

# 三峡水库下游弯曲河型演变规律调整及其驱动机制

樊咏阳<sup>1</sup>, 张 为<sup>1</sup>, 韩剑桥<sup>1,2</sup>, 余梦清<sup>1</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 西北农林科技大学, 杨凌 712100)

**摘要:** 大型水库的兴建深刻改变了下游水沙输移特点, 进而导致河床演变规律显著调整, 水库下游弯曲河型对水沙过程改变响应敏感, 是水库下游河床演变、航道整治、河势控制等方面研究的关键区域。本文基于1996-2016年的实测水文、地形资料, 对长江三峡水库下游弯曲河型的演变规律及其驱动机制开展研究, 结果表明: ① 三峡水库蓄水前, 下荆江存在“凸淤凹冲”、“凸冲凹淤”两类弯曲河型, 而三峡水库蓄水后均表现为“凸冲凹淤”的一致性规律; ② 在水库拦沙作用的影响下, 下荆江河段平滩河槽存在累积性冲刷现象, 冲刷部位集中于枯水河槽与基本河槽之间的低滩, 冲淤部位调整主要由变化的流量过程所驱动, 上游河势、河道边界以及支流入汇等因素均有一定驱动作用; ③ 在三峡水库蓄水后缺乏大洪水的情况下, 凸岸水流挟沙力随流量增加逐渐增强, 水流对凸岸冲刷力度在平滩流量级附近(20000~25000 m<sup>3</sup>/s)达到最强, 平滩流量附近流量级的持续时间超过20天时, 弯曲河道发生凸冲凹淤现象。而悬沙中造床粗沙的减少, 增强了水流冲刷强度, 加剧了凸岸的冲刷程度。

**关键词:** 水库下游; 弯曲河型; 冲淤调整; 驱动机制; 下荆江

DOI: 10.11821/dlxb201703005

## 1 研究背景

弯曲河型是冲积河流中最为常见的河型之一, 其凹凸岸滩槽分布格局, 对航道条件有着重要的影响<sup>[1]</sup>, 而弯曲率较大的急弯段, 又是防洪控制的重点区域<sup>[2-3]</sup>, 历来受到水利部门、航道部门的密切关注。弯曲河型的河床形态对于水库水沙调节作用的响应较为敏感<sup>[4-5]</sup>, 研究水库下游弯曲河型的演变规律调整及其驱动机制, 不仅对于河道防洪、航运等具有重要的实践意义, 而且对水库下游河床调整研究有重要的理论价值。

三峡水库是世界上最大的综合性水利枢纽工程, 其运行13年来, 对下游弯曲河段的影响已有显著体现: 三峡水库蓄水前偶发的凸岸冲刷、凹岸淤积(简称凸冲凹淤)现象, 在蓄水后成为群发性(同时、多处)现象。类似情况也发生在美国密西西比河流域<sup>[6]</sup>、瓦巴西河流域<sup>[7]</sup>、英国博林河流域<sup>[8]</sup>以及汉江丹江口水库下游泽口至皇庄段<sup>[9-10]</sup>。针对这一现象, 学者们对水库下游弯曲河型的撇弯切滩过程开展了大量研究, 划分了切滩模式, 探讨了不同模式弯曲河型的发育过程<sup>[11-13]</sup>, 并对撇弯切滩的机理进行了分析<sup>[9-10, 14]</sup>。部分研究认为河道边界条件改变是造成弯道凸冲凹淤的主要原因: 凹岸护岸工程限制了弯曲河道继续向凹岸发展, 转而对凸岸造成冲刷<sup>[15]</sup>或是弯曲半径发展到一定地步, 水流趋直造成凸岸边滩的冲刷<sup>[16]</sup>。然而, 三峡水库下游护岸工程多完成于20世纪90年代, 而普遍凸

收稿日期: 2016-11-03; 修订日期: 2017-01-25

基金资助: 国家自然科学基金项目(51479146, 51609096) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.51479146, No.51609096]

作者简介: 樊咏阳(1989-), 男, 江苏淮安人, 博士生, 主要从事河床地貌形态变化研究。E-mail: fxpn007@hotmail.com

通讯作者: 张为(1979-), 男, 浙江余姚人, 博士, 副教授, 主要从事河床地貌研究工作。E-mail: zw97082@126.com

冲凹淤的现象开始于三峡水库蓄水后,已有研究成果无法完全解释这一现象;也有部分研究认为水库蓄水后泥沙条件的变化是造成弯曲河型凸冲凹淤现象的主要原因:水库拦沙后来沙量减少造成水流次饱和程度增加,凸岸边滩冲刷<sup>[17]</sup>,或是床沙粗化造成中小洪水下推移质数量增加,堵塞凹岸流路,将主流逼向凸岸,造成边滩冲刷<sup>[18]</sup>,这类研究虽然考虑了水库拦沙的影响,但减沙影响往往作用于河槽全断面,仍不足以揭示群发性凸冲凹淤所体现的断面局部位置冲淤性质相反的原因;还有部分研究认为水流动力特性变化是造成凸冲凹淤现象的主要原因,特大洪水上滩形成的强力冲刷<sup>[16]</sup>、水流动力轴线摆动至凸岸边滩造成持续冲刷<sup>[19-20]</sup>或是二次环流造成输沙模式的改变,凹岸泥沙不能有效输送至凸岸落淤<sup>[21-22]</sup>,这些研究成果证实了水流动力对河床的重要塑造作用,但对水库调蓄后特大洪水消失、流量持续时间改变以及水动力特征变化及其影响等考虑不够充分。

