

· 航道整治 ·



清水下泄条件下芦家河水道 沙泓进口淤沙浅滩形成机理研究

刘林双, 李明, 刘林, 郑力, 张明

(长江航道规划设计研究院, 湖北武汉 430011)

摘要: 三峡蓄水以来, 清水下泄条件下芦家河水道发生明显冲刷, 受河段边界条件、水动力条件、来水来沙条件影响, 近年来沙泓进口河段泥沙淤积逐渐开始形成新的浅滩。分析了芦家河水道河道形态、水文泥沙、冲淤演变以及洲滩变化特征, 在此基础上, 结合河床演变机理, 分析了芦家河水道沙泓进口淤沙浅滩主要影响因素, 并对芦家河沙泓进口泥沙冲淤变化、滩槽变化以及水流条件变化趋势进行了预测。

关键词: 芦家河水道; 沙泓进口; 清水下泄; 边界条件; 水动力条件

中图分类号: TV 147

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)12-0037-09

Formation mechanisation of alluvial shoal in Lujiahe waterway Shahong inlet under low sediment concentration condition

LIU Lin-shuang, LI Ming, LIU Lin, ZHENG Li, ZHANG Ming

(Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

Abstract: Since the impoundment of the Three Gorges reservoir, Lujiahe waterway had been significantly eroded as the result of branch water from the reservoir. In recent years, the inlet of Shahong branch begun to deposit and formed a new shoal gradually, with the change of river boundary conditions, hydrodynamic condition and the incoming water and sediment condition. We analyze the channel morphology, hydrologic and sediment regimes, scour and silting evolution and beach distribution variations of Lujiahe waterway, based on which, we explain the deposition mechanism of Shahong inlet. Finally, we forecast the variation of sediment scouring and silting, beach morphology and river flow conditions in Shahong inlet area of Lujiahe waterway.

Keywords: Lujiahe waterway; Shahong inlet; branch water; boundary condition; hydrodynamic condition

长江中下游流域砂卵石分汉河段众多, 其特征为坡降大、流速急、流场紊动性强、不规则环流和大规模横向漫滩水流现象严重、泥沙输移量大, 水流的侵蚀力常引起河床多种剧烈变形, 如洲滩的剧烈发展或萎缩, 浅滩、碛坝和暗碛的冲刷或淤积, 汉道的兴衰等^[1-3]。其河段一般分为沙泓和石泓两汉或多汉, 石泓河床抗冲能力强、河型稳定性高, 而沙泓则具有陡涨淤落的特性。

芦家河水道^[4]属长江中游重点砂卵石碍航浅

滩河段, 其沙泓进口淤积问题一直存在, 三峡工程蓄水以前极为突出, 碍航局面频繁出现。蓄水以来, 芦家河水道总体表现为先淤积(2003—2006年)后冲刷(2006年以后)态势, 但2008年以后, 芦家河水道沙泓在整体冲刷的基础上, 其进口处泥沙淤积逐渐开始形成新的浅滩, 河道泥沙的冲淤特性受河道进出口边界条件影响较大^[5-7], 其往往决定着整个河道未来冲淤态势和浅滩演变的进一步发展。芦家河碍航特性在很早以

收稿日期: 2014-10-08

作者简介: 刘林双(1986—), 男, 博士, 工程师, 从事水力学及河流动力学专业。

前就引起了学者的注意，陈立等^[8]、罗优等^[9]研究了芦家河水道演变态势，认为该河段在三峡蓄水后总体处于冲刷状态，石泓较之沙泓冲刷严重，坝尾尾部大范围冲刷，这对河段沙、石泓分流比产生较大影响，进而影响航道。本河段有些部位抗冲刷能力强，冲刷下切并不明显，这可作为宜昌枯水位在三峡水库蓄水运用后没有大幅度下降的因素之一，但其坡陡流急问题仍会持续。段文忠等^[10]研究了松滋口分流对芦家河水道影响，认为随着三峡水库的运用，坝下游河床冲刷，松滋河分流比减小，中、小流量时在芦家河水道水流呈现出更集中于沙泓的趋势。彭严波等^[11]鉴于河段的整体性研究了关洲水道、松滋口和芦家河浅滩的关系，提出了三者共同的临界特征流量，并在此基础上，预测了芦家河浅滩段仍维持主流年内沙泓和石泓之间往复摆动的总体格局。陆永军^[12]、陈义武^[13]则分别通过数学模型和物理模型对芦家河段的演变趋势进行了研究。对芦家河水道碍航特性的研究，一方面主要集中于芦家河水道整体演变态势的研究；另一方面，三峡蓄水后芦家河水道属于近坝河段，其冲刷态势的影响对

于上下河段较为重要，其研究主要集中于芦家河段的冲刷程度等方面。对于近期出现的芦家河进口浅滩的淤积，由于出现时间较短，且由于坝下淤积的现象较为罕见，对其研究则较少。本文针对三峡蓄水后，清水下泄条件下芦家河水道沙泓进口淤沙浅滩形成的新问题，研究沙泓进口处浅滩演变机理，为砂卵石河床演变机理和长江中下游浅滩河道整治工程提供依据。

