

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.01.011

荆江河段泥沙冲淤对三峡水库汛期排沙的响应

左利钦^{1,2}, 陆永军^{1,2}, 王洪杨¹, 郑力³, 李鑫¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098; 3. 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 湖北武汉 430040)

摘要: 三峡水库汛期排沙研究大多关注库区的减淤效应, 对坝下游河道的冲淤影响尚需进一步研究, 对优化水库调度和河道保护利用具有重要意义。以三峡水库下游荆江河段为对象, 建立了荆江长河段二维水沙数学模型, 并结合实测资料分析, 基于三峡水库2018年7月排沙调度, 通过设置不同的排沙比(7%~100%), 计算分析了荆江河段冲淤对三峡水库排沙比的响应。结果表明: 虽然荆江河段全年总体冲刷, 但排沙比较大时汛期仍可能淤积, 上荆江河段受排沙调度影响相对较大; 总体而言, 2018年汛期水沙条件下, 30%左右的排沙比是荆江河段洪季冲淤的临界点; 排沙比提高后, 汛期淤积部位大部分为边滩等缓流区, 以及弯曲河段凹岸等, 主槽仍冲刷, 对维护滩槽高差具有积极意义。

关键词: 排沙调度; 场次洪水; 水沙调节; 泥沙冲淤; 排沙比; 荆江河段; 三峡水库

中图分类号: TV148 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)01-0115-11

水库水沙调节不仅对保持有效库容有重要作用, 而且影响其下游河道河床演变^[1-2]。蓄清排浑是一种重要的水库调度运用方式^[3], 在长江三峡水库、金沙江下游梯级水库、黄河三门峡水库等广泛运用^[3-8]。汛期排沙调度是“蓄清排浑”的重要内容, 在来沙量较大的汛期加大排沙可有效减少水库淤积、缓解下游河道过度冲刷。因此, 场次洪水排沙调度研究受到国内外学者和工程师的重视。开展排沙调度冲淤效应研究对优化水库调度和河道保护利用具有重要的理论意义和实践价值。

目前对排沙调度的影响因素、调度模式、排沙比提高方法等进行了深入研究^[3-9]。排沙量的多少与入库水沙过程、敞泄时间、坝前水位过程及库区地形等关系密切^[4-6,8,10], 是各因子相互作用的复杂过程。三峡水库排沙在工程论证阶段和运行阶段一直是被关注的热点问题。三峡水库利用入库洪峰、沙峰在水库内传播时间的差异, 在涨水过程中拦蓄洪水, 减小下泄流量, 而在洪水消退过程中, 沙峰输移到坝前, 加大下泄流量, 促使更多泥沙随下泄水流排放至下游, 提高水库排沙比^[10-11]。三峡水库在2012年、2013年、2018年和2020年汛期进行了排沙调度试验, 取得了良好效果, 汛期排沙比达到27%以上^[4]。长江2018年2号洪水期间出库含沙量为0.50~1.20 kg/m³, 最大出库输沙率达到48.5 t/s, 日均出库沙量在370万t左右, 沙峰过程排沙比达29%, 7月份排沙比达到了31%, 取得了较好的排沙效果, 有效减轻了库区泥沙淤积^[12-13]。

汛期不同排沙比情况下, 三峡水库下游河段泥沙冲淤的响应还缺少定量研究和共识。三峡水库拦蓄泥沙, 坝下游河段原有的相对冲淤平衡状态被打破, 全程冲刷已发展到湖口以下的大通。其中, 荆江河段冲刷占比较大, 2002—2014年荆江河段冲刷7.93亿m³, 平均冲深2.13 m, 上、下荆江冲刷量分别约为4.46亿m³(年均冲刷强度为21.6万m³/(km·a))和3.44亿m³(年均冲刷强度为16.5万m³/(km·a))^[14]。河床长期冲刷引起河势、防洪、航道及水资源利用等一系列变化, 引起国内外学者广泛关注^[15-16]。徐涛等^[17]采用一维水沙数学模型, 基于1991—2000年水沙系列, 研究了三峡水库不同调控方式对坝下游河段约50 a的冲

收稿日期: 2022-04-07; 网络出版日期: 2023-01-31

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//32.1309.P.20230131.1301.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071221); 国家青年人才资助项目(GO222001)

作者简介: 左利钦(1980—), 男, 山东巨野人, 正高级工程师, 博士, 主要从事河流海岸动力学及工程泥沙研究。

Email: lqzuo@nhri.cn

通信作者: 陆永军, Email: yjlu@nhri.cn

淤变化;董炳江等^[18]根据实测资料分析了2017年汛期三峡水库对城陵矶防洪补偿调度后,对水库泥沙淤积、荆江三口分流、坝下游河道冲淤与崩岸以及长江中下游洲滩淹没等的影响;朱玲玲等^[19]分析了河道冲刷造成的不利影响,提出了加大水库排沙调度及湖泊自然排沙等方法减缓泥沙大幅减少的负面效应。加大汛期排沙对于下游河道冲淤产生怎样的影响,是否能在一定程度上缓解冲刷强度,洪水期冲淤临界排沙比是多少,均是需要深入研究的科学问题。

本文以长江中游荆江河段为研究对象,采用实测资料分析与水沙数学模型计算相结合的方法,通过设置三峡水库不同排沙比工况,研究荆江河段滩槽演变对三峡水库汛期排沙调度的响应。该研究有利于加深对三峡水库场次洪水调度冲淤效应的认识,为三峡水库汛期排沙调度优化和河道治理保护提供借鉴和参考。

1 研究河段概况

三峡水库下游枝城至城陵矶为荆江河段,长度为347.2 km(图1)。枝城至藕池口为上荆江,长度为171.7 km,河道内弯道较多,弯道内多有江心洲,多属弯曲分汊河型;藕池口至城陵矶为下荆江,长度为175.5 km,为典型的蜿蜒型河道,自然状态下的河床演变具有分汊河型与弯曲河型的双重特征,在汉道变迁和弯道环流的相互影响下,河床演变复杂。枝城至大埠街为卵石夹沙河床,大埠街以下为沙质河床。荆江河段是距离三峡工程最近的沙质河段,受三峡工程影响较为明显,冲刷最为剧烈,局部河段河势变化剧烈。荆江河段内有松滋、太平、藕池、调弦(1959年建闸控制)分流入洞庭湖,其径流和泥沙经过洞庭湖调蓄后,从洞庭湖出口城陵矶注入长江。

