

· 航道及通航建筑物 ·



三峡水库变动回水区三角碛浅滩 冲淤与碍航特性分析*

唐荣婕, 陈立, 杨阳, 徐程

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北武汉430072)

摘要: 变动回水区河段的侵蚀基准面在蓄水期抬升, 在消落期和汛期逐渐恢复为天然河段状态, 因此变动回水区内碍航浅滩的冲淤特性将发生改变。以三峡水库变动回水区三角碛浅滩段为例研究浅滩年际年内的冲淤及碍航特性的变化。结果发现, 水库蓄水位抬升到175 m前, 三角碛浅滩段年内遵循“汛淤枯冲”的规律, 年际间则由于上游来沙量大幅减少, 水流处于不饱和状态而表现为累积性冲刷, 且随着水流不饱和程度的提高, 冲刷强度增大; 2008年汛后三峡开始试验性蓄水后, 三角碛浅滩段由天然河段变为变动回水区河段, 下游侵蚀基准面的抬升使河段具有淤积的趋向, 上游来沙减少和下游侵蚀基准面抬升共同作用的结果是本河段冲刷强度显著下降, 同时也未出现累积性淤积的现象。由于年内泥沙输移过程发生改变, 主要走沙时期从汛末推移到次年的消落期, 在通航标准不变的前提下, 三角碛浅滩段的碍航程度可能会有所上升。

关键词: 三峡工程; 变动回水区; 浅滩; 冲淤; 碍航特性

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0110-05

Riverbed deformation and navigation-obstructing characteristics of Sanjiaoqi shoal at fluctuating backwater area of Three Gorges Reservoir

TANG Rong-jie, CHEN Li, YANG Yang, XU Cheng

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: During the impounding, channels in fluctuating backwater area become a part of the reservoir as the base level of erosion rises. And those channels are in natural state during rest time of the year. Thus, in response to different conditions, feature of deposition and erosion of channels in this area varies accordingly. Taking Sanjiaoqi shoal as an example, this article focuses on the transformation of shoals' characteristics of deposition and erosion and navigation-obstructing. Under the natural condition, as the results reveal, the shoal followed the law of sediment deposition on high-water period and sediment erosion on low-water period throughout a year. Besides, interannually cumulative sediment erosion resulting from coming sediment whose quantity sharply decreased is observed and sediment erosion developed as quantity of coming sediment reduced constantly. After the flood season of the year 2008, the storage level of Three Gorges Reservoir lift gradually and Sanjiaoqi shoal became a part of fluctuating backwater area. Rising of the channel's base level of erosion renders the channel a tendency of sediment deposition. Under the influence of decreasing coming sediment as well as elevated base level of erosion, previously severe sediment erosion is effectively alleviated and the channel shows no cumulative sediment deposition. Meanwhile, the sediment deposition period shows apparent change. Previously, sediment deposited in this area during the flood season could be effectively scoured when the flood receded. While, under the new condition, wholesale sediment erosion won't take place until the reservoir's storage level falls next year. Hence it is predictable that the channel condition of Sanjiaoqi shoal may deteriorate with the navigation standard remains unchanged.

Keywords: Three Gorges Reservoir; fluctuating backwater area; shoal; sediment deposition & erosion; navigation-obstructing characteristics

收稿日期: 2014-05-20

*基金项目: 国家自然科学基金(51209016); 黄金水道通过能力提升技术重大专项课题(201132822430)

作者简介: 唐荣婕(1990—), 女, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。

1 概述

河流上水库的修建, 使库区河段水深增加、流速减小, 水流输沙能力减弱, 大量泥沙在库内落淤。库区河段包括常年库区河段和变动回水区河段两部分, 由于下游侵蚀基准面变化的不同, 二者的冲淤特性表现出差异。就常年库区河段而言, 建库后, 该段水深增大、水面比降变缓, 使得水流流速变小、输沙能力显著减弱, 致使大量泥沙在库内淤落, 呈现出显著的累积性淤积特点; 变动回水区是指最高与最低库水位的两个回水末端范围内的库段, 由于其蓄水期为库区河道而汛期为天然河道的双重特性, 年内输沙动力总体减弱, 变动回水区河道可能发生一定的累积性淤积, 且年内输沙过程也将发生变化^[1]。