1 河段概况及冲淤特性

1.1 河道形态特征

芦家河水道位于长江中游上段，处于山区-平原河流过渡地带，属中游重点沙卵石浅滩河段，为中枯水期碍航浅滩。河道自陈二口至昌门溪，全长 12 km，属微弯放宽型水道，进口右侧有松滋河分流入洞庭湖。河道形势见图 1。放宽处河心有砾卵石坝，左右侧分别为沙泓、石泓。本水道岸坡结构主要是基岩质、土砾质和硬土质 3 种类型，岸线多年来总体较稳定，河道格局未发生改变。年内主流洪、枯水期流向在沙泓、石泓之间左右摆动。

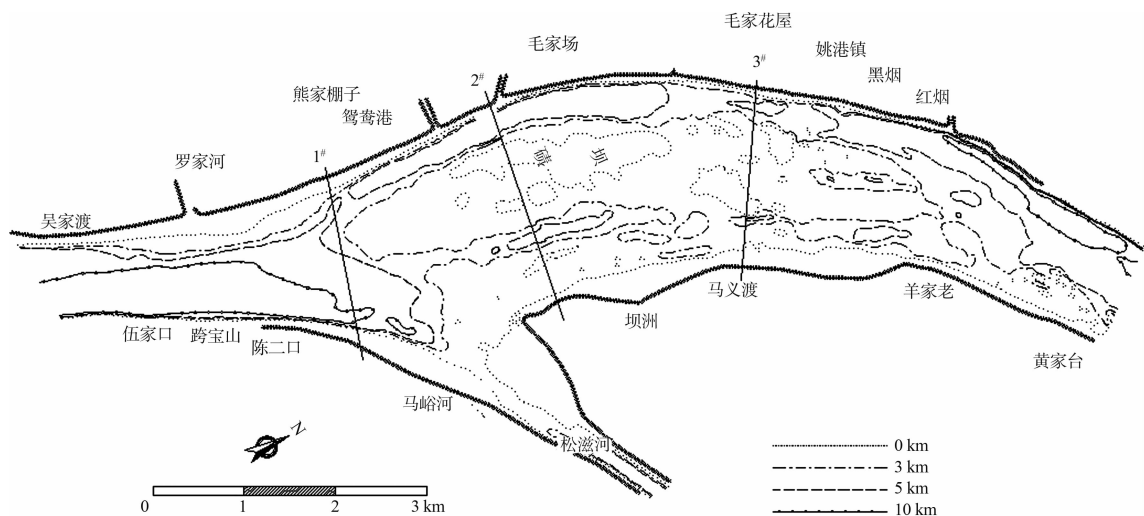


图 1 芦家河河势

三峡蓄水以前，随着洪枯流路在沙、石泓之间的摆动，沙泓洪淤枯冲的规律十分明显，沙泓进口段年内冲淤幅度平均达 10 m，最大冲淤幅度达 14 m，年间沙泓冲淤基本平衡。而石泓年内

冲淤幅度较小，一般为 1~3 m，因此，沙泓为枯水期主航道，石泓为中、洪水期主航道。由于石泓河床高程较高，一旦汛末退水速度过快，石泓水深已不足，而沙泓汛期大量淤积的泥沙又未冲

开, 则航道会出现“青黄不接”的紧张局面, 另外, 蓄水前本水道毛家花屋—姚港一带就已存在枯水比降大、流速急的不利水流条件, 给上行船舶航行带来了很大困难。

三峡水库蓄水运行以来, 芦家河河道演变规律没有发生根本性的改变, 仍然遵循“涨淤落冲”的演变规律, 因“清水”下泄, 沙泓进口泥沙淤积量大幅减少 (现淤幅在 2~5 m), 但从近期的演变情况来看, 沙泓进口航槽有逐年微幅累积性淤积的现象, 同时鸳鸯港边滩持续淤积对进口航宽也构成挤压; 随着该河段枯水位有所下降, 沙泓中段水深较浅的问题有所显现。

1.2 水文泥沙特征

临近芦家河河道有宜昌、枝城、沙市水文站, 水道位于枝城和沙市水文站之间, 三峡水库蓄水后, 2003—2008 年长江中下游各站水量偏枯 5%~10% (表 1)。2009—2011 年, 长江上游来水略有偏少, 坝下游各主要水文站平均径流量分别为 3 754、3 940、3 616 m^3/s , 较蓄水前多年平均相比, 宜昌、枝城、沙市站分别偏小 14.05%、11.45%、8.25%, 与 2003—2008 年平均值相比, 宜昌、枝城、沙市站分别偏小 5.62%、3.05%、3.56% (表 2)。三峡蓄水后, 长江上游来沙大幅减小, 2009—2011 年坝下游各主要水文站年平均输沙量分别为 0.430 亿、0.590 亿、0.930 亿 t, 较蓄水前多年平均相比, 宜昌、枝城、沙市站分别减小 91.18%、88.25%、78.52%, 较 2003—2008 年平均值相比, 宜昌、枝城分别减小 28.73%、21.22%, 沙市站则增加约 3.56% (表 2)。