三峡水库运行后,荆江河段的枝城、沙市和监利站输沙量减少80%~91%(2003—2016年)。枝城以下河段由于河床沿程冲刷,粒径沿程变粗,沙市站中值粒径由三峡水库运行前的0.012 mm变为0.017 mm(2003—2015年),监利站中值粒径由运行前的0.009 mm变为0.048 mm。

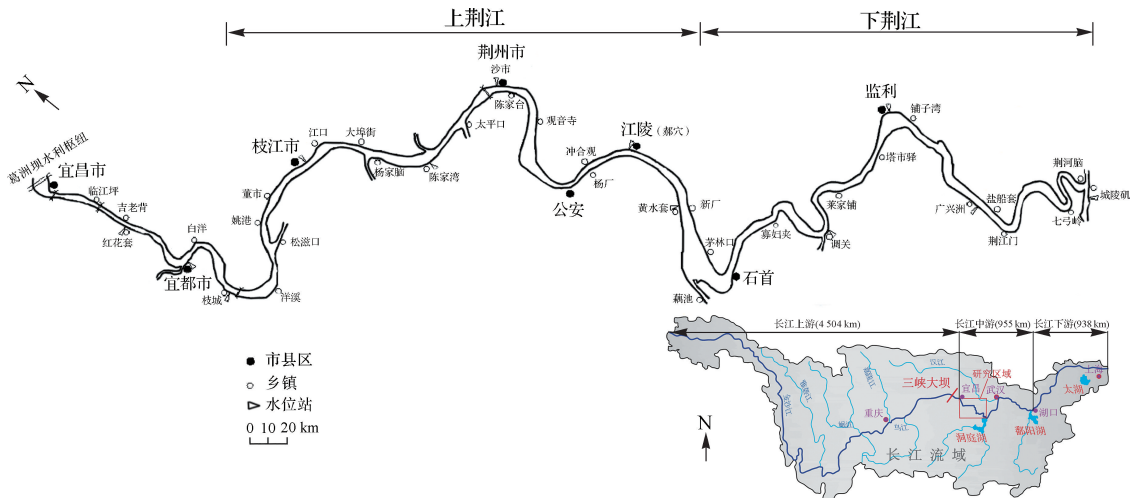


图1 荆江河段概况

Fig.1 Sketch of the Jingjiang reach

2 研究资料与荆江河段二维水沙数学模型

收集了荆江河段2018年3月和8月、2019年3月水下地形实测资料,对荆江河段年内冲淤过程进行了分析。3—8月基本为涨水冲淤过程,8月至次年3月代表落水冲刷过程,验证时段基本反映了涨水和落水冲淤过程,具有较好的典型性。

为了得到洪季冲淤过程,建立了荆江河段平面二维水沙数学模型。二维水沙数学模型的基本原理,包括控制方程、边界条件、初始条件、动边界技术等,详见文献[20]。荆江全河段水沙数学模型属于长河段数学模型,长达347.2 km,并且涉及到卵石夹沙、沙质河床的冲淤变化,在水沙边界条件、水沙过程等处理方面非常复杂。关于长河段模拟关键问题的处理详见文献[21],限于篇幅,本文不再赘述。

对荆江河段2018年3月至2019年3月河床冲淤变化进行了验证计算。每天划分一个流量级,进口断面悬移质级配采用枝城站枯季及洪季实测平均悬移质级配(中值粒径分别为0.011~0.030 mm、0.009~0.012 mm),含沙量过程采用枝城站含沙量日均值;床沙级配分段处理,枝城至大埠街为沙卵石级配,以下为沙质级配,含沙量的计算包括9个粒径组。

图2给出了沙市站含沙量过程验证,表1与图3、图4给出了荆江大埠街至城陵矶总体河段及分河段(上荆江大埠街至藕池口河段、下荆江藕池口至城陵矶河段)2018年3月至2019年3月冲淤分布实测与计算值的比较。图中, D 为冲淤厚度,正数表示淤积,负数表示冲刷。可见,沙市站含沙量主要在6—9月份,最大可达 1.3 kg/m^3 左右,其余时段基本小于 0.05 kg/m^3 。2018年3—8月荆江河段冲刷较少,上荆江大埠街至藕池口河段实测冲刷量为 754.4 万 m^3 ,计算值为 $1\,074.4 \text{ 万 m}^3$,实测平均冲刷厚度为 0.054 m ,计算值为 0.077 m ;下荆江河段实测冲刷量仅为 15.6 万 m^3 ,平均冲刷厚度在 0.001 m 左右,幅度甚小;合计荆江总体冲刷量为 769.9 万 m^3 ,计算值为 $1\,337.1 \text{ 万 m}^3$ 。2018年8月至2019年3月荆江河段实测冲刷量为 $7\,832.3 \text{ 万 m}^3$,计算值为 $5\,478.2 \text{ 万 m}^3$ 。

累计来看,2018年3月至2019年3月荆江河段发生较大冲刷,上荆江大埠街至藕池口河段实测冲刷量 $3\,211.4 \text{ 万 m}^3$,计算值为 $3\,290.4 \text{ 万 m}^3$,偏差2.5%;下荆江河段实测冲刷量为 $5\,390.9 \text{ 万 m}^3$,计算值为 $3\,524.9 \text{ 亿 m}^3$,偏差34.6%;合计荆江总体冲刷量为 $8\,602.3 \text{ 万 m}^3$,计算值为 $6\,815.3 \text{ 万 m}^3$,偏差20.8%。

由此可见,根据实测资料,荆江河段2018年3—8月份冲刷较少,上荆江平均冲刷厚度仅 0.054 m ,下荆江基本没有冲刷,这与洪季来水来沙有关,而全年冲刷期在8月份以后,主要是汛后及中枯水期冲刷。模拟计算结果很好地反映了这一规律。除个别时段如2018年3—8月计算偏差较大(偏差超过30%,这也与该时段内实测冲淤绝对量较小有关,百分比看起来很大,绝对量级相对其他时段并不大),整个验证时段全河段累计偏差大部分满足20%左右。因此,计算的冲淤过程、冲淤部位、冲淤量值均与实测值吻合较好,基本反映了荆江河段年内冲淤变化规律。