变动回水区河段在汛期仍保留天然河道的特性, 而在蓄水期和消落期则表现出库区河段的特性。由于浅滩河段通常汛期淤积, 汛后冲刷, 因此变动回水区浅滩河段汛期仍呈淤积态势, 而汛后由于水库蓄水, 水位抬升, 汛期淤积泥沙的冲刷受到制约, 至来年消落期方开始冲刷, 当消落期冲刷流量及冲刷历时不足以冲刷汛期淤积泥沙时, 会出现年累积性淤积, 导致航道条件恶化^[2-3]。2008年汛后, 三峡水库进行175 m 试验性蓄水, 其变动回水区范围由之前的丰都至铜锣峡段变为涪陵至江津段(图1)。三峡水库变动回水区河段除了受下游侵蚀基准面变化的影响外, 还受上游来水来沙条件变化的影响, 因此变动回水区河段的冲淤调整极其复杂, 加上相关资料的缺乏, 对变动回水区河段特别是浅滩河段冲淤特性、航道条件的变化尚有待深入研究。



图1 三峡水库变动回水区范围

三角碛浅滩段在自然条件下是著名的碍航河段。该浅滩段位于长江上游重庆主城区河段上段, 距长江与嘉陵江汇合口朝天门上游10~13 km处, 上起舀鱼背信号台, 下至鹅公岩大桥, 长约4.5 km。河段进出口较窄、中间较宽。中段巨大的九堆子卵石碛坝横据于河心, 将河槽分为左右两汉: 左汉为主槽, 右汉为副槽, 河道左汉的上下口又分别有鸡心碛和三角碛将河道分为两槽。在流量大于4 000 m³/s时右汉分流, 最大分流比约为15%。在三峡水库175 m运行方案下, 三角碛浅滩段位于变动回水区上段。其河势如图2所示。

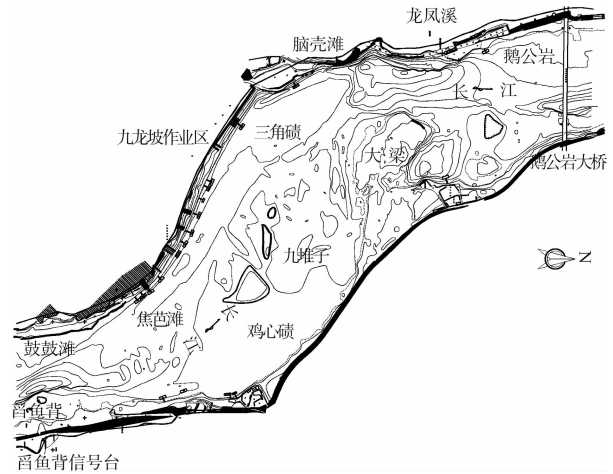


图2 三角碛浅滩段河势

本文以三角碛浅滩段为例, 分析其成为变动回水区河段后的冲淤特性变化, 为研究变动回水区浅滩演变以及三角碛浅滩段航道治理提供参考。

2 三角碛浅滩段来水来沙饱和度变化过程

取用三角碛浅滩段上游朱沱水文站的多年来来水来沙资料来分析三角碛浅滩段来水来沙条件的变化。

表1给出20世纪90年代以前、1991—1995年、1996—2002年以及三峡蓄水后2003—2007年和2008—2012年的水沙特征值。从表1可以看出: 与1990年以前的多年平均值相比, 1991—1995年期间, 朱沱站径流量变化不大, 而来沙量降低约12.59%; 1996—2002年间, 在年均径流量略有增加的情况下, 朱沱水文站的年均输沙量表现出小幅的下降; 2003年以后, 朱沱水文站的来沙量大幅减少, 减幅达到43.04%; 2008年开始试验性

蓄水以后，减幅超过 50%。

表 1 朱沱站多年年均径流量、输沙量与水沙系数对比

时间	年均径流量/亿 m ³	变化率/%	年均输沙量/亿 t	变化率/%	水沙系数 k	变化率/%
1990 年前	2 659		3.16		0.002 87	
1991—1995 年	2 491	-6.32	2.76	-12.59	0.002 79	-2.66
1996—2002 年	2 767	4.06	3.05	-3.48	0.002 59	-9.72
2003—2007 年	2 529	-4.89	1.80	-43.04	0.001 78	-38.10
2008—2012 年	2 515	-5.42	1.56	-50.70	0.001 55	-45.93