1.3 冲淤演变特点

1.3.1 长期演变特点

据历史文献记载, 公元 1522—1566 年 (明嘉靖) 前, 该段荆江河道走向为松滋老城—马口镇—大布街, 即今日百里洲南汊方向; 公元 1522—1566 年, 江流冲断上、下百里洲, 形成南北两汊道, 主泓走南江, 称为南江北沱时期。经过 1830 年、1870 年及 1873 年 3 次大洪水后, 主泓转北, 南汊变为支汊, 原南江北沱的水系格局逐渐演变为

北江南沱, 至公元 1891 年, 原南江洲群向南北靠岸, 水道萎缩变小为沱, 古北沱江面大为扩展, 成为主江, 随着北江的继续发展, 北岸后退, 江面展宽, 至公元 1952 年前, 南沱无大变化。芦家河河道溃坝约形成于 1901—1952 年, 在南江北沱转为北江南沱以后, 随着北江的发展, 江面展宽,

表 1 三峡蓄水后芦家河段主要水文站径流量

站点	年份	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$a_1/\%$	$a_2/\%$
宜昌	多年平均(蓄水前)	4 368		
	2003 年	4 097	-6.20	
	2004 年	4 141	-5.20	
	2005 年	4 592	5.13	
	2006 年	2 848	-34.80	
	2007 年	4 004	-8.33	
	2008 年	4 186	-4.17	
	多年平均(2003—2008)	3 978	-8.93	
	2009 年	3 822	-12.50	-3.92
	2010 年	4 048	-7.33	1.76
	2011 年	3 393	-22.32	-14.71
多年平均(2009—2011)	3 754	-14.05	-5.62	
枝城	多年平均(蓄水前)	4 450		
	2003 年	4 232	-4.90	
	2004 年	4 218	-5.21	
	2005 年	4 545	2.13	
	2006 年	2 928	-34.20	
	2007 年	4 180	-6.07	
	2008 年	4 281	-3.80	
	多年平均(2003—2008)	4 064	-8.67	
	2009 年	4 043	-9.15	-0.52
	2010 年	4 195	-5.73	3.22
	2011 年	3 583	-19.48	-11.84
多年平均(2003—2011)	3 940	-11.45	-3.05	
沙市	多年平均(蓄水前)	3 942		
	2003 年	3 924	-0.46	
	2004 年	3 901	-1.04	
	2005 年	4 210	6.80	
	2006 年	2 795	-29.10	
	2007 年	3 770	-4.36	
	2008 年	3 902	-1.01	
	多年平均(2003—2008)	3 750	-4.86	
	2009 年	3 686	-6.49	-1.71
	2010 年	3 819	-3.12	1.84
	2011 年	3 345	-15.14	-10.80
多年平均(2009—2011)	3 616	-8.25	-3.56	

注: a_1 为相对于蓄水前多年平均流量变化率, a_2 为相对于蓄水后多年 (2003—2008 年) 平均流量变化率。

表2 三峡蓄水后芦家河段主要水文站输沙量

站点	年份	年均输沙量/亿 t	a_1 /%	a_2 /%
宜昌	多年平均(蓄水前)	4.920		
	2003年	0.976	-80.16	
	2004年	0.640	-86.99	
	2005年	1.100	-77.64	
	2006年	0.091	-98.15	
	2007年	0.527	-89.29	
	2008年	0.320	-93.50	
	多年平均(2003—2008)	0.609	-87.62	
	2009年	0.351	-92.87	-42.36
	2010年	0.328	-93.33	-46.14
	2011年	0.623	-87.34	2.30
多年平均(2009—2011)	0.430	-91.18	-28.73	
枝城	多年平均(蓄水前)	5.000		
	2003年	1.310	-73.80	
	2004年	0.804	-83.92	
	2005年	1.170	-76.60	
	2006年	0.120	-97.60	
	2007年	0.680	-86.40	
	2008年	0.390	-92.20	
	多年平均(2003—2008)	0.750	-85.09	
	2009年	0.409	-91.82	-45.17
	2010年	0.379	-92.42	-49.20
	2011年	0.975	-80.50	30.70
多年平均(2009—2011)	0.590	-88.25	-21.22	
沙市	多年平均(蓄水前)	4.340		
	2003年	1.380	-68.20	
	2004年	0.956	-77.97	
	2005年	1.320	-69.59	
	2006年	0.245	-94.35	
	2007年	0.751	-82.70	
	2008年	0.490	-88.71	
	多年平均(2003—2008)	0.86	-80.25	
	2009年	0.506	-88.34	-42.17
	2010年	0.480	-88.94	-45.14
	2011年	1.810	-58.29	106.86
多年平均(2009—2011)	0.930	-78.52	6.52	

注： a_1 为相对于蓄水前多年平均输沙量变化率， a_2 为相对于蓄水后多年（2003—2008年）平均输沙量变化率。

水流减缓，在松滋口与姚港河段中部偏北的江中出现一小洲，名乔家洲，也就是现称的碛坝。按碛坝形成过程可划分为3个阶段：1)形成阶段（1901—1952年）；2)发展阶段（1952—1981年）；3)相对稳定与冲刷阶段（1981年至今）。

