

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.03.007

任方方, 左利钦, 陆永军. 三峡水库蓄水前后窑监河段年内河床演变分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(3): 45-52. (REN Fang-fang, ZUO Li-qin, LU Yong-jun. Annual analysis of Yaojian reach riverbed evolution before and after impoundment of the Three Gorges reservoir[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(3): 45-52.)

三峡水库蓄水前后窑监河段年内河床演变分析

任方方^{1,2}, 左利钦², 陆永军²

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 三峡水库蓄水后, 窑监河段上游的来水来沙条件发生改变, 使河床发生相应调整。三峡工程不仅引起该河段年际间水沙特征变化, 含沙量显著减小, 年内水沙过程也发生变化, 表现为蓄水期流量减少, 退水过程加快。根据现有实测地形数据, 对三峡水库蓄水前后 2002 和 2007 年年内监利河段河床冲淤分布、横断面变化与航道条件进行了比较, 并采用资料分析、数学模型等方法对航道条件变化的原因进行了分析。研究表明: 三峡水库蓄水后, 监利河段年内仍遵循蓄水前“涨淤落冲”的规律; 汛期淤积强度较蓄水前减弱, 汛后冲刷动力也有所减小, 水沙不利年份时航道条件仍呈恶化态势。

关键词: 年内演变规律; 退水冲刷; 三峡水库; 窑监河段

中图分类号: TV147

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)03-0045-08

三峡水库自 2003 年蓄水运行以来, 改变了下游河道的来水来沙条件。位于三峡水库大坝下游的窑监河段是长江中游重点碍航河段, 其河道冲淤演变规律也发生了变化。受三峡工程“清水下泄”和自身河床演变的影响, 本河段河道演变趋势和航道形势得到了广泛关注。已有研究^[1-3]表明: 三峡水库蓄水后, 窑监河段近年来整体表现为冲刷, 总体河势稳定, 乌龟洲将保持现有的分汊格局。目前, 通过实施整治工程, 本河段深槽稳定, 但河床演变复杂, 仍需持续关注。

针对三峡工程对窑监河段的影响已有大量研究, 主要集中于年际间演变规律分析, 预测演变趋势, 并提出相应的整治措施^[4-7], 而针对三峡工程运行前后年内演变规律的定量变化及原因研究较少。由于水库的调节作用导致年内水沙动力过程变化, 这种变化对航道造成的影响值得关注。本文收集了窑监河段在三峡水库蓄水前 2002 年及蓄水后 2007 年水文、地形资料, 并对年内冲淤量进行了统计, 比较了不同时期的冲淤规律, 并根据水沙资料分析和二维数学模型计算研究了变化原因。该研究不仅有利于加深对窑监河段航道条件变化的理解, 且对认识三峡水库蓄水后河床年内演变规律与水沙过程之间的响应关系有很大帮助。

1 河段概况

窑监河段位于长江中游下荆江河段, 上起窑集佬, 下至太和岭, 为两头窄中间宽的弯曲分汊河型。河段两岸一般为近代或现代新淤积的河漫滩相沉积物, 呈土-砂二元结构, 下部以中细沙为主, 上部有 2~15 cm 的河漫滩相黏性土质, 抗冲性弱。河段主流走向从鹅公凸贴右岸下行, 过塔市驿后, 基本分成两股水流, 分走

收稿日期: 2014-11-25

基金项目: 国家“973 计划”资助项目(2012CB417002); “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAB04B03); 中央级公益性科研院所基本科研业务(Y211001)

作者简介: 任方方(1989—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事河流海岸水动力学研究。

E-mail: renfang_hhu@126.com 通信作者: 陆永军(E-mail: yjlu@nhri.cn)

乌龟洲左右汉,其中右汉占 90%以上,两股水流出乌龟洲后在太和岭附近汇流。历史上该河道变化剧烈,主支汉易位频繁,滩槽冲淤多变。2000 年后,枯季乌龟洲右汉河道宽浅、自然水深严重不足,槽口多变且疏浚后回淤严重,航道条件急剧恶化,2003 年三峡水库蓄水以来,窑监河段航行条件进一步恶化明显,2008 年 1 月一度造成极为恶劣的长时间断航,2010 年窑监河段航道整治工程竣工,通航条件趋于好转,至 2014 年 3.5 m 深槽贯通,目前航槽稳定(见图 1)。虽然目前该河段已处于相对较好时期,但随着国家对长江黄金水道发展战略的提出,本河段航道水深需进一步增加,因此深入分析窑监河段航道条件与三峡水库调度的响应关系非常迫切。

