2002-2003年之间,三峡水库从未蓄水到施工期初步蓄水,原天然河道各水文参数被强烈干扰,寸滩站各参数的观测结果相关性受干扰因素影响较大,出现了弱相关甚至不相关。

2003-2013年,三峡水库最大蓄水水位156m,处于相对的低水位运行,各测站受水位影响也较小,该测站监测数据类似于天然河道,随着水库蓄放调

节,各参数相关性相对较好。

2013年后,寸滩站年径流量与年输沙量、年径流量与年输沙模量相关性较差。而同期,三峡水库试验性蓄水位达175 m,导致上游水库和河道流速较小,导致挟沙力降低,年输沙量也随之减小。可见,三峡库区水位达到175 m时,各主要测站(尤其是库区内水沙参数)参数的相关性大大弱化。

总体而言,三峡水库施工期蓄水和正常蓄水期间对各参数相关性影响较大,越靠近三峡大坝相关性越不明显。试验性蓄水期间,在135或156 m以下低水位运行阶段,各参数相关性较好。

5 三峡水库泥沙冲淤分析

5.1 出入库泥沙量

三峡水库在调控长江水沙特性的同时,对自身泥沙冲淤也存在较大的影响。根据三峡水库主要控制站朱沱、寸滩、黄帝陵站水文观测资料统计表明,三峡水库入库悬移质泥沙在2003年6月-2013年12月期间为 20.278×10^8 t,出库悬移质泥沙为 4.969×10^8 t^[16]。各年入库量、出库量和淤积量如图11所示。

由图11可得,泥沙入库量的最大值、最小值分

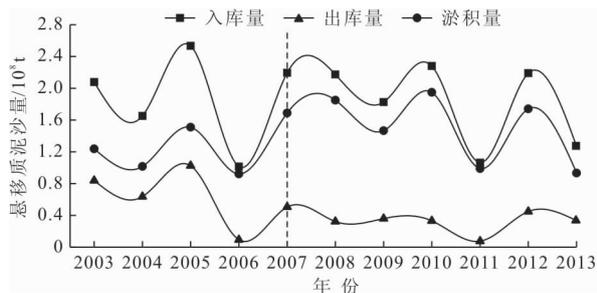


图11 2003-2013年三峡水库泥沙入库量、出库量和淤积量

由图12可得,三峡水库排沙比总体呈现上下波动的趋势,在2005年达到最大值40.45%,2011年出现最小值7.06%;从2005至2006年,排沙比出现大幅度降低,从40.45%降低至9.15%,降低77.38%。对比不难发现,2006年后排沙比波动幅度比2006年前小。

6 泥沙影响因素分析

6.1 三峡水库蓄水的影响

年输沙量方面,从三峡水库蓄水以来,下游站年输沙量降低44.73%~96.27%;距离三峡水库越近的水文站,年输沙量降低幅度越大,距离越远受到的

影响越小;当水位达到175 m时,下游站的年输沙量趋于稳定。在年均含沙量方面,截至2007年三峡水库蓄水位达到156 m,下游站的年均含沙量趋于稳定。对比上、下游站不难得出,从寸滩站到宜昌站年均含沙量降低明显,以2016年为例进行阐述,年均含沙量降低80%,可见,三峡大坝上、下游特性显著不同,三峡水库及上游各种因素,拦截了绝大多数泥沙。

在中值粒径和年输沙模数方面,受到三峡大坝蓄水的影响,宜昌、沙市、大通站的泥沙中值粒径趋于稳定,从2002至2016年仅增大0~16.67%。年输沙模数在三峡水库刚蓄水时出现较大的波动,在别出现在2005和2006年,分别为 2.53×10^8 、 1.01×10^8 t,泥沙入库量在2003-2013年期间持续上下波动,但总体呈下降趋势,2003-2013年由 2.08×10^8 t降低至 1.27×10^8 t,降幅达到38.94%。泥沙出库量在2005年出现最大值 1.08×10^8 t,在2011年降低至最小值 7.51×10^6 t。以2007年(水库蓄水位156 m)为分界线,2007年前泥沙入库量显著降低,从2003至2006年降低了51.14%;2007至2013年趋于基本稳定,总体仍呈下降趋势。

5.2 三峡水库排沙比

为进一步反映三峡库区泥沙淤积特性,基于图11计算出排沙比,三峡水库排沙比(出库量/入库量)如图12所示。

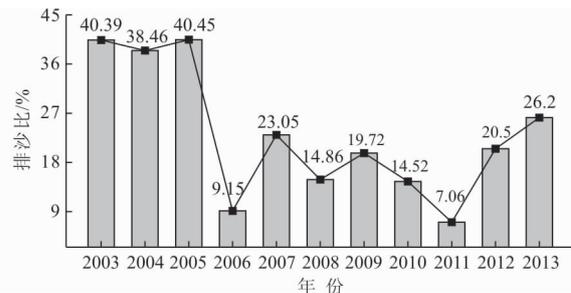


图12 2003-2013年三峡水库排沙比

影响越小;当水位达到175 m时,下游站的年输沙量趋于稳定。

在年均含沙量方面,截至2007年三峡水库蓄水位达到156 m,下游站的年均含沙量趋于稳定。对比上、下游站不难得出,从寸滩站到宜昌站年均含沙量降低明显,以2016年为例进行阐述,年均含沙量降低80%,可见,三峡大坝上、下游特性显著不同,三峡水库及上游各种因素,拦截了绝大多数泥沙。