1.3.2 近期演变特点

芦家河水道河道两岸有丘陵山体，岸坡主要由基岩质、土砾质和硬土质组成，加之有大堤守护及块石护坡和抛石护岸，岸线多年总体较稳定，河道格局未发生改变。蓄水以前，芦家河水道基本能够实现年内冲淤平衡，年际间变化不大，其演变最大的特点体现在：随着主流流路年内的左右摆动，沙、石两泓发生相应的大幅冲淤调整。芦家河水道主流流路规律性较强。年内，中洪水期主流位于碛坝或石泓，枯水期主流则位于沙泓。年际间，主流的位置相对比较稳定。

洪水期，主流从河心或石泓取直而下，沙泓进口一侧形成大面积回流、缓流，河床普遍发生淤积；汛后退水期，主流坐弯由石泓向沙泓偏转，水流归槽，沙泓进口河床发生冲刷，由于沙泓淤积物为细沙，易于被水流冲刷带走，沙泓进口段年内冲淤幅度平均达10 m，最大冲淤幅度达14 m。石泓年内冲淤幅度大多为1~3 m，最大达6 m，河床变化具有典型的“涨淤落冲”演变规律。据多年资料统计，当水位为39 m（黄海）以下时，主流位于沙泓，当水位为40 m（黄海）以上时，主流位于碛坝或石泓。年际间，沙泓进口冲淤基本平衡。

1.3.3 三峡工程蓄水运用以来河段冲淤变化

三峡蓄水以来，清水下泄引起了本水道进口来沙条件的明显变化，蓄水以前年内冲淤平衡的状态被改变，而且年内的冲淤调整幅度也明显削弱。表3给出了蓄水后不同年度本水道的冲淤量，由表3可以看出：蓄水之后河段经历一个先淤积后冲刷的过程，但总体还是呈冲刷态势。2006年以前，芦家河水道（陈二口—昌门溪）表现为淤积；2006年以来，水道则表现为单向冲刷，其中，2008—2009年度，冲刷量为722.5万 m^3 ，2009—2010年冲刷量为12.5万 m^3 ，冲刷幅度显现大幅减小的趋势。

从历年来冲淤调整情况（图2）来看，芦家河水道内部虽然河床组成大多为砂卵石，抗冲性较强，但蓄水以来，河道冲淤调整仍较明显。2009年以前，芦家河水道的冲淤调整主要表现为

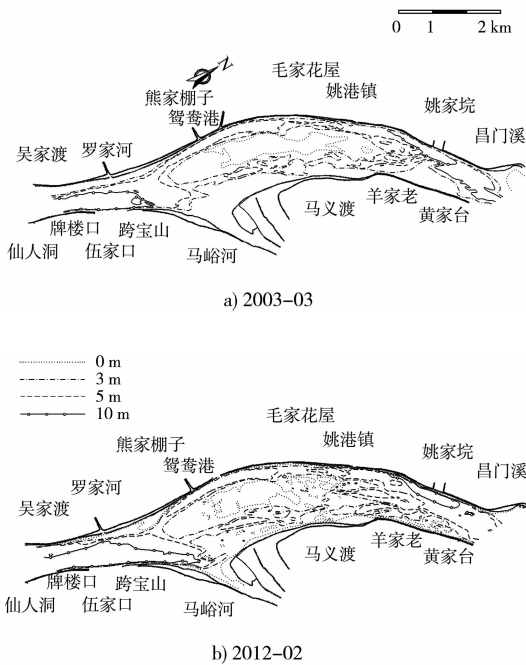
石泓进口和中下段的小幅度累积性冲刷及沙泓的小幅度累积性淤积。2009 年后, 随着上游关洲左汊的冲刷发展, 深槽走向趋向于石泓, 使得石泓内部进一步冲刷发展。同时, 由于主流带向石泓偏移, 使得沙泓进口区域出现大范围缓流区域, 沙泓进口尤其是左岸鸳鸯港一带边滩大幅度淤积, 挤压沙泓进口航槽。纵观 2003—2012 年度, 芦家河水道内虽然短期内没有发生剧烈的冲淤调整, 但年际间小幅度的累积性冲淤使得石泓出现了较为明显的冲刷发展, 主要表现为前沿的陈二口深槽明显下探及碛坝坝尾至石泓出口的冲深刷低。石泓的冲刷发展使得沙泓进口出现了较大范围的缓流区域, 沙泓进口明显淤浅, 航道条件恶化。2012 年初的地形显示, 沙泓进口 5 m 线断开达 700 m, 3 m 线也较往年明显缩窄, 从 2003 年的 400 m 缩窄至 2012 年初的 190 m。

鸳鸯港边滩滩体大部分有 1 m 以上的淤积。到 2009 年, 鸳鸯港边滩上部继续淤积, 3 m 等深线向江中有所淤展。到 2010 年鸳鸯港边滩略有冲刷。

2) 芦家河碛坝。2004 年以来芦家河碛坝洲长有较大幅度减小, 洲宽往复变化, 洲体长度大幅减小, 洲体面积也有较大幅度的减小, 2008 年仅为 2004 年的 39% (表 3)。2009 年, 碛坝受冲变小, 洲头、洲尾变散, 洲体高程也有所冲刷降低。2010 年, 碛坝略呈淤长之势, 洲头、洲尾淤积长大, 滩体高程虽未增加, 但滩体面积略有增大。