为此,本文采用下荆江实测水文、地形、河床组成等资料,从断面冲淤调整与多因素之间的响应关系出发,对三峡水库下游弯曲河型演变规律调整及其驱动机制开展研究,以期为水库下游的防洪规划、航道规划等提供理论基础与技术支持。

## 2 研究区域及研究方法

### 2.1 研究河段

下荆江上起藕池口,下迄洞庭湖出口——城陵矶,洞庭湖出流顶托作用使得下荆江演变规律更为复杂。下荆江全长约175.7 km,直线距离84.5 km,弯曲率达2.08,而河床抗冲性较差,是三峡水库蓄水拦沙后,下游冲刷调整最为剧烈的河段之一。洪水灾害一直是下荆江的关键问题,自古便有“万里长江,险在荆江”的说法,为提升河段防洪能力,下荆江早在20世纪80年代就开始了岸线守护工程,目前下荆江险段已基本得到保护(图1)。同时,下荆江弯道众多,且多连续弯道,存在“一弯变,弯弯变”的现象,选取下荆江河段作为代表对三峡水库蓄水后下游弯曲河型的河床演变规律调整及其驱动机

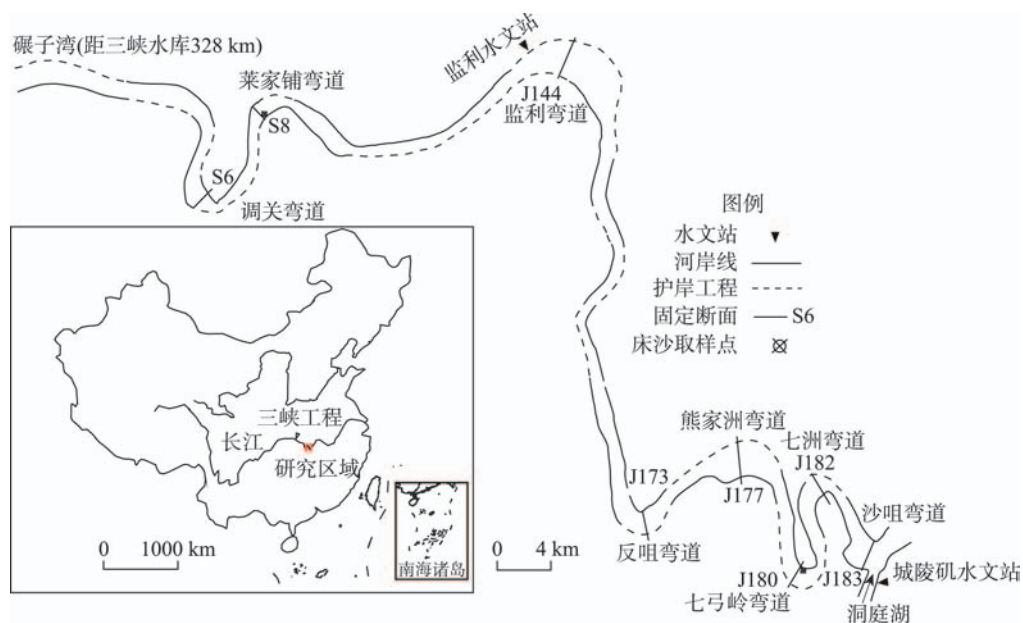


图1 研究区域示意图

Fig. 1 Survey region of the Lower Jingjiang River

制进行研究是合理的。

本文选取了下荆江较为典型的调关弯道、莱家铺弯道、监利弯道、反咀弯道、熊家洲弯道、七弓岭弯道、七洲弯道以及沙咀弯道8个弯曲河道。研究河段全长133.0 km, 直线距离74.5 km, 平滩流量约为22000 m<sup>3</sup>/s<sup>[23]</sup>。其中监利弯道、熊家洲弯道属于典型的弯曲分汊河型, 一方面可以将之视为凹岸汊道与凸岸汊道组成的弯曲河型, 另一方面, 对其凹岸汊、凸岸汊也可分别视作两个弯道。考虑到二者均为主汊年内分流持续超过80%的汊道, 因此针对这两个河段, 仅以主汊作为弯曲河型进行分析。

## 2.2 数据来源

研究数据来源为长江委水文局以及长江航道局测量中心野外测量资料, 主要包括水文资料、地形资料、河床组成资料等(表1)。水文资料统计了荆江干流的监利水文站、城陵矶附近的七里山水文站的日均流量、含沙量资料, 沙市水文站分组沙资料, 以及荆江固定断面的流速测量资料等。以2003年为界分为三峡水库蓄水前、后水文资料。河床变形分析主要依据为荆江固定断面资料, 其中1996年为三峡水库蓄水前断面地形, 2003-2016年为三峡水库蓄水后断面地形, 地形高程均采用黄海高程。