在中值粒径和年输沙模数方面,受到三峡大坝蓄水的影响,宜昌、沙市、大通站的泥沙中值粒径趋于稳定,从2002至2016年仅增大0~16.67%。年输沙模数在三峡水库刚蓄水时出现较大的波动,在

蓄水至 175m 后波动较小;2002 至 2016 年,宜昌、汉口、大通站分别降低 96.29%、71.68%、44.66%,可见距离三峡大坝越远,年输沙模数受到的影响越小。三峡大坝蓄水后,从寸滩至宜昌站的年输沙模数明显降低,以 2016 年为例进行分析,年输沙模数降低 82.82%。此外,从三峡大坝至下游延伸,年输沙模数先降低后增大。

6.2 研究区域其他水电站的影响

三峡水库上游各水电站的修建并蓄水对年输沙量的影响较大,对照本文数据,在 5 各方面有所体现:(1)2012 年锦屏一级水电站开始蓄水,攀枝花站从 2012 至 2013 年年输沙量降低 74.21%;(2)向家坝和溪洛渡水电站分别于 2012、2013 年蓄水,从 2012 至 2013 年向家坝站年输沙量降低 98.68%;从攀枝花到向家坝站年输沙量明显降低,以 2015 年为例,降低 76.92%。(3)草街航电枢纽 2010 年蓄水,从 2010 至 2011 年寸滩站年输沙量降低 59.87%。(4)亭子口水电站于 2013 年蓄水,从 2013 至 2014 年寸滩站年输沙量降低 57.11%。(5)由于清江和

汉江的汇入,从宜昌到大通站年输沙量增大 20.61%~1688.24%。

在中值粒径和年输沙模数方面,向家坝站受到向家坝水电站 2012 年蓄水的影响,大坝拦蓄大量泥沙,向家坝站的中值粒径由 0.02 mm 减小至 0.008 mm,减小了 60%。受到向家坝和溪洛渡水电站蓄水的影响,向家坝站从 2012 至 2013 年年输沙模数降低 98.66%,2013 年后趋于稳定。

6.3 河道断面的影响

2003、2015 和 2016 年,三峡水库上游 3 个典型河道断面 S34、S113 和 S207 的形状对比如图 13 所示。2003-2013 年期间,监测数据发现泥沙中推移质数量急剧减少,部分河段甚至不能检测到推移质。其中一个主要原因是,随着三峡水库蓄水水位的抬高,河道的过水横断面逐渐增大,水流流速降低,其携带泥沙能力也随之降低,依靠自重沉降的泥沙比例增大,往下游输送的泥沙减小。水流特性的改变导致水动力降低,粒径较大的颗粒沉入河床,仅细小颗粒被带入下游。

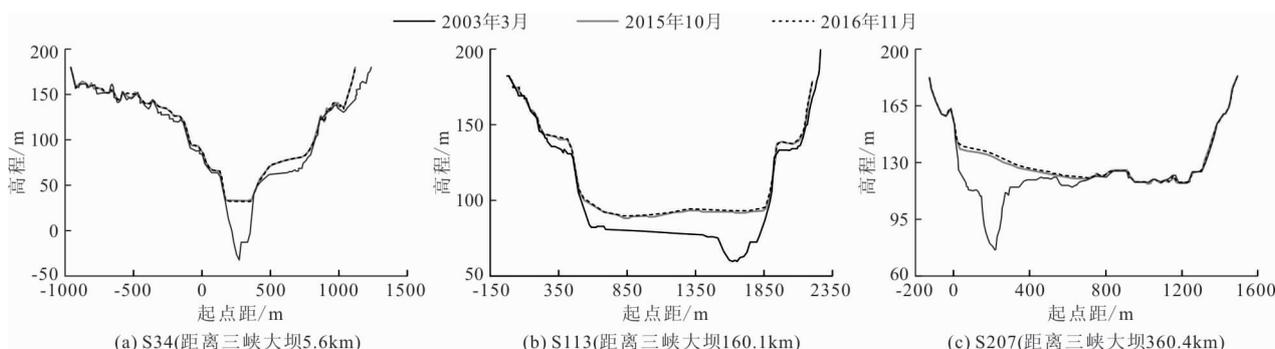


图 13 2003、2015 和 2016 年三峡水库上游 3 个典型河道断面形状对比

图 13 中显示,2013 年以后,河道最大过水断面变化不显著,但随着库区河道泥沙淤积,过水断面反而会减小,并随着冲淤平衡逐步趋于新的稳定,其后,对泥沙的影响也相对较小。