表 3 芦家河碛坝特征变化 (按 35 m 等高线统计)

时间	洲长/m	最大洲宽/m	洲面积/km ²
2004-03	4 148	670	1.67
2005-03	3 178	545	0.94
2006-03	2 620	765	0.76
2007-03	2 480	600	0.77
2008-03	2 000	560	0.65
2009-03	1 283	408	0.41
2010-04	2 147	605	



注: 根据长江航道测量中心 1:10 000 测图绘制。

图 2 芦家河水道河势变化

1.3.4 洲滩变化

1) 鸳鸯港边滩。蓄水前鸳鸯港边滩冲淤交替, 蓄水后边滩大幅冲刷后退, 2007 年 3 月比较 2006 年同期, 鸳鸯港边滩近深槽侧, 部分冲深在 2 m 以上。到 2008 年, 边滩淤积, 滩体外缘右移,

2 芦家河沙泓进口淤沙浅滩形成机理分析

2.1 水动力条件

水动力轴线变化规律是河道水流运动的一个重要特征。三峡蓄水后, 关洲左汊冲刷和沙泓碛坝坝头冲刷后退改变了沙泓进口处主流位置, 进而影响到沙泓进口处水动力学条件和泥沙冲淤特性 (图 3)。洪水主流右偏将有利于石泓进口的冲刷和沙泓进口处的淤积, 而退水期主流右偏将不利于浅滩冲刷, 在中洪水时期, 石泓为主航道, 此时沙泓在大水条件下淤积, 随着沙泓进口处的泥沙淤积加剧, 一旦汛末开始退水, 石泓水深已不足, 而沙泓汛期逐年加剧的淤积越来越难以在此阶段冲开, 则航道会再次出现“青黄不接”的紧张局面。与此同时, 沙泓碛坝坝头冲刷后退和主流右偏, 使得同级流量下, 碛坝坝头区域漫滩水流的范围明显增大, 同级流量下流速下降, 流路也更为弯曲。使得水流从石泓向沙泓内部偏转的难度进一步加大, 流速的下降导致水流挟沙力的降低, 这一水流动力特点的变化使得泥沙在输

移至沙泓进口区域时更容易落淤，是沙泓进口淤积在近年来再度出现的水流动力条件。

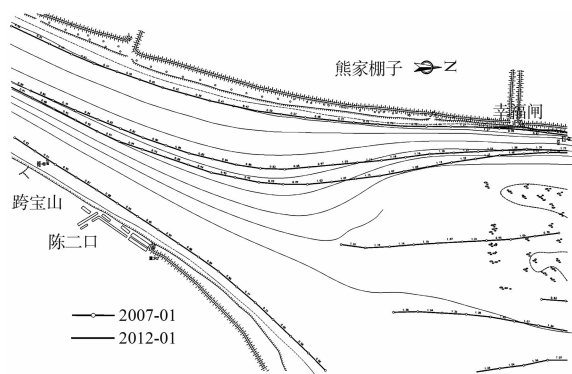


图3 芦家河进口段流线变化

2.2 水沙过程变化

2.2.1 来水过程变化

三峡水库蓄水前后宜昌径流量的变化给出了相应的统计数值(图4)。其中,三峡水库蓄水前统计年份为1950—2002年,三峡水库蓄水后依据蓄水进程和坝前水位运用情况,分为2003—2008年、2009—2013年等不同时段。图4表明:1)径流总量变化不大,较蓄水前略有减少。与蓄水前相比,三峡水库蓄水初期,2003—2008年长江中下游宜昌站水量相对蓄水前偏枯5%~10%。2009年,长江上游来水略有偏少。宜昌站径流量为3 822 m³,较蓄水前多年平均相比,偏小13%。这主要是由于近期的上游来流偏枯,缺少大水年所造成的。2)年内分配过程略有改变。从年内分配过程变化情况看,由于水库的调节作用,枯期径流量略有增加,各月径流量较蓄水前增加约8%~22%,汛后蓄水期径流量略有减少,而由于近期水沙多为中小水年,汛期流量较多年平均值也有所减小。从减小的比例看,蓄水期10月份减小最大,为31%,汛期7—9月份减小10%~11%。3)蓄水后不同时期相比,由于水库坝前水位不断抬高,调蓄能力逐步增强,枯期的流量有所增加,汛后蓄水期的下泄流量进一步减小。从枯期1—3月平均流量看,蓄水后2003—2006、2007—2008、2009—2011年分别为123亿、120亿、152亿m³,汛后9、10月份平均流量分别为495亿、480亿、342亿m³,175 m试验性蓄水后尤为明显,枯水流量较蓄水前