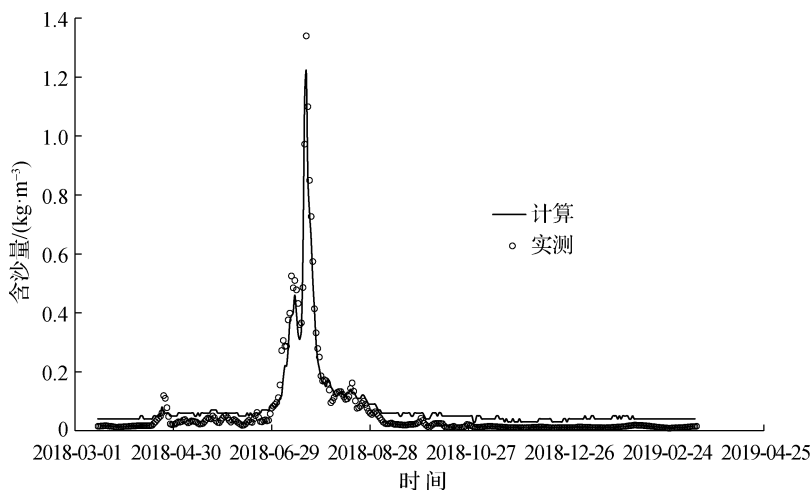


图2 沙市站2018年3月至2019年3月含沙量过程验证

Fig. 2 Verification of suspended sediment concentration process from Mar. 2018 to Mar. 2019 at Shashi station

表 1 荆江河段 2018 年 3 月至 2019 年 3 月冲淤验证

Table 1 Verification of erosion and deposition from Mar. 2018 to Mar. 2019 in the Jingjiang reach

时段	河段	长度/km	实测		计算	
			冲淤量/万 m ³	冲淤厚度/m	冲淤量/万 m ³	冲淤厚度/m
2018 年 3—8 月	上荆江	110.6	-754.4	-0.054	-1 074.4	-0.077
	下荆江	147.1	-15.6	-0.001	-262.7	-0.012
	合计	257.7	-769.9	-0.022	-1 337.1	-0.038
2018 年 8 月 至 2019 年 3 月	上荆江	110.6	-2 457.0	-0.133	-2 216.0	-0.120
	下荆江	147.1	-5 375.3	-0.196	-3 262.2	-0.119
	合计	257.7	-7 832.3	-0.171	-5 478.2	-0.119
2018 年 3 月 至 2019 年 3 月	上荆江	110.6	-3 211.4	-0.173	-3 290.4	-0.178
	下荆江	147.1	-5 390.9	-0.197	-3 524.9	-0.129
	合计	257.7	-8 602.3	-0.187	-6 815.3	-0.148

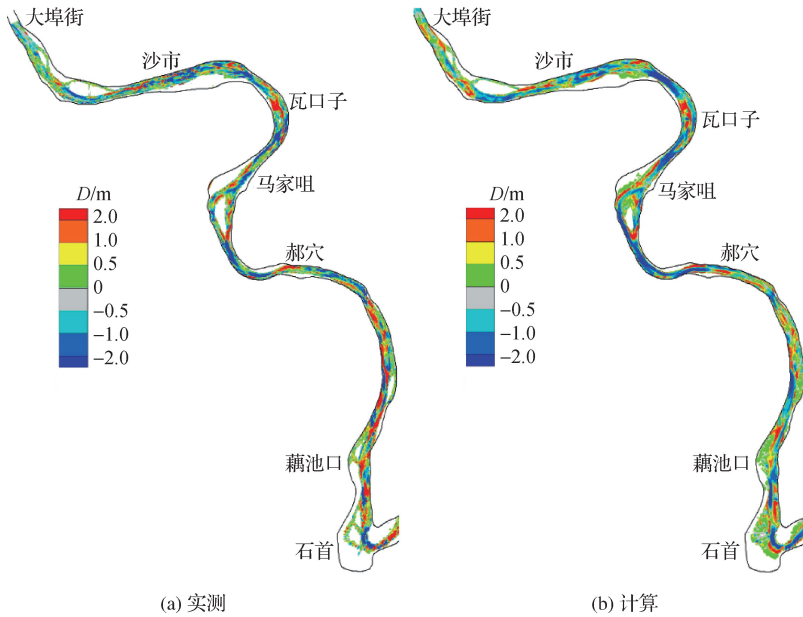


图 3 上荆江沙质河段(大埠街至藕池口)2018 年 3—8 月冲淤验证

Fig. 3 Verification of erosion and deposition from Mar. 2018 to Aug. 2018 in the Upper Jingjiang reach

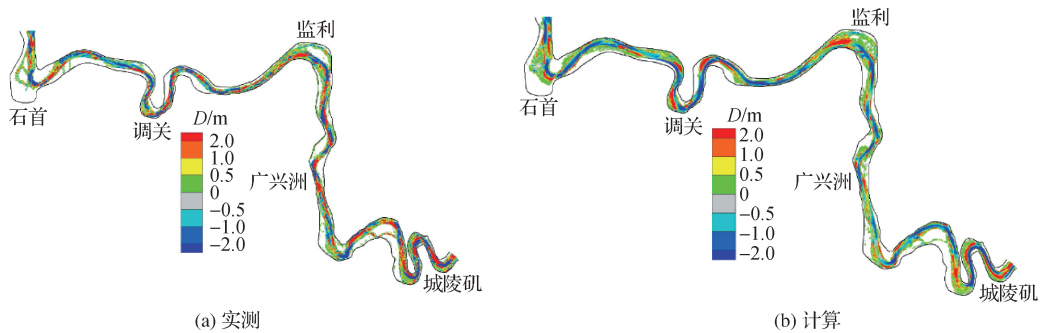


图 4 下荆江河段 2018 年 3—8 月冲淤验证

Fig. 4 Verification of erosion and deposition from Mar. 2018 to Aug. 2018 in the Lower Jingjiang reach

3 结果与讨论

3.1 计算工况

根据历年三峡水库排沙比统计, 图5给出了2009—2018年洪季三峡水库入库沙量与排沙比。2008年175 m 试验性蓄水以来, 随着坝前水位逐步抬高, 水库排沙比均小于31%, 枯水年排沙比更低, 如2011年仅7%左右。2012年、2013年和2018年虽然坝前水位偏高, 但由于实施了汛期沙峰排沙调度, 水库排沙比相对有所提高, 达到20%以上, 全年最高达到27%, 洪季最高达到31%。2015—2017年实施了中小洪水调度, 一定程度上也增加了排沙效果。2010年、2012年、2013年和2018年属于丰水丰沙年, 7月三峡水库入库沙量达1.030亿~1.137亿t, 是入库沙量较为集中的时段, 2018年7月份入库沙量为1.086亿t, 与近些年洪季入库沙量较为接近, 且排沙比相比较。排沙调度主要发生在大水年, 因此, 选择2018年7月排沙比进行研究具有一定的典型性和代表性。