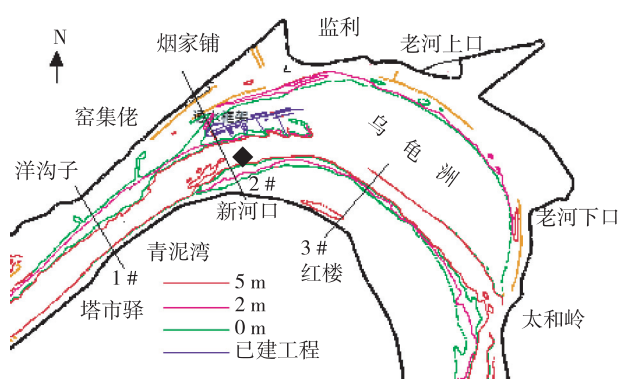


图 1 2014 年 2 月窑监河段河势

Fig. 1 River regimes of Yaojian reach in February 2014

2 三峡水库蓄水后的水沙特性

本河段径流及泥沙主要来自宜昌以上长江干流,沿程经荆江三口分流一部分入洞庭湖,尾端有洞庭湖来水入汇。监利站多年实测平均径流量 3 600 亿 m^3 ,实测最大流量为 46 300 m^3/s ,最小流量为 2 650 m^3/s ;来水集中在汛期 5—10 月,其中主汛期 7—9 月占全年的 90.32%。

根据实测资料统计,三峡水库蓄水后,监利站枯水期 12 月至次年 4 月偏多 1%~23%,主汛期(7—9 月)流量较蓄水前偏少 8%~16%,这主要是流域来水变化引起的。年内流量过程较蓄水前坦化,枯水期水量加大,反映了三峡水库调洪补枯的特点。根据三峡工程的运行方式,三峡水库对径流总量无明显影响,但对径流的年内过程有一定影响^[8-10],表现在:12 月至次年 5 月水库下泄流量大于天然径流量,枯期流量加大;预泄期(5 月至 6 月上旬)水库腾空,下泄流量增加;6—9 月汛期水库敞泄,流量与建库前相比基本不变,仅洪峰流量有所削减,含沙量减小;而 9—11 月蓄水期则存在明显的减泄现象,较建库前同期多年平均值减小约 42.7%,如 2009 年最大减泄流量 12 015 m^3/s ,汛后退水加快。概括来说,三峡工程的径流调节具有汛期流量(除特大水年)改变不大、汛末蓄水期流量陡减、汛前预泄期流量增大以及枯期流量有所增大的特点。

从含沙量变化而言,三峡水库蓄水前监利站多年平均含沙量为 0.996 kg/m^3 ,由于上游大量来沙被拦蓄在库内,本河段来沙量发生显著改变^[10-11],出库及坝下水流含沙量明显减小,监利水文站含沙量均远小于蓄水前多年含沙量,2003—2011 年平均含沙量为 0.165 kg/m^3 。

3 三峡水库蓄水后年内演变规律

监利河段属弯曲分汉河型,自然状态下的河床演变具有分汉河型与弯曲河型的双重特征,在汉道变迁和弯道环流相互影响下,河床演变规律复杂。主流在凹岸左汉时,在弯道环流作用下产生泥沙不平衡输移,凹岸(老河下口)崩塌,凸岸(乌龟洲)淤长,弯顶不断下移,主流线低水坐弯、高水趋直,当主流线与河弯半径不相适应时,产生切滩撇弯,凸岸右汉发展成为主汉;当来水来沙较大及上游主流直入左汉时,右汉发展受到限制,主流又复向左汉,如此在一定时间内呈周期性变化^[3]。

3.1 年内冲淤规律

限于资料,本文根据收集到的窑监河段 2002 年 4 月和 9—11 月,2007 年 8—11 月资料进行年内河床冲淤分析。2002 年长江上游总体表现为平水(略偏少)少沙,长江中下游总体表现为丰水少沙年,而 2007 年长江上游来水较多,下游则在枯季遭遇低水位,在枯期对航运实施流量补偿调度,以满足枯季通航水位要求。2002 年监利站的年平均流量 11 109 m^3/s ,2007 年平均流量 11 570 m^3/s ,基本属中水年,二者具有一定的可

比性。

表 2 给出了三峡水库蓄水前各时段本河段冲淤分布。根据河道特性,冲淤统计河段可分为 3 段,窑集佬段、右汉进口段、右汉段。历史上航道浅水段主要位于右汉进口段,这里以右汉进口段为例重点说明。