增加了约45亿m³,但汛后退水期流量减少了约228亿m³,换算为流量分别为1 736、8 796 m³/s。

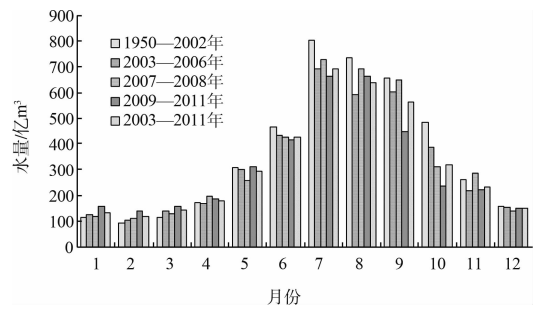


图4 三峡水库蓄水前后宜昌逐月流量变化

2.2.2 来沙过程变化

图5给出了三峡水库蓄水前后宜昌逐月沙量的变化。由图5可知:1)三峡水库蓄水后宜昌沙量减少明显。2003—2011年宜昌站年均输沙量仅为5 420万t,较蓄水前49 200万t减少了88.7%。2)从各月的变化来看,无论汛期、枯期,下泄沙量均较为明显,从各月减少的比例看,较蓄水前减沙均超过了80%,汛后蓄水期减少最大,约96%~98%。三峡水库蓄水后2003—2011年近乎“清水下泄”。3)蓄水后各时段相比,虽然存在水文年的波动,但整体而言,汛期及枯期的沙量变化相对较小,但由于坝前水位的持续抬高,2003—2006、2007—2008、2009—2011年汛后蓄水期的9、10月份的下泄沙量持续减小。

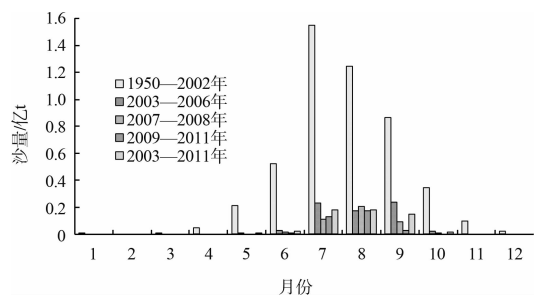


图5 三峡水库蓄水前后宜昌逐月沙量变化

三峡蓄水以后,尽管上游来沙大幅度减小,有利于下游河段的泥沙冲刷,但相比蓄水初期,三峡175 m试验性蓄水后汛后退水进一步加快,对于沙泓进口淤积体的汛后退水冲刷有较为不利的影 响。这一流量变化进一步减小了汛后水流冲刷沙泓进口浅区的能力,对于沙泓进口淤积的再度出现,其作用也难以忽视。

2.3 泥沙边界条件

泥沙粒径对河床演变的影响主要分为两方面: 一为来沙中泥沙粒径的影响; 二为河床组成泥沙粒径的影响。前者对河床的影响主要表现在泥沙各级配水流挟沙力的饱和状态, 后者则表现为对水流挟沙力的补充能力。两者相互作用决定河床泥沙的交换, 最终决定河床的冲淤。

2.3.1 悬移质级配变化

由于水库的淤积, 大部分粗颗粒泥沙被拦截在库内, 下泄泥沙明显细化。表 4 为 2003—2011 年的宜昌出库粗细颗粒分组输沙统计以及中值粒径的变化。由表 4 可知, 不同组成的颗粒相比, 下泄泥沙中粗颗粒的比例减少, 而细颗粒的比例明显增加。2003—2008 年宜昌站悬沙中值粒径范围为 0.003 ~ 0.007 mm, 与蓄水前的 0.009 mm 相比, 出库泥沙粒径明显偏细。2009—2011 年宜昌站悬沙中值粒径范围为 0.003 ~ 0.007 mm, 与蓄水前的 0.009 mm 相比, 出库泥沙粒径明显偏细, 且呈逐年变大趋势。蓄水后不同时段相比, 随着坝前水位的抬高, 出库大于 0.125 mm 的粗颗粒泥沙所占比例呈不断减少的态势, 相对的细颗粒的出库比例有所增加。从悬移质的中值粒径变化情况来看 (表 5), 紧邻坝下的宜昌、枝城两站, 中值粒径总体较细, 没有明显的变化规律。处于荆江的沙市站的中值粒径一度增大, 随后又逐渐减小, 反映了区间河段粗颗粒泥沙补给量先增大随后减小的过程。

表 4 宜昌站分组输沙

时间	沙质量百分数/%			中值粒径
	$D \leq 0.031$	$0.031 < D \leq 0.125$	$D > 0.125$	
多年平均	73.9	17.1	9.0	0.009
2003 年	77.9	11.3	14.0	0.007
2004 年	85.7	10.1	8.9	0.005
2005 年	92.0	7.0	5.4	0.005
2006 年	92.3	7.4	2.2	0.003
2007 年	91.5	7.1	2.5	0.003
2008 年	92.1	6.5	1.4	0.003
2009 年			1.5	0.003
2010 年	91.0	7.6	1.4	0.006
2011 年	89.3	9.6	1.1	0.007

表 5 三峡水库坝下游主要水文站中值粒径 mm

年份	宜昌	枝城	沙市
蓄水前平均	0.009	0.009	0.012
2003	0.007	0.011	0.018
2004	0.005	0.009	0.022
2005	0.005	0.007	0.013
2006	0.003	0.006	0.099
2007	0.003	0.009	0.017
2008	0.003	0.006	0.017
多年平均(2003—2008)	0.004	0.008	0.031
2009	0.003	0.005	0.012
2010	0.006	0.007	0.010
2011	0.007	0.008	0.018
2012	0.007	0.009	0.012
多年平均(2009—2012)	0.006	0.007	0.013