来沙量减少幅度超过径流量的减少幅度意味着水流的含沙量及饱和度降低。这里采用含沙量与流量的 α 次方的比值——水沙系数 $k = S/Q^{\alpha}$ ^[4] 来反映来流的饱和度，并根据径流量和来沙量的年均值计算了各时期的水沙系数（取 $\alpha = 2/3$ ）。水沙系数反映了来水量、来沙量的对比。研究认为^[5-7]：水沙系数减小时，表明来沙量相对较少，而来流量相对较大，水流向不饱和转化或者不饱和程度提高，有利于河床的冲刷；反之，水沙系数增大时，则表明来沙量相对来流量较大，水流向饱和转化或者过饱和，河床将发生淤积。

表 1 的计算结果显示：自 20 世纪 90 年代以来，朱沱站的水沙系数明显减小，各统计时段内水沙系数不断减小，且近年来减小的趋势愈发明显。由此可见，与 20 世纪 90 年代之前相比，三角碛河段来水来沙条件不饱和程度逐渐升高，三峡水库试验性蓄水后，该河段来水来沙的饱和度仅为 20 世纪 90 年代之前的一半，这必然引起本河段的冲刷。

3 三角碛河段的冲淤调整过程

三峡蓄水后的 2003—2007 年期间，三角碛浅滩段与三峡蓄水前一样，处于自然状态；在 2008 年汛后水库开始试验性蓄水后，三角碛浅滩段转化为变动回水区河段。

3.1 试验性蓄水前浅滩段的冲淤调整

3.1.1 年际冲淤特性

刘德春等曾经计算了大渡口至朝天门河段（三角碛浅滩段为大渡口至朝天门河段中的一段）1986—2005 年各时段的冲淤量^[8]，计算结果见表 2。可以看出，受 20 世纪 90 年代以来上游来沙

量明显减少、水流转化为不饱和水流的影响，河段整体呈累积性冲刷态势，且冲刷强度与水流不饱和度的变化相一致，呈不断增大的态势：1996—2002 年，水流不饱和度升高，因此河段继续冲刷，但此时的冲刷强度不大，在三峡蓄水以后，由于水流的饱和度降低了近一半，该时期的冲刷强度较之前增大了近 4 倍。

表 2 1986—2005 年各时段大渡口至朝天门段冲淤量

时间	年均冲淤量/(万 m ³ ·a ⁻¹)
1986—1996 年	-14.70
1996—2002 年	-30.17
2002—2005 年	-118.67

表 3 为长江水利委员会水文局计算的三角碛河道 2003—2007 年各年冲淤量^[9]。可以看出，在三峡水库 175 m 试验性蓄水前，三角碛浅滩段年际间有冲有淤，但总体仍是明显冲刷的。

因此，三峡水库试验性蓄水前，三角碛浅滩段随着来水来沙不饱和程度的提高，呈明显的冲刷态势，且冲刷强度也逐渐增大。

表 3 2003—2007 年三角碛浅滩段年内冲淤积量 万 m³

年份	年初至汛初	汛初至汛末	汛末至年底	全年
2003	-39.3	71.5	-5.8	26.4
2004	-7.3	67.4	-43.4	16.7
2005	-30.6	144.5	-178.8	-64.9
2006	4.6	18.4	-18.7	4.3
2007	4.4	14.6	-57.8	-38.8
合计	-68.2	316.4	-304.5	-56.3

3.1.2 年内冲淤过程

2003—2007 年，三峡水库尚未进入 175 m 试验性蓄水期，三角碛浅滩段处于自然状态，年内遵循汛期淤积，枯水期冲刷的规律。由表 3 可以看出：自然状态下，三角碛浅滩段年内冲淤过程可分为汛前冲刷、汛期淤积和汛末冲刷 3 个阶段。河道汛期淤积明显，走沙则主要集中在汛末至年底，即汛末冲刷较汛前冲刷更为有效。

3.2 试验性蓄水后浅滩段的冲淤调整

3.2.1 年际冲淤特性

计算得到，2007 年 3 月至 2012 年 5 月，三角碛浅滩段 160 m 水位以下河槽年际间有冲有淤，累

计冲刷 20.51 万 m^3 , 年均冲刷量为 4.1 万 m^3 , 显然, 这个冲刷强度小于表 3 中 2003—2007 年间的平均冲刷强度, 更是显著小于蓄水前的年均冲刷量。

显然, 在进入试验性蓄水期以后, 由于下游侵蚀基准面发生变化, 本河段全年水流的输沙动力总体减弱 (退水期和枯水期因水库蓄水抬高水位, 输沙能力剧减), 河段的冲刷强度剧减, 这说明进入试验性蓄水期以后, 三角碛浅滩段由之前的明显的累积性冲刷改变为微冲甚至是冲淤基本平衡。换句话说, 侵蚀基准面的抬升有效地制衡了由于上游来沙减少所导致的累积性冲刷。