表 2 监利河段整治线内 2002 和 2007 年统计河床冲淤量

Tab. 2 Erosion and deposition amount of Jianli reach in 2002 and 2007									万 m ³
	2002-04-21—2002-09-24			2002-09-24—2002-10-25			2002-10-25—2002-11-20		
	冲刷	淤积	净冲淤量	冲刷	淤积	净冲淤量	冲刷	淤积	净冲淤量
窑集佬河段	-134.4	450.0	315.7	-244.5	153.4	-91.1	-167.6	56.7	-110.9
右汉进口段	-105.7	511.1	405.3	-293.1	198.9	-94.2	-101.6	96.3	-5.3
右汉	-579.8	814.5	234.7	-372.6	646.8	274.2	-439.1	226.8	-212.4
总计	-819.9	1775.6	955.7	-910.2	999.0	88.9	-708.3	379.8	-328.5
	2007-08-11—2007-09-19			2007-09-19—2007-10-30			2007-10-30—2007-11-25		
	冲刷	淤积	净冲淤量	冲刷	淤积	净冲淤量	冲刷	淤积	净冲淤量
窑集佬河段	-306.4	141.4	-165.0	-273.3	180.2	-93.0	-162.3	73.2	-89.1
右汉进口段	-148.3	228.8	80.5	-217.8	96.4	-121.3	-92.2	164.4	72.2
右汉	-489.6	191.8	-297.9	-376.0	612.7	236.7	-344.7	556.9	212.2
总计	-944.3	561.9	-382.4	-867.1	889.3	22.3	-599.2	794.5	195.3

统计结果表明:2002 年 4 月至 9 月 24 日处于汛期,本河段上游泥沙大量淤积,主要分布在窑集佬右岸深槽,新河口边滩及乌龟洲洲头,淤积厚度达 2 m 以上,右汉进口段淤积 405.3 万 m³。9 月 24 日至 10 月 25 日新河口边滩冲深 1~2 m,乌龟洲洲头后退,右汉进口段冲刷 94.2 万 m³,右汉淤积 274.2 万 m³;到 11 月 20 日,右汉进口段冲刷 5.3 万 m³,右汉冲刷 212.4 万 m³。由此可见,在三峡水库蓄水前,右汉进口段枯期冲刷量远小于汛期淤积量,因此航深不足,导致浅滩碍航。新河口边滩与乌龟洲心滩变形此消彼长,新河口边滩及右汉进口段浅滩遵循“洪淤枯冲”的演变规律。落水期由于浅滩段水深较小而深槽段水深较大,挟沙能力浅滩段大于深槽段,浅滩段冲刷,深槽段淤积。

三峡水库蓄水初期,浅滩年内仍保持“洪淤枯冲”的演变规律。2007 年汛期资料仅收集到 8 月 11 日至 9 月 19 日,比 2002 年历时短了很多,在汛期淤积方面二者不具可比性,但也反映了一定的规律,该时段内右汉进口段淤积了 80.5 万 m³。退水期 9 月 19 日至 11 月 25 日,右汉进口段合计冲刷 49.1 万 m³,小于 8—9 月的淤积,若再算上 8 月之前的淤积量,则该段不能冲走的淤沙更多。

综上所述,从年内变化规律来看,监利河段年内滩槽冲淤规律基本没变,由于右汉进口段浅滩在汛期位于缓流区,而右汉处于主流区,导致右汉进口段浅滩“洪淤枯冲”、右汉则“洪冲枯淤”。由于来沙量减少,2007 年监利河段淤积强度较 2002 年减弱,甚至总河段有所冲刷,但右汉进口段仍有所淤积,虽然汛期淤积的泥沙大幅减小,但汛后冲刷强度也减弱,该段正是航道出浅段,因此这是引起航道条件持续恶化的主要原因之一。

3.2 横断面演变规律

图 2 为断面 1~3(图 1)在三峡水库蓄水前后的变化规律,可见,三峡水库蓄水后,河床断面整体上年内仍遵循“涨淤落冲”的规律,即汛期浅滩淤积,落水期浅滩冲刷,但各个断面的年内变化规律有区别,具体如下:

(1)三峡水库蓄水前,窑集佬附近断面 1 在进入汛期后左边滩大幅度淤积,汛后 9—10 月冲刷,枯季冲刷,右深槽发生淤积,到 11 月份,最大冲深达 5 m。乌龟洲进口断面 2 处分布有散乱浅滩,水流较分散,蓄水前,年内变化不明显,整体比较稳定。乌龟洲右汉断面 3 涨水期右边滩淤积,进入枯水期汉道右边滩冲刷,乌龟洲滩体右缘冲刷。