表1 数据选取及精度  
Tab. 1 Sources and accuracy of measuring data

数据类型	测站名称	测量时间	测量间隔	数据来源
水文数据	沙市水文站	2003-2013年	24 h	长江委水文局
	监利水文站	1996-2015年		
	城陵矶水文站	1996-2015年		
断面流速	荆江固定断面	2014年8月, 2015年1月	-	长江航道局测量中心
断面数据	莱家铺弯道	2003-2016年 <sup>a</sup>	1年	长江航道局测量中心
	荆江固定断面	1996年, 2003年, 2016年10月	-	长江委水文局
河床组成	莱家铺弯道	2009年9月, 12月	3个月	长江航道局测量中心
	七弓岭弯道	2009年9月, 12月	3个月	长江航道局测量中心

注: a. 具体测量时间2003-2013年为每年10月, 后续为2014年2月、2015年1月、2016年1月测量结果。

## 3 弯曲河型演变规律调整

三峡水库蓄水以来, 年输沙量持续减少, 造成荆江河段平滩河槽、基本河槽、枯水河槽累积性冲刷的现象<sup>[24]</sup>。但横向冲淤部位的变化则是由多种因素所决定, 尤其对于弯曲河段而言, 三峡水库蓄水后凹、凸岸冲淤规律是本文关注的重点。图2绘制了各弯曲段弯顶部分横断面年际变化图(断面位置见图1), 并给出了凸淤凹冲与凸冲凹淤模式的示意图(图2i)。

根据三峡水库蓄水前弯曲河道的演变特点, 下荆江弯道可分为两个不同类别: 第I类弯曲河道表现为“凸淤凹冲”特点; 第II类弯曲河道表现为“凸冲凹淤”特点。三峡水库蓄水后, 两类弯曲河道则一致表现为“凸冲凹淤”(监利弯道(图2c)主槽内为维持滩槽格局, 实施了凸岸的新河口边滩守护工程, 保持了滩体完整, 造成主汊的凹岸侧不断冲蚀崩退)。为便于对滩槽冲淤规律的分析, 依据滩体高程划分了枯水河槽、基本河槽以及平滩河槽。其中枯水河槽对应枯水位以下河槽, 此时, 监利站流量为5500 m<sup>3</sup>/s; 基本河槽对应与边滩平齐的水位, 此时, 监利站流量为9000 m<sup>3</sup>/s; 平滩河槽对应与河漫滩平齐的水位, 此时, 监利站流量为22000 m<sup>3</sup>/s。对枯水河槽至基本河槽之间的边滩称之为低滩, 基本河槽至平滩河槽之间的边滩称之为高滩, 平滩河槽以上称之为河漫滩。



### 3.1 第I类弯曲河型演变规律调整

第I类弯曲河型以调关、莱家铺、反咀、熊家洲弯道为代表(图2)。调关弯道(图2a)在三峡水库蓄水前(1996-2003年)枯水位以下滩体淤积明显,最大淤长幅度达7 m。凹岸河槽冲刷发展,河槽最大冲深达15 m,深槽向凹岸摆动;在三峡水库蓄水后(2003-2016年),淤长的凸岸低滩大幅冲刷,冲刷幅度超过10 m,高滩基本维持不变,凹岸河槽淤积,局部淤积幅度超过20 m,原有河槽部位形成了与基本河槽平齐的心滩,河势格局存在双槽争流的发展趋势。

莱家铺弯道(图2b)原有主槽偏向于凸岸侧(1996年),三峡水库蓄水前(1996-2003年),凸岸侧枯水河槽淤积较为明显,淤积幅度超过6 m。而凹岸的低滩冲刷发展,冲刷幅度超过12 m,形成新的河槽;三峡水库蓄水后(2003-2016年),凸岸低矮边滩再度冲刷,平均冲刷幅度3 m左右,高滩基本维持稳定,凹岸河槽淤积,在凹岸形成新的低滩,将河槽分为左右双槽,且以凸岸槽为主槽。

反咀弯道(图2d)断面为典型的V型河槽断面,凸岸侧边滩较为平缓,凹岸侧较陡,三峡水库蓄水前(1996-2003年),反咀弯道枯水河槽的凸岸侧淤积明显,最大淤长幅度超过10 m,迅速形成枯水河槽以上的低滩,高滩基本维持稳定,河槽部位略有冲刷,幅度在5 m左右,但深泓位置变化不大,稳定在凹岸侧;三峡水库蓄水后(2003-2016年),高滩冲刷明显,平均冲刷幅度5 m左右。低滩发生小幅度冲刷,凹岸枯水河槽明显淤积,淤积幅度约为5 m。

熊家洲弯道(图2e)主槽凸岸侧在三峡水库蓄水前(1996-2003年)存在淤积现象,淤积集中于枯水河槽内,淤积幅度超过5 m,凹岸侧河槽内冲刷幅度在5 m左右,由偏U型河槽发展为偏V型河槽;在三峡水库蓄水后(2003-2016年),凹岸河槽的淤长幅度超过了1996年,凸岸冲刷恢复1996年的水平,重新形成了U型河槽,枯水河槽以上的滩体基本维持不变。