2018年7月三峡水库实施了排沙调度, 7月14日出现2号洪峰(60 000 m³/s)。根据三峡水库历年排沙比情况, 基于2018年7月排沙调度拟定计算工况, 通过改变7月份洪水期间出库水沙过程得到不同排沙比, 其他月份水沙过程不变。工况1排沙比为7%; 工况2排沙比为20%; 工况3为实际情况, 实测水沙过程的排沙比为31%; 工况4排沙比为40%; 工况5排沙比为100%, 即无三峡水库情况, 按入库流量含沙量给定模型进口条件, 此工况是不现实的, 仅为探讨泥沙冲淤规律作为一个附加工况进行比较。

通过一维水沙数学模型推算不同排沙比三峡水库下游流量、含沙量过程。一维水沙数学模型范围为宜昌至大通, 详见文献[22]。因计算河段较长, 床沙级配根据实测资料分段处理, 枝城至大埠街为沙卵石级配, 大埠街至大通为沙质级配。模型进口给定不同排沙比工况下的流量及含沙量过程。图6给出了不同排沙比含沙量及流量过程曲线。

由图6可见, 7月11日20:00起, 三峡水库下泄流量由40 000 m³/s增加至42 000 m³/s, 并持续至7月20日06:00。三峡水库水沙调节使得洪水过程坦化, 2号洪水期间, 入库洪峰可接近60 000 m³/s左右, 出库洪峰约43 300 m³/s, 削峰率为27.8%, 削峰作用明显。7月18—20日水库排沙效果明显增强, 入库含沙量最大达到4.23 kg/m³, 出库含沙量为0.50~1.20 kg/m³, 日均出库沙量在370万t左右, 整个沙峰过程排沙比达29%。7月份总体排沙比达到31%, 达到三峡水库175 m 试验性蓄水后同期最高排沙比。

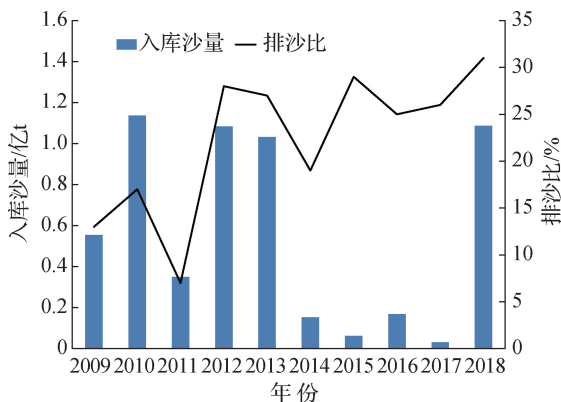


图5 不同年份7月份三峡水库入库沙量与排沙比

Fig. 5 Time series of inflow sediment amount and sediment delivery ratios of the TGP in July

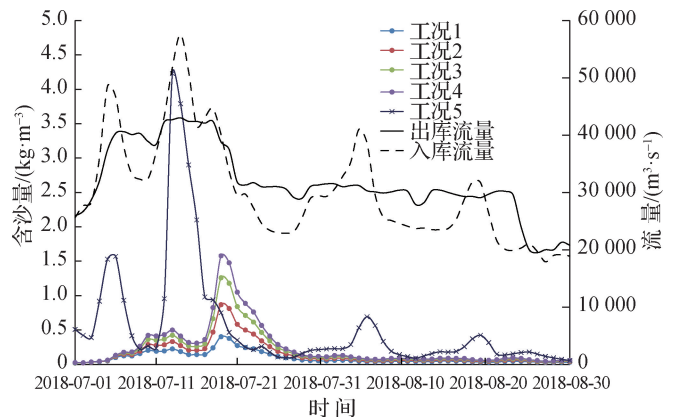


图6 枝城站不同排沙比含沙量及流量过程曲线

Fig. 6 Time series of sediment concentration and discharge under different sediment delivery ratios at Zhicheng station

3.2 计算结果分析

3.2.1 荆江河段冲淤规律

图7以上荆江为例给出了2018年水沙条件下冲淤量过程随流量过程的变化。可见,荆江河段年内表现为“涨淤落冲”的规律,冲淤过程比流量过程表现出一定的滞后性。洪水期发生一定淤积,表现为累计冲刷量减少或者甚至出现净淤积。上荆江发生泥沙相对淤积的日期约为2018年7月9—25日,下荆江淤积日期推迟到7月17日左右。

汛后,即7月下旬开始,荆江河段发生普遍冲刷。汛后冲刷时期与来流量直接相关,若有较大洪水仍会发生淤积,不同年份退水期因洪水时间的不同而不同。如此下来,三峡水库水沙调节后,3—8月上、下荆江处于微冲微淤状态,冲淤总量较小,平均冲淤厚度仅0.01 m左右。而8月份以后冲刷量较大,使得荆江全河段表现为较大的净冲刷。

在无三峡水库水沙调节的工况下,汛期发生绝对淤积。与无三峡水库拦沙工况相比,三峡水库调节后汛期泥沙淤积量和淤积时间均大幅减小。2018年全年入库沙量为1.32亿t,出库沙量为0.42亿t,与无三峡水库水沙调节工况相比,荆江全年冲刷量大幅增加了27.3%。

综上所述,荆江河段虽然全年表现为冲刷,但年内仍表现为“涨淤落冲”的规律,洪水期发生相对的泥沙淤积。值得说明的是,2018年三峡入库沙量已经受到上游梯级枢纽的减沙影响,与2002年以前宜昌站平均2亿~3亿t的输沙量相比,入库沙量已减小较多。因此,在2018年条件下,即使三峡水库不拦沙,荆江河段全年累计也已表现出冲刷。