(2)三峡水库蓄水后,断面 1 汛期(8—9 月)左边滩淤积约 1 m,进入退水期后,开始冲刷,到 11 月 20

日,冲刷厚度达 4 m。断面 2 变化较为活跃,断面冲刷范围逐渐左移;由断面 3 可以看出,蓄水后,枯水期乌龟洲滩体右汊左侧深槽明显淤积。

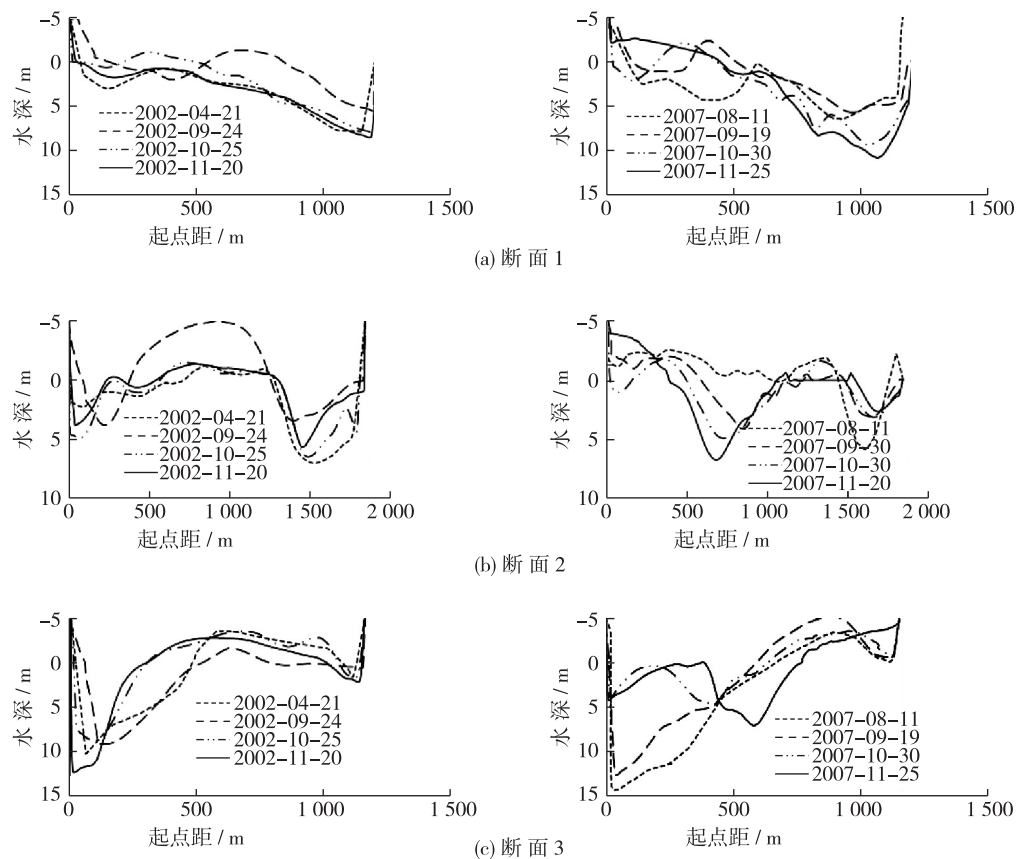


图 2 三峡水库蓄水前后水深年内变化规律

Fig. 2 Changes of water depth in the year before and after impoundment of Three Gorges reservoir

如前所述,三峡水库蓄水后,长江中下游浅滩延续了浅滩年内“洪淤枯冲”的变化规律,但由于中枯水历时较蓄水前长以及枯水期流量增加,乌龟夹进口段断面变化比较活跃,深槽有左移趋势,右汊断面 3 枯水期左侧深槽淤积。

3.3 落冲规律变化分析

根据前文分析,三峡水库蓄水后浅滩段年内虽然仍呈现“涨淤落冲”的规律,但冲淤幅度发生了变化。对于一个水文年,浅滩一般表现为涨水期淤积,退水期冲刷;而深槽与此相反。“落冲”规律指的是浅滩在一个水文年中,汛期过后,流量降低、水位回落过程中,河道冲刷的现象。乌龟夹进口段浅滩汛期仍会淤积,落水时能否把淤积物冲走,是航道研究中特别关注的问题,因此本文着重分析这一变化规律。

3.3.1 三峡水库蓄水前后水情分析 根据三峡建库前后实测资料的统计^[12],在蓄水期 9—11 月份,与三峡水库蓄水前的 1953—1990 年相比,蓄水后的 2003—2009 年,三峡水库 9,10,11 月份的入库流量分别减小了 2 263,2 188 和 2 120 m^3/s ,入库沙量分别减小 54.4%,62.0%和 41.4%,出库流量分别减小 3 075,5 642 和 1 191 m^3/s ,出库沙量分别减小 83.0%,96.4%,98.3%,出库流量和沙量减小值明显大于入库流量和沙量减小值,表明出库流量沙量受三峡水库汛后蓄水影响较大。由于水库蓄水减小了下泄流量,使得洪水期迅速过渡到枯水期,加快了退水过程。