从这4个弯道的变化规律来看,在三峡水库蓄水前均表现为凸岸侧淤长,凹岸河槽冲刷,而在三峡水库蓄水后逐渐调整为凸岸侧边滩、河槽均冲刷,凹岸侧河槽发展、河

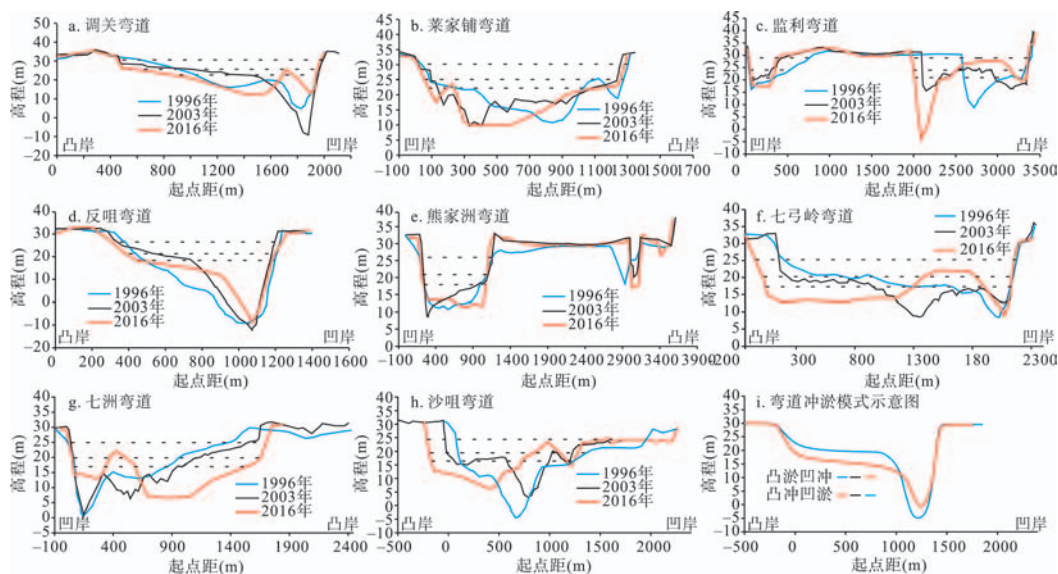


图2 下荆江各弯道典型断面冲淤调整规律(虚线自下而上对应枯水河槽、基本河槽和平滩河槽)

Fig. 2 The evolution law of cross section in Lower Jingjiang River (imaginary lines means bankfull, basic and dry channel)

漫滩基本不变。简而言之,即从凸淤凹冲发展为凸冲凹淤。

### 3.2 第Ⅱ类弯曲河型演变规律调整

第Ⅱ类弯曲河型则以七弓岭弯道、七洲弯道以及沙咀弯道为代表。七弓岭弯道(图2f)在三峡水库蓄水前(1996-2003年),凸岸边滩冲刷发展,平均幅度约为2 m,由高滩冲刷形成低滩,接近河道中心部位冲刷幅度最大,达8 m,2003年形成了新的主河槽。原有凹岸河槽内,淤长幅度超过5 m,萎缩成为副槽;三峡水库蓄水后(2003-2016年),这一趋势进一步加剧,凸岸低滩进一步冲刷至枯水河槽以下,并逐步取代凹岸侧河槽的主槽地位,平滩河槽以上的河漫滩甚至也发生了较为明显的冲蚀崩退。凹岸侧淤积形成高滩,将原有的单一河槽分为左右两汉,凹岸副槽相对稳定,深泓自1996年至2013年逐渐由凹岸摆动至凸岸。

七洲弯道(图2g)原有河道断面为V型断面,三峡水库蓄水前(1996-2003年),凸岸的河漫滩、高滩、低滩均发生明显冲刷,平均冲刷幅度2~5 m,凹岸河槽基本维持不变;三峡水库蓄水后(2003-2016年),凸岸河漫滩与边滩的冲蚀幅度进一步增大,凸岸冲刷最大幅度超过15 m,凹岸原有河槽淤长,最大淤积厚度超过10 m,形成基本河槽以上的高滩,将河道分为左右两汉,凸岸汉成为新的主槽。

沙咀弯道(图2h)凸岸侧明显分为两层阶梯状的滩体(1996年),河漫滩与高滩在三峡水库蓄水前(1996-2003年)以及三峡水库蓄水后(2003-2016年)经历了不断崩塌后退的过程,崩退距离超过200 m,而低滩则经历了三峡水库蓄水前淤长、三峡水库蓄水后冲蚀的交替过程,凹岸侧河槽自三峡水库蓄水前至蓄水后一直维持了淤积的态势。

总的来说,第Ⅱ类弯曲河型在三峡水库蓄水后基本维持了蓄水前凸岸冲刷崩退、凹岸河槽淤长的趋势,且无论河漫滩、高滩、低滩在三峡水库蓄水后均存在不断冲蚀的现象,深泓线均经历了从凹岸到凸岸的摆动过程,简而言之,第Ⅱ类弯曲河型在三峡水库蓄水前后均表现为“凸冲凹淤”特点。