注: 宜昌、监利站多年平均统计年份为 1986—2002 年, 枝城站多年平均统计年份为 1992—2002 年, 沙市站多年平均统计年份为 1991—2002 年。

悬移质中粒径大于 0.125 mm 的泥沙可以认为是长江中游河槽的主要组成部分, 基本可以反映悬移质中床沙质的沿程变化情况 (表 6)。2009 年以前粒径大于 0.125 mm 的泥沙输移量, 宜昌站、枝城站、沙市站分别为 4 428 万、3 450 万、4 253 万 t, 蓄水初期 2003—2008 年 3 站分别为 397 万、1 250 万、2 363 万 t, 2009—2012 年 3 站粒径大于 0.125 mm 的泥沙含量仍然大幅减少, 来水情况对大部分站点粒径大于 0.125 mm 泥沙的沿程恢复有比较明显的影响, 2010 年、2012 年水量偏大, 该组泥沙含量相应较高。

表 6 三峡水库坝下游主要水文站

年份	$D > 0.125$ mm 输沙量		
	宜昌	枝城	沙市
蓄水前平均*	4 428	3 450	4 253
多年平均(2003—2009)	397	1 250	2 363
2009	53	393	1 493
2010	46	235	902
2011	7	71	485
2012	51	126	808

注: 宜昌站多年平均统计年份为 1986—2002 年, 枝城站多年平均统计年份为 1992—2002 年, 沙市站多年平均统计年份为 1991—2002 年。

2.3.2 河床泥沙粒径变化

三峡蓄水后, 坝下游悬移质泥沙含量减少, 由于水流挟沙力的沿程恢复饱和, 河道沿程冲刷。

冲淤调整使得芦家河水道的河床组成发生调整,但河段内部局部仍有沙质河床存在。根据实测资料分析,三峡蓄水后,芦家河进口河段淤沙中值粒径 D_{50} 为 0.2 ~ 0.25 mm,泥沙组成明显粗化,泥沙粒径条件改变,直接影响水流挟沙能力,进而直接影响到泥沙输移过程。冲淤调整使得芦家河水道的河床组成发生调整,但河段内部局部仍有沙质河床存在。以 1[#] 为例,1[#] 断面位于芦家河浅滩上段,为沙泓进口的上边界条件,断面形态为不对称的“W”型。由 2010 年 1[#] 断面床沙横向分布来看,左汊主泓为小卵石夹沙河床, D_{50} 为 26.6 mm;其余为纯沙河床, D_{50} 一般为 0.147 ~ 0.273 mm。右汊大部分为纯沙河床, D_{50} 一般为 0.211 ~ 0.273 mm;右槽右侧滩地为小卵石夹沙河床, D_{50} 为 6.9 mm。与 2003 年比较,主要表现在左、右汊沙质河床略粗化,部分垂线由纯沙河床变为小卵石夹沙河床。

根据 2010 年河床组成勘测资料,目前芦家河道碛坝滩体的卵石面积 0.57 km²,占 70%,主要分布在滩体的中、上段;纯砂面积 3.28 km²,占 30%,主要分布在滩体的中、下段。滩头泥沙中值粒径在 2002 年、2010 年分别为 50、56.9 mm,滩体中部泥沙中值粒径 2002 年、2010 年分别为 0.221、20.9 mm,滩尾泥沙中值粒径 2002 年、2010 年分别为 0.186、0.241 mm。从目前来看,滩体中部已经发生了明显的粗化,滩尾部分粗化并不明显。

泥沙粗化使得淤沙由悬移质沉积逐渐向推移质堆积过渡,更易在沙泓进口区域落淤。对比三峡蓄水前后沙泓进口泥沙取样的结果可以看出:三峡蓄水前,沙泓进口的淤沙主要以悬移质泥沙为主,淤沙中值粒径 D_{50} 为 0.014 ~ 0.032 mm,且 98% 的淤沙粒径小于 0.1 mm,泥沙的淤积表现为缓流区域内部泥沙的缓慢沉积。三峡蓄水后,沙泓进口的淤沙由悬移质逐渐向推移质过渡,淤沙中值粒径 D_{50} 为 0.2 ~ 0.25 mm,泥沙组成明显粗化,在三峡水库清水下泄,悬沙减小的大背景下,泥沙淤积的表现形式正逐渐由悬沙的沉积向推移

质泥沙的堆积过渡。上述泥沙输移特性的变化使得沙泓进口的泥沙运动更多地以底沙推移的状态向下游运动,对水流条件的变化更为敏感,在沙泓进口流速刚开始减小时便迅速堆积下来,因此,其淤积区域较悬沙沉积明显靠上,且范围有所减小。