三角碛浅滩段在 175 m 试验性蓄水以后的冲淤变化, 是上游来水来沙条件变化和下游侵蚀基准面抬升二者共同作用的结果。在试验性蓄水之前, 上游来沙的减少, 使来流处于不饱和状态, 因此三角碛浅滩段实际上处于累积冲刷的状态; 而当三峡开始试验性蓄水之后, 枯水期水位显著抬升, 汛期则是恢复到自然状态, 侵蚀基准面的抬升减弱了河道水流的输沙能力, 河道应发生累积性淤积。两方面共同作用的结果是三角碛浅滩段冲刷强度显著降低。

三角碛浅滩段年际间深泓平均高程见表 4。深泓纵剖面年际间有冲有淤, 三角碛浅滩段年际间深泓平均高程变化不大, 2007 年 3 月至 2012 年 5 月之间最大深泓平均高程差仅为 0.93 m。

表 4 三角碛浅滩段年际间深泓平均高程

时间	2007-03	2009-12	2010-05	2011-04	2012-05
深泓平均高程/m	150.19	149.84	150.23	150.77	150.23

3.2.2 年内冲淤过程的调整

在 175 m 试验性蓄水条件下, 三峡大坝坝前水位运用方案为 175 m-156 m-145 m。下游侵蚀基准面的周期性变化, 将会在一定程度上改变变动回水区河段的输沙过程。

如前所述, 自然条件下, 浅滩段汛期淤积, 退水期冲刷; 建库后, 汛期坝前水位消落, 变动回水区的浅滩段恢复自然状态, 因此汛期淤积的特性未发生改变, 而汛后由于蓄水的作用, 水位抬升, 导致退水期水流输沙能力下降, 汛期淤积

的泥沙不能在汛后得到有效冲刷。待到次年消落期, 由于侵蚀基准面逐渐下降, 上游涨水, 上一年度汛期淤积的泥沙才开始冲刷, 亦即主要走沙期由汛后推迟到了次年水库消落期。2009 年及 2011 年 2 年三角碛浅滩段的年内冲淤量见表 5^[10-11]。表 5 中数据表明: 三峡水库试验性蓄水后, 河道的主要淤积期仍为汛期, 汛末至年底的走沙能力明显减弱, 甚至出现了轻微淤积的现象, 而河道走沙则主要集中在年初至汛初时段内。

表 5 2009、2010 年三角碛浅滩段年内冲淤积量 万 m^3

年份	年初至汛初	汛初至汛末	汛末至年底	全年
2009	-21.0	10.5	5.5	-5.0
2011	-15.4	15.4	0.1	0.1

4 试验性蓄水后三角碛浅滩段碍航特性变化

1) 自然条件下的碍航特性。

三角碛河段自然条件下汛期淤积、汛后冲刷的主要水动力机制是: 三角碛浅滩段进口断面窄深, 而中段河宽较大, 流速沿程减小; 而下游出口窄深, 大水时形成卡口壅水。因此汛期大水时, 上游带来的泥沙容易淤积在中段; 汛后, 下游出口处的卡口壅水作用消失, 汛期淤积的泥沙被冲刷带往下游, 年内基本保持平衡。

当汛后退水能有效的冲刷汛期淤积泥沙、保持航道尺度 (水深、航宽) 时, 该浅滩段航道条件良好; 当汛后退水无法有效冲刷汛期淤积的泥沙时, 在流量减小、水位降落导致航道内尺度 (水深、航宽等) 不能满足通航需要的情况下, 将形成碍航局面。

2) 试验性蓄水后的碍航特性。

三峡水库试验性蓄水后, 汛期仍然淤积, 但是在汛后水库开始蓄水, 坝前水位抬升, 三角碛浅滩段的水位抬升, 水流流速降低, 无法将汛期淤积的泥沙冲刷到下游河段, 但此时由于水位抬升, 因此航道内尺度满足通航要求。

坝前水位开始消落时, 本河段的水位也逐渐降低。当浅滩段逐渐恢复为自然状态过程中, 流速逐渐增加, 上一年度汛期淤积的泥沙开始冲刷。若冲刷较为迅速有效, 能够保持航道尺度, 则该

浅滩段航道条件良好；反之，若消落期冲刷不及时，或者上游冲刷带来的泥沙淤积在浅滩处，在流量减小、水位降低后航道内尺度不能满足通航要求时，将形成浅滩碍航。

2013年3月消落期内，九堆子左缘处3 m等深线局部向航槽内挤压了120 m，使得三角碛水道入口处航道尺度不满足最小维护标准，通过应急疏浚才保障了消落期航道的畅通。