2002 年和 2007 年同属中水年,但其年内流量过程有差异,导致本河段航道冲淤变化有差异(见图 3)。三峡水库于 2006 年 11 月开始蓄水至 156 m 运行,2007 年 9 月 25 日至 10 月 23 日为蓄水期^[13]。从图 3 中可

见,2007年汛后流量大于2002年,汛期由于三峡水库的拦蓄作用,泥沙减少最为显著,可达到80%以上。从年输沙量变化过程来看,三峡水库蓄水后,1—4月和9—12月的月平均输沙量减小百分比小于月平均含沙量减小百分比,说明枯季流量增加,汛期流量降低,与流量过程变化相对应。

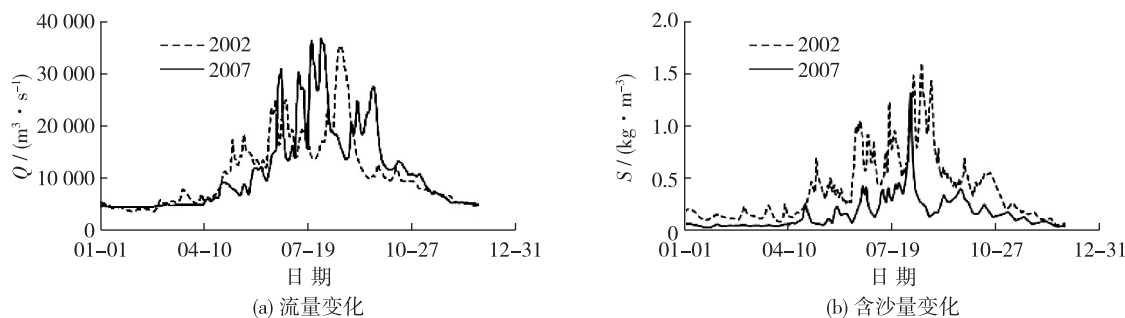


图3 2002和2007年监利站年内流量和含沙量变化

Fig. 3 Change of discharge and sediment concentration of Jianli station in 2002 and 2007

3.3.2 窑监河段年内演变规律变化分析 洪水期主流取直,浅滩流速相对较小,因而造成淤积,汛后流量变小后,主流归槽,开始冲刷。因此,存在某级流量之下浅滩才开始冲刷。陆永军等^[14]统计的实测资料表明,当流量小于15 000 m^3/s 时,长江中游浅滩开始冲刷。李义天等^[3]通过对实测资料分析给出了分汊河段临界流量的取值,并认为下荆江枯水流量临界值为11 000 m^3/s ,即当流量小于11 000 m^3/s 时,主流位于枯水汉深槽,浅滩开始冲刷;洪水流量临界值为27 000 m^3/s ,即当流量大于该值时,主流位于洪水汉附近,洪水汉滩槽开始冲刷。流量小于5 500 m^3/s 时,对河槽冲刷作用不明显,本文取枯水流量5 500~11 000 m^3/s ^[3]进行冲刷时间统计。

由图3可知,三峡水库蓄水前,2002年8月27日至9月12日流量从28 300 m^3/s 降到10 900 m^3/s ,新河口边滩、右汊进口段开始冲刷;9月24日至10月25日平均流量10 517 m^3/s ,实测右汊进口段总体平均冲深1~2 m;枯水流量持续133 d,汛期落淤的泥沙得到冲刷。三峡水库蓄水后的2007年9月19日至10月30日,流量从27 700 m^3/s 降到10 700 m^3/s ,期间平均流量13 854 m^3/s ,高于2002年,其水位与最小流量也高于2002年;8月7日进入退水期,枯水流量持续时间为99 d,比2002年缩短了33 d,另外8月26日至10月3日有一段涨水过程,这是年内水文随机过程造成的,主流摆离浅滩,浅滩会由于处于缓流区而淤积,这两个原因导致汛期落淤的泥沙得不到充分冲刷从而出浅碍航。若不考虑三峡工程的影响,从水沙条件来分析,2002年中洪水历时小于2007年,从而洪水期淤积少,加之枯水流量持续时间大于2007年,导致2007年航道条件比2002年差。