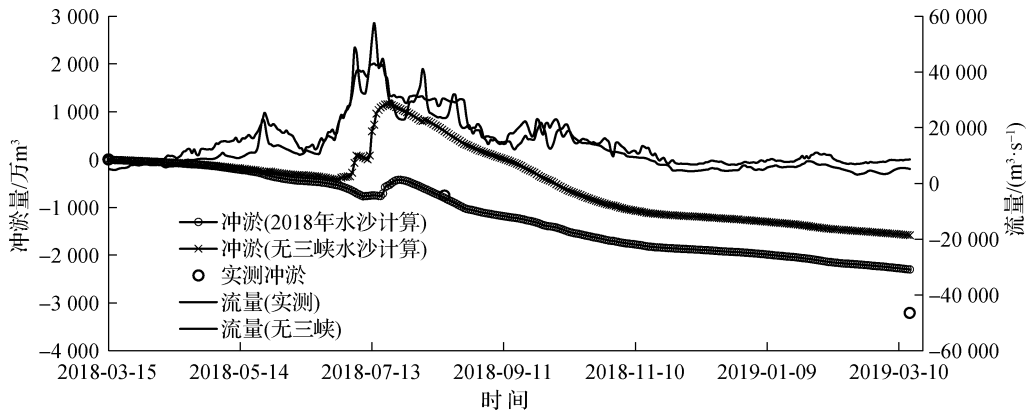


图7 上荆江河段2018年3月至2019年3月泥沙冲淤量与流量过程

Fig. 7 Time series of sediment erosion and deposition volume and discharge from Mar. 2018 to Mar. 2019 in the Upper Jingjiang reach

3.2.2 不同排沙比冲淤比较

实测资料分析表明(对应排沙比31%),2018年3—8月上荆江冲刷754.3万 m^3 ,平均冲刷厚度仅0.05 m,下荆江微冲15.6万 m^3 ,平均冲刷厚度不足0.01 m,分别占全年冲刷量的23.5%、0.3%。这说明3—8月的涨水期和洪水期泥沙冲刷少,泥沙冲刷主要在8月份以后。

实测资料时间跨度较大,不能得到泥沙冲淤过程,以及洪水期泥沙冲淤量。为了得到泥沙冲淤随时间变化过程,采用荆江河段二维水沙数学模型计算分析了逐日泥沙冲淤过程。表2给出了基于2018年7月洪季水沙过程不同排沙比(7%~100%)荆江河段冲淤量的统计。图8给出了荆江河段2018年3—8月不同排沙比的冲淤过程曲线。

(1) 7%排沙比(工况1)时,上、下荆江总体冲刷,由于水库下泄含沙量小,洪峰期间基本没有淤积,上荆江7月净冲刷530.6万 m^3 ,下荆江7月净冲刷31.4万 m^3 。

(2) 20% 排沙比(工况 2)时, 上、下荆江仍总体冲刷, 但洪峰期间发生一定淤积, 上荆江洪峰期间淤积量为 182.5 万 m³, 该月净冲刷 187.6 万 m³; 下荆江洪峰期间淤积量为 97.0 万 m³, 该月净冲刷 10.5 万 m³。

(3) 31% 排沙比(工况 3)时, 荆江河段 7 月份已呈现净淤积, 上荆江洪峰期间淤积量为 342.7 万 m³, 7 月份净淤积 87.2 万 m³; 下荆江洪峰期间淤积量为 176.5 万 m³, 7 月份净淤积 8.1 万 m³。淤积的泥沙在汛后的 8 月份即可冲刷完毕。

(4) 40% 排沙比(工况 4)时, 洪季淤积进一步加大, 上荆江洪峰期间淤积量为 531.8 万 m³, 7 月份净淤积 292.0 万 m³; 下荆江洪峰期间淤积量为 194.3 万 m³, 7 月份净淤积 33.3 万 m³。淤积的泥沙在汛后的 8 月即可冲刷。

(5) 排沙比为 100%(工况 5)时, 即三峡水库不调节水沙, 相当于无三峡工程, 洪季淤积大幅增加, 上荆江洪峰期间淤积量为 1 579.3 万 m³, 7 月份净淤积 1 297.6 万 m³; 下荆江洪峰期间淤积量为 887.5 万 m³, 7 月份净淤积 729.5 万 m³。

由图 8 可见, 不同排沙比影响范围主要在上荆江, 下荆江变化幅度已相对较小, 同时下荆江冲淤也受到上荆江泥沙输移传递的影响。从荆江河段总体冲淤来看(表 2), 在 2018 年 7 月汛期条件下, 30% 左右的排沙比基本是荆江河段洪季期间冲淤的大致临界点, 对应的水沙条件为: 该月入库沙量 10 860 万 t, 出库沙量 3 350 万 t。汛后冲刷较大, 全年仍呈现较大冲刷态势。

表 2 不同排沙比 2018 年 7 月洪季冲淤量

Table 2 Erosion and deposition volume in July 2018 under different sediment delivery ratios 单位: 万 m³

工况	排沙比/%	上荆江		下荆江		荆江合计	
		纯淤积量	净冲淤量	纯淤积量	净冲淤量	纯淤积量	净冲淤量
工况 1	7	21.1	-530.6	24.0	-31.4	45.1	-562.0
工况 2	20	182.5	-187.6	97.0	-10.5	279.5	-198.1
工况 3	31	342.7	87.2	176.5	8.1	519.2	95.3
工况 4	40	531.8	292.0	194.3	33.3	726.1	325.5
工况 5	100	1 579.3	1 297.6	887.5	729.5	2 466.8	2 027.1

注: 正数表示淤积, 负数表示冲刷。

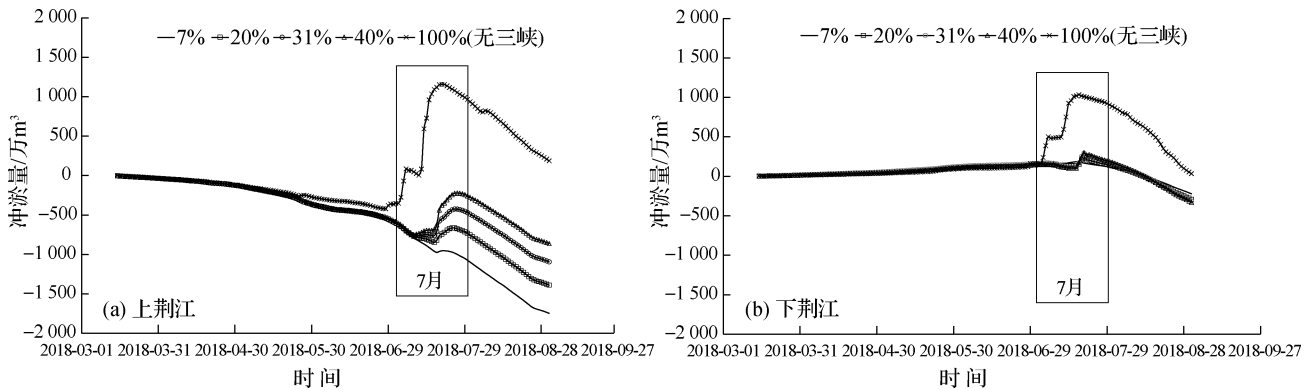


图 8 不同排沙比荆江河段冲淤过程

Fig. 8 Time series of sediment erosion and deposition under different sediment delivery ratios in the Jingjiang reach