虽然试验性蓄水并未使三角碛浅滩段出现累积性淤积，但却使该河段累积性冲刷的强度降低，同时将汛期淤积泥沙的冲刷时间从汛后退水期推迟到次年的消落期，因此三角碛河段的碍航特性发生了变化：自然条件下，该浅滩段碍航主要发生在当年汛后枯水期；进入试验性蓄水后，该浅滩段碍航主要发生在次年水位消落期走沙的过程中。

3) 三角碛浅滩段碍航特性的变化趋势。

根据河床演变学的基本原理，上游来水来沙条件、河道边界条件及下游侵蚀基准面是影响河段演变的三个基本因素。对于河道平面形态、河床组成基本稳定的三角碛浅滩段，上游来沙的减少和侵蚀基准面的抬升两方面的制约，使得该浅滩段在三峡试验性蓄水开始后，既未发生累积性的淤积，累积性冲刷的强度也大大减小。

随着上游向家坝、溪洛渡等大型水电工程建成并投入运行，上游来沙量将进一步显著减少，特别是汛期，来沙量将会进一步降低，汛期淤积的泥沙也会减少，同时，洪水流量降低，也降低了汛期淤积量，这对改善三角碛浅滩段航道条件是有利的；但是，上游大型水电工程的运行也将使得汛后退水过程变陡，此外，由于消落期上游水库的下泄流量一般小于走沙流量，故消落期内走沙流量的出现几率降低，这对三角碛航道条件是不利的。

5 结论

1) 三峡水库175 m试验性蓄水前，由于上游来沙持续减少，三角碛浅滩段冲淤特性表现为累积性冲刷，且冲刷强度随着上游来沙量的减少逐渐增大；三峡水库试验性蓄水后，三角碛浅滩段

成为变动回水区河段，侵蚀基准面抬升，年内总体输沙动力减弱，三角碛浅滩段的累积性冲刷受到抑制，冲刷强度显著减小。

2) 试验性蓄水使三角碛浅滩段汛期淤积泥沙的冲刷时间从汛后退水期推迟到次年的消落期，与自然条件下该浅滩段碍航主要发生在当年汛后枯水期不同，试验性蓄水期浅滩碍航主要发生在次年水位消落期走沙的过程中。

3) 上游大型水电工程的运行对三角碛浅滩段航道条件有利有弊：来沙量降低、洪水流量削减有利于减少汛期淤积的泥沙；而三峡坝前水位消落期内，冲刷浅滩淤积泥沙的走沙流量出现的几率降低。

参考文献：

- [1] 谢鉴衡. 河床演变及整治[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [2] 谢鉴衡, 李义天. 三峡水库变动回水区泥沙淤积对航运的影响[J]. 水利学报, 1988(7): 19-26.
- [3] 何艳军, 张璠. 三峡水库变动回水区泥沙冲淤特性分析[J]. 水道港口, 2010, 31(5): 473-477.
- [4] 茹玉英, 张尧旺, 高际萍. 水沙搭配评价指标研究综述[J]. 人民黄河, 2010, 32(2): 26-27.
- [5] 胡兴林, 王静, 蓝永超, 等. 黄河内蒙段河道冲淤量与水沙输移过程的关系分析[J]. 水文, 2012, 32(2): 44-48.
- [6] 吴保生, 申冠卿. 来沙系数物理意义的探讨[J]. 人民黄河, 2008, 30(4): 15-16.
- [7] 梁志勇, 刘继祥, 张厚军. 黄河下游河道洪水冲淤与水沙搭配关系[J]. 水力发电学报, 2005, 24(2): 52-55.
- [8] 刘德春, 樊琪虹, 李俊. 三峡水库影响前重庆主城区河段河床演变分析[J]. 水文, 2009, 29(3): 72-76.
- [9] 长江水利委员会水文局. 2008年度三峡水库进出库水沙特性、水库淤积及坝下游河道冲刷分析[R]. 武汉: 长江水利委员会水文局, 2009.
- [10] 长江水利委员会水文局. 2009年度三峡水库进出库水沙特性、水库淤积及坝下游河道冲刷综合分析[R]. 武汉: 长江水利委员会水文局, 2010.
- [11] 长江水利委员会水文局. 2011年度三峡水库进出库水沙特性、水库淤积及坝下游河道冲刷分析[R]. 武汉: 长江水利委员会水文局, 2012.