此外,局部的人为因素和不确定因素,对河道泥沙特性的影响也不容忽视。但在具体分析时,应区分奇异点年份和整体规律的关系。

7 结论

(1)三峡水库自施工期蓄水、初期蓄水、试验性蓄水的整个过程,对三峡水库上下游河道的水沙特性影响较大。越靠近三峡大坝的河段,受三峡水库的影响越大。

(2)三峡水库抬高水位,导致上游大部分河道

流速变小,河道过水断面发生变化,水动力条件发生改变,导致入库泥沙越来越少,越来越细。

(3)三峡水库上游长江干流和支流上修建了梯级电站,拦蓄了大量的泥沙,年输沙量、年均含沙量、中值粒径、年输沙模数都显著降低。

在上述 3 方面的影响下,水沙特性变化如下:

(1)上游段沿顺水流方向年径流量逐渐增大,至 2016 年直门达、石鼓、攀枝花、向家坝、汉口站降低 2.64%~40.68%,朱沱、寸滩、宜昌、沙市、大通站增大 5.28%~2824.11%;上中游站(除石鼓站)年输沙量至 2016 年降低 62.64%~98.92%,下游站降低 44.73%~96.27%;除石鼓站增大外,其他各站至 2016 年年均含沙量降低 36.79%~98.85%。

(2)年径流量和输沙量、年均含沙量、年输沙模

数在2004-2013年间具有较好的相关性,曲线变化规律类似,2013年后受三峡水库蓄水的影响,出现弱相关;年径流量能表征泥沙参量的变化特性;年输沙量和年均含沙量在2002-2016年间皆具有较好的相关性。

(3)2007年前三峡水库淤积量呈增长趋势,其后三峡水库泥沙淤积量逐渐降低。

(4)在水库冲淤和泥沙特性方面,汛期三峡水库水位对其影响较大;枯水期的高水位对其影响并不大。

除此之外,局部的人为因素和不确定因素,对河道泥沙特性的影响也不容忽视。

参考文献:

- [1] GAO Peng, WANG Zhaoyin, SIEGEL D. Spatial and temporal sedimentation changes in the Three Gorges Reservoir of China [J]. *Lakes & Reservoirs Research & Management*, 2016,20(4):233-242.
- [2] XIAO Y, YANG F S, SU L, et al. Fluvial sedimentation of the permanent backwater zone in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Lake & Reservoir Management*, 2015, 31(4):324-338.
- [3] 胡江,杨胜发,王兴奎. 三峡水库2003年蓄水以来库区干流泥沙淤积初步分析[J]. *泥沙研究*, 2013, 38(1):39-44.
- [4] CHEN Jing, FINLAYSON B L, WEI Taoyuan, et al. Changes in monthly flows in the Yangtze River, China - with special reference to the Three Gorges Dam [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 536:293-301.
- [5] JIA Dongdong, SHAO Xuejun, ZHANG Xingnong, et al. Sedimentation patterns of fine-grained particles in the Dam area of the Three Gorges Project: 3D numerical simulation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(6):669-674.
- [6] XIAO Y, YANG F S, SU L, et al. Fluvial sedimentation of the permanent backwater zone in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Lake & Reservoir Management*, 2015, 31(4):324-338.
- [7] WANG Dangwei, LIU Xiaofang, JI Zuwen, et al. Influence of flocculation on sediment deposition process at the Three Gorges Reservoir. [J]. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2016, 73(4):873-880.
- [8] DAI S B, YANG S L, LI M. The sharp decrease in suspended sediment supply from China's rivers to the sea: anthropogenic and natural causes. [J]. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2009, 54(1):135-146.
- [9] YANG Yunping, LI Yitan, SUN Zhaohua, et al. Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze River Estuary: The trends and causes [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(1):129-142.
- [10] YANG Yunping, DENG Jinyun, ZHANG Mingjin, et al. The synchronicity and difference in the change of suspended sediment concentration in the Yangtze River Estuary [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(4):399-416.
- [11] 李义天,孙昭华,邓金运. 论三峡水库下游的河床冲淤变化[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(3):283-295.
- [12] 朱玲玲,陈剑池,袁晶,等. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响[J]. *水科学进展*, 2014, 25(3):348-357.
- [13] 李琼芳,邹振华,郭瑾,等. 人类活动对长江泥沙特性的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(4):364-368.
- [14] 殷鸿福,陈国金,李长安,等. 长江中游的泥沙淤积问题[J]. *中国科学·地球科学*, 2004, 34(3):195-209.
- [15] 郭小虎,李义天,渠庚,等. 三峡工程蓄水后长江中游泥沙输移规律分析[J]. *泥沙研究*, 2014, 39(5):11-17.
- [16] 付旺彬. 三峡库区二维泥沙冲淤计算可视化研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.