如上所述,枯水流量时,浅滩处于冲刷状态,枯水流量持续时间越长,浅滩冲刷越充分,反之,枯水流量持续时间越短,易导致浅滩冲刷不足,造成碍航。图4为浅滩冲刷幅度与枯水流量持续时间关系,可以看出,枯水流量持续时间越长,浅滩冲刷幅度越大,且在相同的枯水流量持续时间内,乌龟洲前的过渡段浅滩易因冲刷不足而碍航,其年内变化还受到乌龟洲分汊河道形态阻力及河弯壅阻作用的影响,具体表现在汛期洪水漫滩,水流受到河弯的壅阻及河床、乌龟洲表面阻力与分汊口的形态阻力的影响而产生壅水,比降减小,进而流速降低,挟沙能力降低,泥沙落淤;而到枯水季节仅受到形态阻力,壅水很小,比降增大,流速增大,挟沙能力增大,河床冲刷。这样,在汛期江水携带的大量泥沙在展宽段落淤,如果

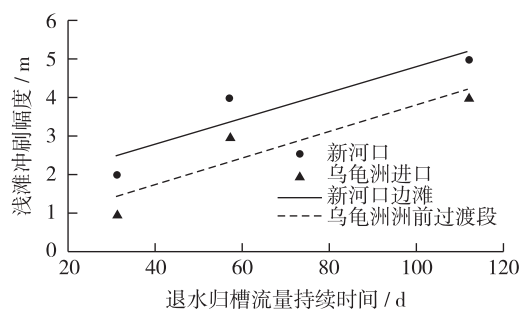


图4 浅滩冲刷幅度与冲刷流量持续时间关系

Fig. 4 Relationships between erosion intensity and duration of scouring flow

此时落水时间短,则会由于冲刷不及时而导致出浅。

3.3.3 三峡水库蓄水期动力过程变化 利用数学模型^[7, 15],将监利站 2007 年流量过程还原到不受三峡水库调度影响,计算了三峡水库蓄水前后水动力过程变化。上游寸滩与武隆站汇流后的流量作为三峡入库流量 Q_1 ,与出库宜昌站流量 Q_2 之差作为三峡水库的调节流量,将监利站实测流量修正,则可近似认为此流量过程还原到不受三峡水库调节,简称还原流量,再根据输沙率-流量关系曲线,可得不受三峡水库调节时的含沙量,即还原含沙量。还原后的流量过程表明,三峡水库调度后,由于蓄水期(9 月 25 日—10 月 23 日)水库蓄水,下泄流量较蓄水前减小 8%~34.3%,最大减少 6 320 m³/s,该时段内实测平均流量 12 760 m³/s,还原平均流量 14 720 m³/s,则三峡水库蓄水导致流量平均减小了 13.3%。

蓄水期流量减少导致本河段水动力条件发生变化,通过对右汉进口段(测点如图 1 中黑点位置)流速统计可以看出,实际流量该点平均流速为 1.1~1.43 m/s,还原流量过程下的流速为 1.1~1.69 m/s,实测流量下流速比还原流量下减小 2%~22%,输沙能力与流速的 3 次方成比例,说明右汉浅区汛后冲刷动力减弱。

3.3.4 三峡水库蓄水期河床冲淤过程变化 采用数学模型,通过还原三峡水库蓄水前后水沙条件,比较河床冲淤变化,以期反映三峡工程引起的冲淤变化。以 2007 年 1 月地形为起始地形,选取监利站 2007 年 1 月至 2008 年 1 月三峡水库蓄水前后日均流量过程进行计算,计算工况分别为:①实测水沙条件(有三峡水库蓄水影响);②还原流量到三峡水库蓄水前而含沙量仍为实测值,以反映三峡水库蓄水流对流量过程改变的影响;③流量和含沙量均还原到三峡水库蓄水前,认为不受三峡水库蓄水影响。

通过数学模型计算,本文统计了右汉进口段在以上 3 种水沙组合条件下的河床冲淤变化,通过对冲淤量统计,可知实测水沙过程条件下,乌龟洲进口段汛期淤积 481.0 万 m³,汛后冲刷 150.5 万 m³,冲刷比 31.3%;还原流量过程后,汛期淤积 487.1 万 m³,汛后冲刷 158.2 万 m³,冲刷比 32.5%,冲刷幅度较实测工况降低约 5%;还原水沙过程后,汛期淤积 1 325.2 万 m³,蓄水期冲刷 221.3 万 m³,冲刷比 16.7%。若不考虑三峡工程运行后含沙量的变化,仅考虑流量过程变化,汛后蓄水期冲刷幅度略有降低,这与前文所述蓄水期流量减小有关,加快了退水过程。通过还原水沙过程可以发现,即把流量、含沙量均还原到没有三峡水库调节的情况,对比工况①和③,由于三峡工程大大减小了含沙量,汛期淤积幅度较三峡水库蓄水期大大减小,从浅滩淤积来说对航深是有利的,但汛后的冲刷仍不足以将淤沙冲走,从而导致窑监河段长期以来的碍航态势。