3 演变趋势分析

芦家河道沙泓进口短期内进一步淤浅的可能性较大。根据分析,芦家河道沙泓进口浅区近期的淤积并非突发性偶然现象,而是由于上游三峡蓄水后汛后退水速度加快、关洲河道形态调整以及蓄水后来沙组成粗化等多种因素造成的。芦家河道沙泓进口区域一直以来均是泥沙淤积的缓流区域,遵循汛淤枯冲的一般变化规律,近期一方面上游关洲水道左汊及芦家河道石泓冲刷发展,造成芦家河道进口主流右偏,沙泓进口区域缓流范围增大;第二方面,虽然上游来沙大幅减少,但组成明显粗化,相应淤沙粒径也明显增加,造成进口汛期淤积的泥沙在枯水期难以完全冲刷下移;在这一背景下,尽管上游来沙大幅度减小,但相比蓄水初期,三峡 175 m 试验性蓄水后汛后退水进一步加快,对于沙泓进口淤积体的汛后退水冲刷也有不利影响。上述多方面因素使得芦家河沙泓进口区域淤沙现象再度出现,且由悬移质泥沙的沉积,逐渐向推移质泥沙堆积现象过渡。预计短期内,上游来水来沙条件不会发生大的调整,随着河段冲刷、支汊发展的进一步深化,芦家河道沙泓进口的淤积问题短期内还有可能进一步恶化。

4 结论

1) 芦家河道抗冲性较强,河势总体仍将保持稳定。三峡水库蓄水后,芦家河道将继续保持冲刷状态,但由于河道形态复杂,因此水道内不同部位的冲淤演变趋势差异较大。芦家河道进口处,沙泓进口鸳鸯港边滩淤积外延、河床淤积现象持续存在并将有所加剧。

2) 砂卵石河道演变仍主要受河段边界条件、水动力条件、来水来沙情况、分流比等作用的影响。芦家河河段沙泓进口近期淤积主要受漫滩横流范围加大, 泥沙粗化、汛后退水速度进一步加快, 以及进出口边界的调整等因素的综合影响。

3) 三峡水库进入蓄水阶段, 汛后退水进一步加快, 受此影响, 水流对芦家河沙泓进口淤沙的挟带能力进一步减弱, 沙泓进口航道条件逐渐恶化。今后一段时期, 三峡水库将长期采用 175 m 蓄水的运行方式, 宜昌至昌门溪河段汛后退水加快的现象不会发生根本性改变, 沙泓进口的这一淤沙问题将在一段时间内长期存在, 并在短期内有可能进一步恶化。河道的冲刷带来了上下游水位的相应下降, 以及河段分流比的变化, 沙泓分流比有所减少, 淞滋河分流比变化不大。

参考文献:

- [1] 孙昭华, 李义天, 葛华. 长江中游沙卵石-沙质河床过渡带冲刷趋势研究[J]. 水利学报, 2011(7): 789-797.
- [2] 唐银安, 陈建华. 砂卵石河床冲淤变形对航道的危害及利用和遏制[J]. 水运工程, 1999(6): 27-30.
- [3] 许炯心. 汉江丹江口水库下游河床下伏卵石层对河床调整的影响[J]. 泥沙研究, 1999(3): 48-52.
- [4] 陈立, 谢葆玲, 崔承章. 对长江芦家河浅滩段演变特性的新认识[J]. 水科学进展, 2000(3): 241-246.
- [5] Wang Jun, Chen Pangpang, Sui Jueyi. Proessin studies on ice accumulation in river bends[J]. Journal of Hydrodynamics, 2011(6): 737-744.
- [6] 孙昭华, 李义天, 李明. 长江中游沙卵石河段坡陡流急现象成因及对策研究(I): 发展趋势探析[J]. 2007(5): 9-16.
- [7] 何娟, 陈立, 周迎军. 河床边界条件改变对强约束型分汊河道冲刷调整的影响[J]. 水运工程, 2009(5): 92-97.
- [8] 陈立, 谢葆玲. 对长江芦家河浅滩段演变特性的新认识[J]. 水科学进展, 2000(3): 241-246.
- [9] 罗优, 陈立, 周银军. 三峡蓄水后芦家河河段演变分析[J]. 水运工程, 2009(12): 154-158.
- [10] 段文忠, 余明辉, 郑亚慧. 松滋口分流及其对芦家河河势影响研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(3): 43-49.
- [11] 彭严波, 阳华芳, 姚远霞. 关洲汉道、松滋口与芦家河浅滩演变关系研究[C]//中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会. 第四届学术讨论会论文集, 2003: 470-474.
- [12] 陆永军. 荆江重点浅滩现状整治的二维动床数学模型研究——模型的应用[J]. 水道港口, 1997(1): 25-33.
- [13] 陈义武. 河道整治研究——芦家河浅滩河段整治工程泥沙实体模型试验研究[G]//长江年鉴 2005. 武汉: 长江水利委员会长江年鉴社, 2006.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

国务院批复珠江—西江经济带上升为国家战略

《国务院关于珠江—西江经济带发展规划的批复》日前发布, 珠江—西江经济带上升为国家战略。《批复》指出, 《规划》实施要以推进协同发展为主线, 以保护生态环境为前提, 以全面深化改革开放为动力, 坚持基础设施先行, 着力打造综合交通大通道; 坚持绿色发展, 着力建设珠江—西江生态廊道; 坚持优化升级, 着力构建现代产业体系; 坚持统筹协调, 着力推进新型城镇化发展; 坚持民生优先, 着力提高公共服务水平; 坚持开放引领, 着力构筑开放合作新高地, 努力把珠江—西江经济带打造成为我国西南、中南地区开放发展新的增长极, 为区域协调发展和流域生态文明建设提供示范。

(摘编自《中国交通新闻网》)