## 4 水库下游弯曲河型演变的驱动因素

### 4.1 上游河势变化影响

弯曲河段上游河势对下游河段的演变有着极为重要的影响,素有“一弯变,弯弯变”之称。本文选取了第Ⅰ类弯道中的莱家铺弯道与反咀弯道以及第Ⅱ类弯道中七弓岭弯道作为典型弯道代表,基于各弯道段深泓线资料,分析了上游河势变化对下游弯曲河型演变规律的影响作用。

莱家铺弯道位于河口至莱家铺连续弯道的尾端,由于上游调关弯道出口河槽窄深,存在节点作用,导致莱家铺弯道进口处深泓相对稳定,但弯顶部位深泓经历了右—左—右的摆动过程,演变规律也由三峡水库蓄水前的凸淤凹冲转为三峡水库蓄水后的凸冲凹淤。因此莱家铺弯道蓄水前后上游河势较为稳定,不是弯道演变规律调整的主要因素(图3a)。

反咀弯道上接铁铺顺直河段,三峡水库蓄水以来,顺直段深泓经历了先左摆后右摆的摆动过程,与此对应的,弯顶部位深泓同样经历了先左后右的摆动过程。深泓线的摆动反映了河道的冲淤调整情况,上游顺直段深泓线的摆动造成弯道进口主流的摆动,顺直段深泓左摆,主流冲刷凸岸,弯顶深泓左摆;顺直段深泓右摆,主流冲刷凹岸,弯顶深泓右摆,可见上游河势变化对反咀弯道冲淤规律调整有一定影响(图3b)。

熊家洲—城陵矶河段是典型的连续弯道段,三峡水库蓄水以来,七弓岭弯道段上游

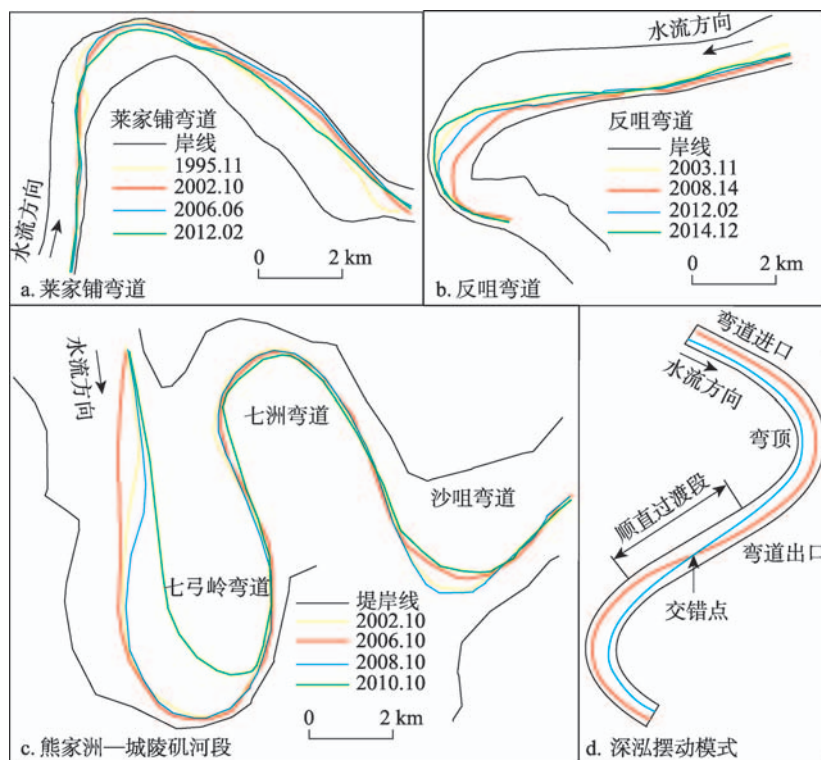


图3 下荆江典型弯道段深泓线年际变化图

Fig. 3 The variation of thalwegs in the meandering bends in the Lower Jingjiang River

顺直段深泓经历了左—右—左的摆动过程，与此对应的，七弓岭弯道弯顶部分深泓也同样经历了左—右—左的摆动过程，与反咀弯道类似，上游河势的变化对七弓岭弯道冲淤规律的调整也存在一定的影响（图3c）。与此同时，受到七弓岭弯道深泓摆动的影响，下游的七洲弯道、沙咀弯道均经历了深泓线左—右—左的摆动过程，可见，连续弯道段上下游之间的关联性较为密切，上游河势变化对连续弯道段的冲淤规律调整有一定影响。

综上所述，上游河势变化是改变弯曲河型演变规律的影响因素之一，上游深泓的摆动造成下游弯道进口入流条件的变化（图3d），进而引起下游弯道冲淤规律的响应变化，改变弯顶段深泓位置。这一影响在连续弯道段尤为明显。但即使上游河势稳定，莱家铺弯道蓄水前后仍然发生了由凸淤凹冲向凸冲凹淤的转变，因此，上游河势变化并非三峡水库下游群发性凸冲凹淤现象的主要驱动因素。