值得说明的是 2007 年三峡水库蓄水位仅 156 m,2010 年后已提高到 175 m,调节的流量变化更大,计算工况以 2007 年自然条件为基准,未考虑整治工程作用。本文仅分析了总体冲淤量级的变化,三峡工程引起的下游冲淤变化还包括洲滩分布变化,对航道的影响也是一个复杂的过程,值得进一步深入研究。

根据资料统计^[16],三峡水库蓄水后总体来水来沙偏枯,浅滩冲刷时间长,这样的水沙条件对航道而言总体有利,加上整治工程的作用,窑监河段的航行态势目前良好(图 1)。但通过本文 2002 和 2007 年的实测资料对比发现,2007 年落水期明显比 2002 年短,使得碍航浅段出浅,这说明窑监河段航道条件与来水来沙情况、三峡水库蓄水调节都存在关系。若今后出现不利年份,三峡水库蓄水期减泄是否会加重航道不利变化需要引起关注。

4 结 语

本文在分析三峡水库蓄水前后监利站水沙条件变化的基础上,收集 2002 和 2007 年地形资料分析了下荆江窑监河段三峡水库蓄水前后的年内演变规律,根据水沙资料分析和二维数学模型计算对退水期冲刷变化原因进行了分析,得到主要结论如下:

(1)从年内变化规律来看,监利河段年内滩槽冲淤规律基本没变,右汉进口段浅滩“洪淤枯冲”、右汉则“洪冲枯淤”。由于含沙量大幅减少,2007 年监利河段汛期淤积强度较 2002 年减弱,甚至总河段有所冲刷,但右汉进口段仍有所淤积。2007 年汛后冲刷强度仍不足以将淤沙冲走,航道条件仍呈恶化态势。

(2)三峡水库蓄水引起的年内流量过程变化表现为蓄水期流量减少,退水过程加快,冲刷流量持续时间减少,从而减弱了冲刷动力。将监利站 2007 年流量过程还原到不受三峡水库调度影响,计算了三峡水库蓄

水前后水动力及河床冲淤过程变化。计算表明,汛后蓄水流量平均减小 13.3%,右汊进口段浅区垂线平均流速减小 2%~22%,相应冲刷强度减弱 5%。

(3)限于资料,本文仅分析了 2002 和 2007 年冲淤变化,利用实测资料和数学模型等分析了年内冲淤变化,今后还需进一步加强对洲滩分布演变、不同蓄水过程的影响分析研究。

参 考 文 献:

- [1] 黄莉,范北林,姚仕明,等. 荆江监利河段横断面调整规律研究[J]. 人民长江, 2008, 39(6): 21-23. (HUANG Li, FAN Bei-lin, YAO Shi-ming, et al. Cross-sectional study of adjustment laws in Jianli reach[J]. Yangtze River, 2008, 39(6): 21-23. (in Chinese))
- [2] 张杰,葛华. 三峡工程运用初期监利河段河势变化预测[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(5): 83-86. (ZHANG Jie, GE Hua. Prediction of regime change in Jianli reach of Yangtze River during the early operation stage of Three Gorges project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(5): 83-86. (in Chinese))
- [3] 李义天,唐金武,朱玲玲,等. 长江中下游河道演变与航道整治[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (LI Yi-tian, TANG Jin-wu, ZHU Ling-ling, et al. The Yangtze River channel evolution and channel regulation[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [4] 付中敏,闫军,刘怀汉. 长江中游监利河段河床演变与航道整治思路[J]. 水运工程, 2010(6): 100-107. (FU Zhong-min, YAN Jun, LIU Huai-han. River bed evolution and waterway regulation thought of Jianli section in the middle reach of the Yangtze River[J]. Port and Waterway Engineering, 2010(6): 100-107. (in Chinese))
- [5] 董耀华,卢金友,范北林,等. 三峡水库运用后荆江典型河段冲淤变化计算分析[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(2): 9-12. (DONG Yao-hua, LU Jin-you, FAN Bei-lin, et al. Research on variations of typical lower Jingjiang River reach after Three Gorges project operation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(2): 9-12. (in Chinese))
- [6] 刘一华. 长江中游监利河段河床演变分析及整治措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009. (LIU Yi-hua. Riverbed evolution analysis and regulation measures in Jianli reach of middle Yangtze River[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [7] 左利钦,陆永军,季荣耀,等. 下荆江窑监河段河床演变及整治初步研究[J]. 水利水运工程学报, 2011(4): 39-45. (ZUO Li-qin, LU Yong-jun, JI Rong-yao, et al. Evolution and regulation of Yaojian reach in the middle Yangtze River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(4): 39-45. (in Chinese))
- [8] 庞树森,许继军,徐杨. 三峡水库蓄水运行初期对径流过程影响分析[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(12): 118-124. (PANG Shu-sen, XU Ji-jun, XU Yang. Impact of the impoundment of Three Gorges reservoir on runoff process[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(12): 118-124. (in Chinese))
- [9] 卢金友,黄悦,宫平. 三峡工程运用后长江中下游冲淤变化[J]. 人民长江, 2006, 37(9): 55-57. (LU Jin-you, HUANG Yue, GONG Ping. Erosion and deposition changes in middle and lower Yangtze after Three Gorges project[J]. Yangtze River, 2006, 37(9): 55-57. (in Chinese))
- [10] 胡向阳,张细兵,黄悦. 三峡工程蓄水后长江中下游来水来沙变化规律研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(6): 4-9. (HU Xiang-yang, ZHANG Xi-bing, HUANG Yue. Research on change of coming sediment and coming water of middle-lower Yangtze River after TGP early operation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(6): 4-9. (in Chinese))
- [11] 刘鹏飞,李一兵. 三峡工程蓄水前后监利站水沙变化分析[J]. 水道港口, 2011, 32(6): 408-412. (LIU Peng-fei, LI Yi-bing. Analysis of flow and sediment changes at Jianli hydrologic station before and after impoundment of the Three Gorges reservoir[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2011, 32(6): 408-412. (in Chinese))
- [12] 黄仁勇,张细兵. 三峡水库运用前后进出库水沙变化分析[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(9): 75-79. (HUANG Ren-yong, ZHANG Xi-bing. Changes of inflow and outflow runoff and sediment of Three Gorges reservoir before and after the impoundment[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(9): 75-79. (in Chinese))
- [13] 赵南山,张雅琦. 三峡水库 2007 年运行调度分析[J]. 水力发电, 2009, 35(12): 70-71. (ZHAO Nan-shan, ZHANG Ya-qi. Analysis of operating and scheduling of Three Gorges reservoir in 2007[J]. Water Power, 2009, 35(12): 70-71. (in Chinese))
- [14] 陆永军,刘建民. 长江中游典型浅滩演变与整治研究[J]. 中国工程科学, 2002, 4(7): 40-45. (LU Yong-jun, LIU Jian-

- min. Study on fluvial process and regulations of typical shoal of middle Yangtze River[J]. Engineering Science, 2002, 4(7): 40-45. (in Chinese))
- [15] 陆永军. 窑集佬至大马洲河段整治工程(现状)二维动床数学模型研究[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 1995. (LU Yong-jun. A study of (present situation) two-dimensional movable bed mathematical model of regulation works from Yaojilao to Damazhou reach[R]. Tianjin: Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, 1995. (in Chinese))
- [16] 唐金武, 由星莹, 李义天, 等. 三峡水库蓄水对长江中下游航道影响分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 102-107. (TANG Jin-wu, YOU Xing-ying, LI Yi-tian, et al. Impacts of the operation of Three Gorges reservoir on navigation conditions in middle and lower Yangtze River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(1): 102-107. (in Chinese))

Annual analysis of Yaojian reach riverbed evolution before and after impoundment of the Three Gorges reservoir

REN Fang-fang^{1,2}, ZUO Li-qin², LU Yong-jun²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Due to the impoundment of the Three Gorges project (TGP), runoff process and sediment conditions in the Yaojian reach of the middle Yangtze River, and the riverbed evolution is also changed correspondingly. Owing to operation adjustment of the TGP, the water and sediment inter-annual characteristics are changed, sediment concentration decreases significantly, and the characteristics of discharge and sediment process within a year are changed. After the impoundment of the TGP, the discharge during storage water period was decreased, and the recession duration after flood was shortened. Based on the measured data in 2002 and 2007 before and after the impoundment of the TGP, the difference between 2002 and 2007 has been analyzed in aspects of the riverbed erosion and deposition, the cross-section changes and the navigation channel conditions. In order to study the influences of the TGP on the navigation channel in the Yaojian reach, water and sediment data, the measured terrain data were collected, water-sediment flux analyzing has been done, and a 2D mathematical model was established and used to calculate the deposition and erosion of the Yaojian reach. The analysis results show that the evolution patterns within a year is characterized by “siltation during flood season and erosion during dry season”. As the sediment concentration decreases during the flood season, siltation in the Yaojian reach decreases compared with that before the impoundment of the TGP. The navigation channel is still under the unfavorable conditions. This is mainly caused by the impoundment of the TGP after the flood season, which changes the flow falling process, decreases the flow discharge, and thus decreases the erosion dynamics.

Key words: evolution law within a year; erosion during flow falling; the Three Gorges reservoir; Yaojian reach