对航道而言, 不仅关心冲淤总量, 航道条件还与冲淤部位密切相关。图 9 给出了荆江分河段 7 月份冲淤量统计, 图 10 给出了 2018 年 7—8 月份荆江河段冲淤分布。可见, 洪季上荆江淤积河段主要包括芦家河的美洲水道、浣市水道、周天河段, 下荆江主要是窑监河段、砖桥-铁铺水道、尺八口水道、观音洲水道等,

大多是历史上碍航河段。从冲淤分布来看，洪季淤积并非河道普遍淤积，主槽仍存在冲刷，淤积部位大部分位于边滩等缓流区，以及弯曲河段凹岸等。在一些河段航道易出浅段，如周天河段过渡段、窑监河段右汉进口段等存在淤积，在不利年份增加航道维护压力。这与已有研究中荆江河段总体冲淤态势基本一致^[14-17,23]，冲刷主要发生在中枯水槽，与消减洪峰、中枯水流量历时增加密切相关。下荆江弯曲河道凹岸发生淤积，与图4实测冲淤分布以及已有研究结果也较为吻合。其主要机理为，三峡水库削峰调度使得流量过程坦化，中水持续时间延长，年内主流线在凸岸侧的几率增加、在凹岸侧的几率减少，此外来沙量大幅减少，凸岸边滩淤积的来沙量不足，造成“凸冲凹淤”现象较为普遍^[14,23]。

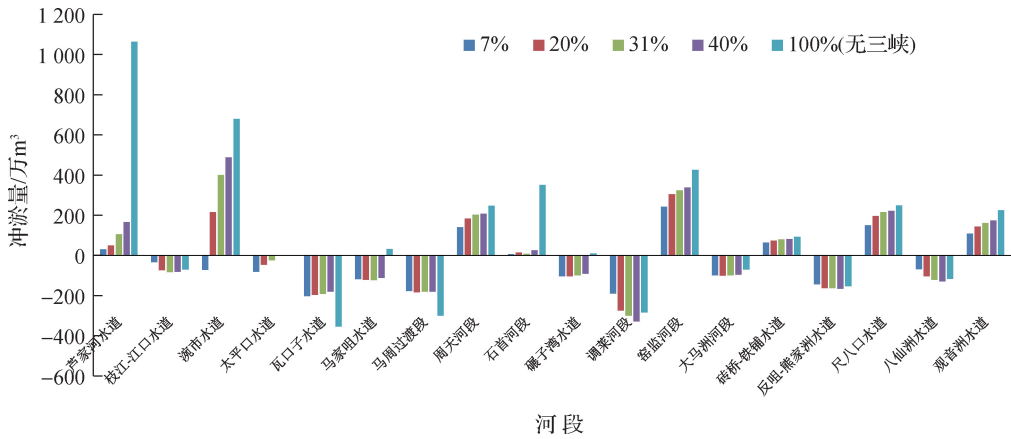


图9 不同排沙比2018年汛期7月荆江各河段冲淤变化

Fig.9 Sediment erosion and deposition in different reaches in the Jingjiang reach in Jul. 2018

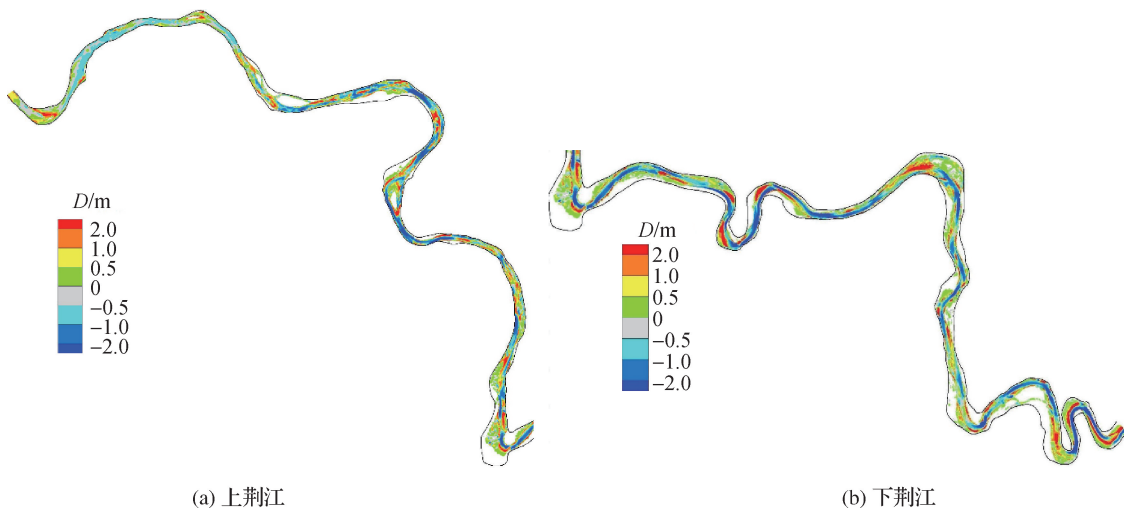


图10 排沙比31%时2018年7—8月荆江河段冲淤变化

Fig. 10 Distribution of erosion and deposition in the Jingjiang reach from Jul. to Aug. 2018 under the sediment delivery ratio of 31%

3.3 讨论

三峡工程2003年运行以来，长期清水下泄，坝下游河段水流呈现不饱和状态，引起河床大幅冲刷和岸滩冲淤变化及形态调整，崩岸险情时有发生，对河势、防洪、航道、生态、引排水及江湖关系等带来不同的利弊影响。从河道长期发展来看，水流归槽，削峰调度减小了河道漫滩洪水，虽然减轻了防洪压力，但可能造成坝下游河道萎缩，对河道长期演变和大洪水时的行洪能力会产生一定影响^[1,3,15]。坝下游河道冲刷是国际上普遍存在的问题，如莱茵河过度冲刷造成水位下降；尼罗河阿斯旺大坝以及密西西比河下游的河道冲