#### 4.2 河道边界条件影响

自然条件下，随着弯道凸岸淤长、凹岸岸线崩退，弯道弯曲半径减小，洪水上滩冲刷凸岸边滩极易导致弯道发生凸冲凹淤、撇弯切滩的现象，岸线形态差异对弯道段演变的影响不可忽略。

自1998年以来，荆江河段人工护岸工程已经基本完成（护岸工程布置如图1所示），河道岸线得到守护，横向摆动受到限制，河道整体弯曲半径基本稳定。采用试圆法对下荆江河段2014年河道中心线的弯曲半径进行统计（表2）。从统计结果来看，下荆江7个典型弯道的弯曲半径在910~1950 m之间，弯曲半径最小的七弓岭弯道最先发生凸冲凹淤现象（三峡水库蓄水前），并在上下游河势关联性的影响下，造成七洲、沙咀两弯道相继发生凸冲凹淤现象。



表2 荆江弯曲河段弯曲半径统计(基于2014年2月河道中心线统计)

弯道名称	调关弯道	莱家铺弯道	反咀弯道	熊家洲弯道	七弓岭弯道	七洲弯道	沙咀弯道
弯曲半径(m)	1170	1400	1150	1950	910	1070	1840

然而，自1998年以来，荆江河段人工护岸工程已经基本完成（护岸工程布置见图1），在守护工程影响下，岸线在三峡水库蓄水运行前后维持不变<sup>[25]</sup>，荆江各弯道段河道中心线弯曲半径也维持稳定。在弯道岸线边界稳定的情况下，第Ⅰ类弯道由三峡水库蓄水前的凸淤凹冲转变为了三峡水库蓄水后的凸冲凹淤，演变规律发生了明显改变，这一改变与河道岸线边界条件无关。

由此可见，人类守护工程对研究区域的弯曲河型的侧向摆动有着直接的影响作用，约束了河道的横向发展，改变了局部滩槽的变化特征（监利弯道），但是三峡水库蓄水后，在河道边界条件维持稳定的情况下，第Ⅰ类弯曲河型演变规律发生了转变，可见河道边界条件并非造成水库下游弯曲河型群发性凸冲凹淤现象的主要驱动因素。

4.3 来水条件变化的影响

水流是河床演变的根本驱动力，水流条件的改变往往伴随着河床与之响应的变化<sup>[16]</sup>。根据张植堂推导的适用于荆江河段的河湾水流动力轴线计算方程<sup>[12]</sup>：

$$R_0=0.053R\left(\frac{Q^2}{gA}\right)^{0.348}$$

(1)

式中： $R_0$ 为弯道主流线弯曲半径； $R$ 为河道弯曲半径； $Q$ 、 $A$ 分别为流量和对应过流面积； $g$ 为重力加速度。在流量增大的情况下，弯道主流的弯曲半径增加，弯道主流趋直，其结果就是主流速带向凸岸边滩靠近。因此，流量越大，主流速带越贴近凸岸；流量越小，主流速带越贴近凹岸。随着流量的增大，主流线向凸岸摆动，造成了滩面流速不断增大。基于张瑞瑾挟沙力公式<sup>[16]</sup>：

$$S=k\left(\frac{u^3}{\omega gh}\right)^m$$

(2)

式中： $k$ 、 $m$ 分别为根据当地条件决定的经验系数； $\omega$ 为泥沙沉速； $u$ 为测点垂向平均流速； $h$ 为测点水深，决定固定测点各粒径组泥沙水流挟沙力的主要影响因素应为 $u^3/h$ ， $u^3/h$ 的比值，比值越大，水流冲刷动力越强。通过图4可以看出，当流量由7000 m<sup>3</sup>/s增大

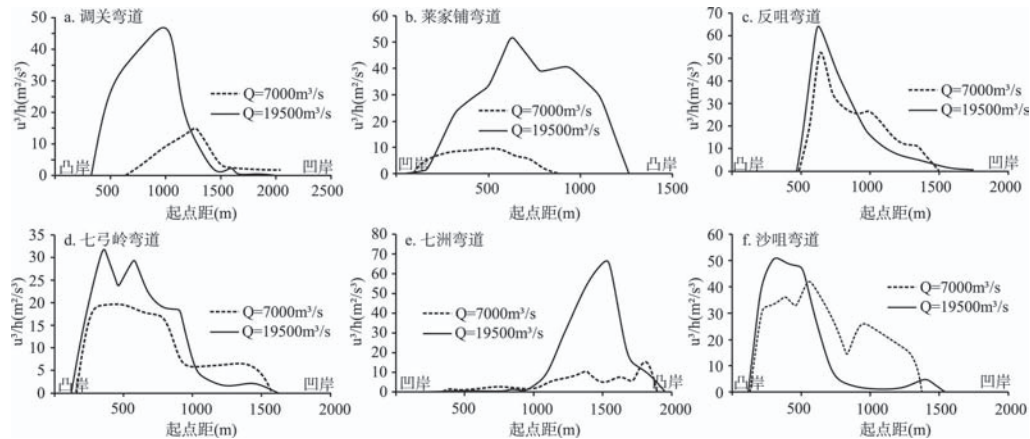


图4 不同流量级下荆江各弯道挟沙力参数( $u^3/h$ )沿断面变化

Fig. 4 The variation of  $u^3/h$  along the cross section at different discharges in Lower Jingjiang River

至19500 m<sup>3</sup>/s时,各弯道凸岸均表现出了挟沙力增大的迹象,且挟沙力峰值区域向凸岸摆动。这一现象进一步证明,当流量逐渐增大至平滩流量过程中,凸岸水流冲刷动力增强。

但当流量超过平滩流量(22000 m<sup>3</sup>/s)后,受到河漫滩阻力以及过流断面面积突然增加的影响,断面流速降低,全断面冲刷强度减弱<sup>[16]</sup>,基于输沙量法统计的荆江沙质河床各流量级冲刷强度结果(图5)显示<sup>[24]</sup>,当流量达到25000 m<sup>3</sup>/s以上时,水流冲刷强度(以冲刷率表征)锐减至枯水流量(5000 m<sup>3</sup>/s)级别。当流量继续增大时,冲刷强度再度呈现增加趋势(图5)。结合凸岸边滩水流挟沙力变化以及各流量级水流冲刷强度的研究成果,可以发现:在三峡水库蓄水后,缺少大洪水作用的情况下(35000 m<sup>3</sup>/s以上流量持续天数年均1天),对凸岸冲刷力度最大的流量级应为平滩流量附近的流量级(图5)(20000~25000 m<sup>3</sup>/s)。

以莱家铺边滩为例,由于其上游存在调关节点,上游河势较为稳定,受到边界条件、上游河势的影响较小。从滩体宽度变化来看,高滩在2003年以后基本维持不变(图6a),这与35000 m<sup>3</sup>/s以上洪水流量出现频率的锐减是一致的,三峡水库调蓄影响下,大洪水持续天数锐减至年均1天,因此莱家铺弯道高滩以上基本维持稳定,宽度变幅不超过20 m。而低滩宽度在三峡水库蓄水后则存在明显萎缩趋势(图6b),但在2006-2007年、2011-2012年和2015-2016年仍存在较为明显的淤长,这与2006年、2011年以及2015年平滩流量级持续时间的减少具有同步性(2006年5天,2011年17天,2015年15天),综合来看,平滩流量级的持续时间影响了弯曲河段凸岸冲淤规律的变化,统计结果显示(表3),当平滩流量持续时间低于20天时,凸岸一般表现为淤长,超过20天时,凸岸一般表现为冲刷。

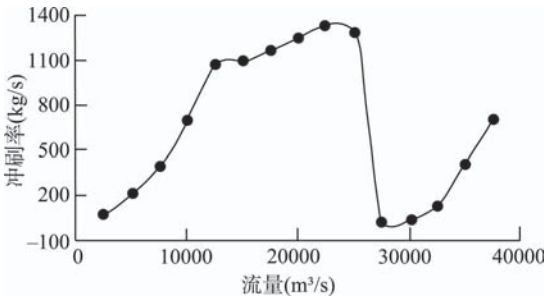


图5 荆江沙质河床各流量级水流冲刷强度<sup>[24]</sup>  
Fig. 5 The erosion intensity of different discharges in sandy bed of Jingjiang River<sup>[24]</sup>

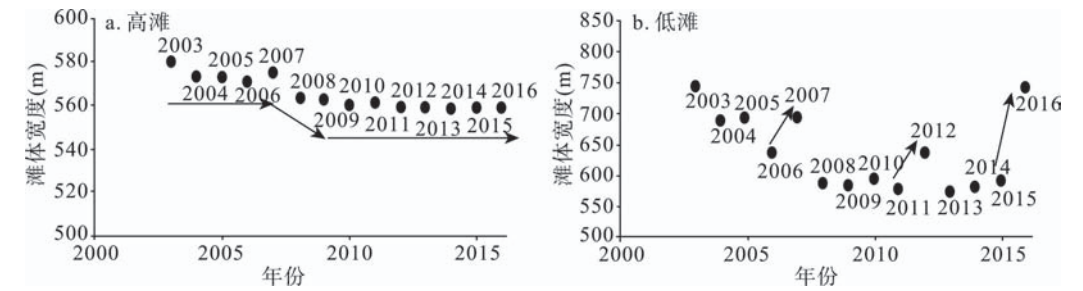


图6 2000-2015年莱家铺弯道不同高程滩体宽度变化  
Fig. 6 The sandbars' width variation of different elevations in Laijiapu reach, 2000-2015

表3 2003-2015年三峡水库蓄水后监利站各流量级持续天数变化(天)							
Tab. 3 The last days of different discharges at Jianli station after TGR impoundment, 2003-2015							
流量级(m <sup>3</sup> /s)	均值	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年
平滩流量(20000~25000)	32	43	36	40	5	27	33
洪水流量(> 35000)	1	0	5	1	0	6	0
流量级(m <sup>3</sup> /s)	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
平滩流量(20000~25000)	41	46	17	29	38	67	15
洪水流量(> 35000)	0	0	0	3	0	2	0