刷,造成河口三角洲后退、海水入侵、河口湿地退化等^[19]。

在无三峡水库水沙调节条件下,荆江河段大部分水道发生淤积,汛后可能会出现较严重的碍航问题,这在2003年前即三峡水库运行前的工程实践中已得以体现。从航道角度来说,三峡水库拦沙大大减小了荆江河段淤积,为下游航道整治创造了有利条件,充分体现出三峡水库的航道效益。但是滩槽均冲,洲头冲刷后退,高滩得不到淤积,滩槽高差缩小,低水位持续降落,局部河段不利于航槽稳定,出现新的不利发展趋势。因此,目前长江中下游的航道整治工程主要采用守护性思路,采用护滩、护底等形式维持滩体,塑造良好的滩槽格局,以缓解洲滩过度冲刷造成的不利影响。从这个角度来说,增大排沙比有利于塑造高滩,加大滩槽高差,维持良好的滩槽形态,对长期的航道塑造有利;但排沙比过大时,局部碍航河段洪期淤积也大,加大了局部航道维护压力,如周天河段、窑监河段等。此外,长江中下游河道冲刷加剧堤岸坡脚掏刷和崩岸,从而对防洪等产生一定影响,对江湖关系分流分沙比和两湖水位、生态系统生境、有机污染物吸附等均产生一定影响。对冲刷河道可适当补充泥沙,如美国密西西比河曾经将浑水调到三角洲区域,减少咸水入侵,恢复湿地系统^[24]。

从河势长期发展来看,宜适当加大汛期排沙。在洪峰过境前后开展并优化场次洪水沙峰调度,提高水库汛期排沙比和排沙总量,有利于河流健康发展。但适宜的排沙比较难量化,主要是各河段冲淤特性不同,影响也不同。从荆江总体河段来看,在2018年7月汛期条件下,30%左右的排沙比基本是荆江河段洪季期间冲淤的大致临界点。排沙比与来水来沙有关,2018年水沙条件有一定代表性,基本可说明三峡水库排沙比情况。随着长江上游梯级水库运行及流域水沙环境改变,排沙比的影响也会发生变化。如来沙总量较大时,较小的排沙比可使三峡下游河道出现汛期淤积情况;而来沙总量较小时,需要较大的排沙比才能使三峡下游河道出现汛期淤积情况,甚至汛期不淤积。

4 结 论

采用实测资料和荆江长河段二维水沙数学模型分析,在2018年7月三峡水库场次洪水调度的基础上,研究了不同排沙比(7%~100%)荆江河段冲淤响应,主要结论如下:

(1) 三峡水库排沙调度后,排沙比较大时荆江河段汛期仍会发生淤积,排沙比越大洪季淤积越大,但汛后均能冲刷,使得全年表现为冲刷,上荆江河段受排沙比影响相对较大。在2018年7月汛期条件下,30%左右的排沙比基本是荆江河段洪季期间冲淤的临界点,该月入库沙量为1.086亿t,出库沙量为3350万t。

(2) 汛期淤积部位大部分在边滩等缓流区,以及弯曲河段凹岸等,主槽仍存在冲刷。在洪峰过境前后开展场次洪水沙峰调度,适当增大排沙比有利于塑造高滩,缓解长江中游的过度冲刷,加大滩槽高差,对整体河势和航道的塑造有利。但汛期淤积加大,有可能加重局部碍航浅滩河段如周天河段过渡段、窑监河段右汉进口段的航道维护压力。

(3) 排沙比及其影响与来水来沙有关,随着上游梯级水库运行和流域水沙环境的变化,三峡水库入库沙量可能发生变化,相应的排沙调度和对坝下游荆江河段的冲淤效应可能有所变化。本文研究结果可供三峡水库排沙调度参考,需持续跟踪研究三峡水库排沙调度和河床演变,以便及时采取相应对策,为长江保护利用提供技术支撑。

参考文献:

- [1] LYU Y W, FAGHERAZZI S, TAN G M, et al. Hydrodynamic and geomorphic adjustments of channel bars in the Yichang-Chenlingji reach of the Middle Yangtze River in response to the Three Gorges Dam operation[J]. *Catena*, 2020, 193: 104628.
- [2] RANZI R, LE T H, RULLI M C. A RUSLE approach to model suspended sediment load in the Lo River (Vietnam): effects of reservoirs and land use changes[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 422/423: 17-29.
- [3] 胡春宏,方春明,许全喜.论三峡水库“蓄清排浑”运用方式及其优化[J].*水利学报*,2019,50(1):2-11.(HU C H,

- FANG C M, XU Q X. Application and optimization of “storing clean water and discharging muddy flow” in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 2-11. (in Chinese))
- [4] 董炳江, 许全喜, 杨成刚, 等. 2020 年三峡水库沙峰排沙调度分析[J]. *水利水电快报*, 2021, 42(1): 27-32. (DONG B J, XU Q X, YANG C G, et al. Analysis of sediment peak discharge regulation of TGP Reservoir in 2020[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2021, 42(1): 27-32. (in Chinese))
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] 黄仁勇, 王敏, 张细兵, 等. 溪洛渡、向家坝、三峡梯级水库汛期联合排沙调度方式初步研究[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(8): 6-10. (HUANG R Y, WANG M, ZHANG X B, et al. Preliminary study on joint desilting dispatching mode of Xiluodu, Xiangjiaba and Three Gorges Cascade Reservoirs in flood season[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(8): 6-10. (in Chinese))
- [7] 胡春宏. 从三门峡到三峡我国工程泥沙学科的发展与思考[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(2): 1-10. (HU C H. Development and consideration of engineering sediment subject from the Sanmenxia Reservoir to the Three Gorges Reservoir in China[J]. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(2): 1-10. (in Chinese))
- [8] 侯素珍, 胡恬, 杨飞, 等. 三门峡水库汛期排沙效果研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(4): 393-400. (HOU S Z, HU T, YANG F, et al. Research on the causes of sediment discharge of Sanmenxia Reservoir during flood season[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(4): 393-400. (in Chinese))
- [9] FANG H W, HAN D, HE G J, et al. Flood management selections for the Yangtze River midstream after the Three Gorges Project operation[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 432/433: 1-11.
- [10] 张帮稳, 吴保生, 章若茵. 三峡库区汛期洪峰和沙峰异步运动特性的三维数值模拟[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 408-417. (ZHANG B W, WU B S, ZHANG R Y. Three-dimensional numerical of the asynchronous movement characteristics of flood and sediment peaks in the Three Gorges Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 408-417. (in Chinese))
- [11] 金中武, 任实, 吴华莉, 等. 三峡水库淤积排沙及河型转化规律[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(10): 9-15, 27. (JIN Z W, REN S, WU H L, et al. Sedimentation and sediment delivery and river pattern conversion in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(10): 9-15, 27. (in Chinese))
- [12] 李秋平, 胡琼方, 邹涛, 等. 三峡水库 2018 年 7 月洪水期间泥沙输移特性分析[J]. *水利水电快报*, 2019, 40(2): 66-72. (LI Q P, HU Q F, ZOU T, et al. Analysis of sediment transport characteristics during the flood of Three Gorges Reservoir in July 2018[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2019, 40(2): 66-72. (in Chinese))
- [13] 陈桂亚, 董炳江, 姜利玲, 等. 2018 长江 2 号洪水期间三峡水库沙峰排沙调度[J]. *人民长江*, 2018, 49(19): 6-10. (CHEN G Y, DONG B J, JIANG L L, et al. Analysis of sediment peak scheduling of Three Gorges Reservoir in No.2 flood of Changjiang River in 2018[J]. *Yangtze River*, 2018, 49(19): 6-10. (in Chinese))
- [14] 朱玲玲, 许全喜, 陈子寒. 新水沙条件下荆江河段强冲刷响应研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(1): 85-97. (ZHU L L, XU Q X, CHEN Z H. Extraordinary scour of Jingjiang reach downstream from Three Gorges Project[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(1): 85-97. (in Chinese))
- [15] XIA J Q, DENG S S, ZHOU M R, et al. Geomorphic response of the Jingjiang reach to the Three Gorges Project operation[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(6): 866-876.
- [16] YAN T, YANG Y P, LI Y B, et al. Possibilities and challenges of expanding dimensions of waterway downstream of Three Gorges Dam[J]. *Water Science and Engineering*, 2019, 12(2): 136-144.
- [17] 徐涛, 王敏, 周曼, 等. 三峡水库不同调控方式对坝下游河道演变影响[J]. *人民长江*, 2016, 47(24): 6-11. (XU T, WANG M, ZHOU M, et al. Effect of different regulation modes on river channel evolution in downstream of Three Gorges Dam[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(24): 6-11. (in Chinese))
- [18] 董炳江, 许全喜, 袁晶, 等. 2017 年汛期三峡水库城陵矶防洪补偿调度影响分析[J]. *人民长江*, 2019, 50(2): 95-100. (DONG B J, XU Q X, YUAN J, et al. Effect of compensation operation of Three Gorges Reservoir to flood control of Chenglingji reach during flood season of Changjiang in 2017[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(2): 95-100. (in Chinese))

- [19] 朱玲玲, 王俊, 许全喜, 等. 长江中下游泥沙输移态势及“人工喂沙”初步思考[C]//中国水利学会2018学术年会论文集. 南昌: 中国水利水电出版社, 2018: 415-424. (ZHU L L, WANG J, XU Q X, et al. Sediment transport in Middle and Lower Yangtze River and preliminary study on “artificial feed sand”[C]//Annual Conference of Chinese Hydraulic Society of 2018. Nanchang: China Water & Power Press, 2018: 415-424. (in Chinese))
- [20] 陆永军, 王兆印, 左利钦, 等. 长江中游瓦口子至马家咀河段二维水沙数学模型[J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 227-234. (LU Y J, WANG Z Y, ZUO L Q, et al. 2D mathematical model for water-sediment between Wakouzi-Majiazui reach in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(2): 227-234. (in Chinese))
- [21] 左利钦. 长江中上游黄金水道治理数值模拟平台与应用研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2015. (ZUO L Q. Numerical simulation platform and the application study for golden waterway regulation in Upstream and Middle Yangtze River[D]. Nanjing: Njing Hydraulic Research Institute, 2015. (in Chinese))
- [22] LIU Y, WANG Z L, ZUO L Q. The impact of river-lake flow and sediment exchange on sediment scouring and siltation in Middle and Lower Yangtze River[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 100: 012205.
- [23] 杨云平, 李明, 刘万利, 等. 长江荆江河段滩槽演变与航道水深资源提升关系[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 240-252. (YANG Y P, LI M, LIU W L, et al. Study on the relationship between beach trough evolution and navigation obstruction characteristics in Jingjiang reach of the Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 240-252. (in Chinese))
- [24] 丁喜桂, IRVING A M, 王吉松. 美国密西西比河三角洲湿地流失的原因及修复措施[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(2): 61-65. (DING X G, IRVING A M, WANG J S. Wetland loss in Mississippi River Delta complex: causes and remediation[J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(2): 61-65. (in Chinese))

Responses of erosion and deposition in the Jingjiang reach to sediment delivery of the Three Gorges Reservoir during flood season*

ZUO Liqin^{1,2}, LU Yongjun^{1,2}, WANG Hongyang¹, ZHENG Li³, LI Xin¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 3. Changjiang Channel Survey and Design Institute (Wuhan) Co. Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: Most studies on the sediment delivery of the Three Gorges Reservoir (TGR) focus on the reduction of siltation in the reservoir area, while the impacts on the river bed evolution in the downstream reaches need further study. This study is of great significance for optimizing flow and sediment regulation as well as the protection and utilization of downstream reaches. The river bed evolution impacted by sediment delivery regulation during flood season in the Jingjiang reach was studied, which located downstream of the TGR. Combined with the measured data, a 2-D flow-sediment numerical model in the Jingjiang reach was established to calculate and analyze the erosion and deposition process by setting different sediment delivery ratios (7%—100%), based on the sediment delivery regulation in July 2018. The results showed that, although the Jingjiang reach was generally suffering an annual scouring process, it might still experience deposition in a flood season with a higher sediment delivery ratio of the TGR. Moreover, there were more influences of the sediment delivery regulation on the Upper Jingjiang reach; in general, the sediment delivery ratio of about 30% was basically the dividing point between the erosion and deposition of the Jingjiang reach during a flood season under the flow-sediment conditions in July 2018; during a flood season, deposition mainly happens in slow-flow areas on point bars and concave banks in curved reaches, but the main-flow zone still experiences erosion, which was positive for maintaining the elevation difference between shoals and channels.

Key words: sediment delivery regulation; flood events; flow and sediment adjustment; scouring and silting; sediment delivery ratio; Jingjiang reach; Three Gorges Reservoir

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52071221) and National Youth Talent Funding project of China (No. G0222001).