综上所述,不同流量级持续时间的变化直接影响了弯曲河段凹、凸岸不同区域冲刷规律的变化,在流量逐渐增大至平滩流量过程中,凸岸侧水流冲刷强度(水流挟沙力)不断增强,最强冲刷力度为平滩流量级(20000~25000 m<sup>3</sup>/s)。平滩流量级持续时间增长,凸岸低滩冲刷,平滩流量级持续时间少于20天,凸岸低滩淤积。流量过程改变是造成第Ⅰ类、第Ⅱ类弯曲河型在蓄水后凸冲凹淤现象群发的驱动因素。

#### 4.4 来沙条件变化的影响

河床冲刷的直接原因一般是不饱和含沙水流冲刷河床表层泥沙,因此,参与造床的泥沙含量的减少会加重河床变形幅度。根据莱家铺、七弓岭2009年河床床沙组成情况, $D > 0.125$  mm的粗沙占90%以上,造床泥沙以粗沙为主。沙市、监利水文站分组沙输运量统计结果表明(图7):沙市站三峡水库蓄水后粗沙输运量由2003年0.37亿t减少至2009年的0.15亿t,减幅超过50%,但由于河床粗沙补给,使得监利水文站2003-2009年粗沙输运量基本接近蓄水前均值,也就是说,三峡水库蓄水后(2003-2009年),监利站下游河段水流挟带的主要造床泥沙维持蓄水前水平。

由此可以推断,沙市—监利站之间的莱家铺弯道造床泥沙未恢复蓄水前水平,而监利站下游的七弓岭弯道造床泥沙已恢复蓄水前水平。对比两弯道段凸岸床沙组成的变化情况可以发现(图8):莱家铺弯道,在2009年退水过程中(9-12月),凸岸存在床沙粗化的现象(图8a),说明退水过程凸岸仍在冲刷。而对于七弓岭弯道,在2010年退水过程中,凸岸床沙组成有细化趋势,床沙中值粒径略有减小(图8b),说明退水过程七弓岭弯道凸岸略有淤积。

综上,三峡水库蓄水后(2003-2009年),监利站下游主要参与造床的粗沙输运量并未发生明显减少,而凸冲凹淤的现象已经普遍出现。可见,在当前冲刷条件下,输沙量的变化并非造成水库下游弯曲河型冲刷部位发生调整的主要诱因。但水流粗沙含沙量的减少,增强了水流冲刷能力,造成了下荆江河段平滩以下河槽的普遍冲刷,并致使弯道段退水期凸岸回淤受到限制,使得凸岸冲刷幅度更为剧烈。2010年以后(图7),造床泥沙输运量进一步减小,在水流条件不变的情况下,未来下荆江弯道段凸

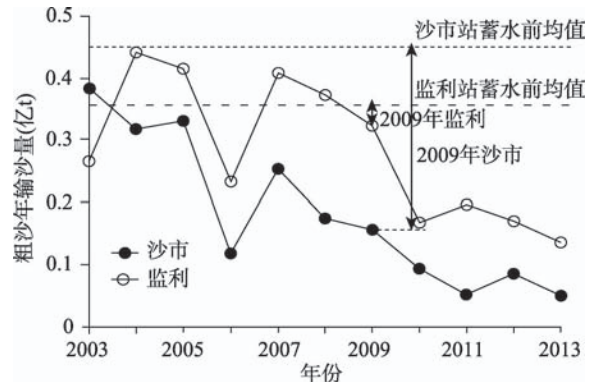


图7 2003-2013年沙市和监利水文站粗沙年均输运量变化

Fig. 7 The coarse sand transportation value at Shashi and Jianli stations, 2003-2013

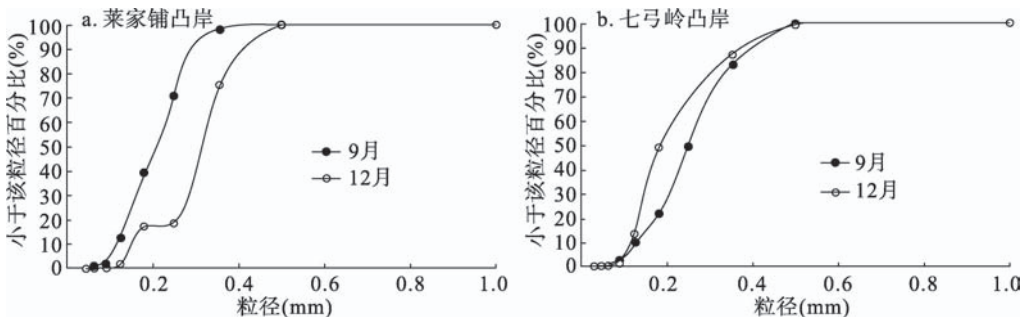


图8 莱家铺、七弓岭弯道凸岸床沙级配变化图

Fig. 8 The bed material gradation in the convex bank of Laijiapu Reach and Qigongling Reach

岸冲刷可能加剧。

#### 4.5 洞庭湖顶托作用影响

七弓岭弯道、七洲弯道以及沙咀弯道距离洞庭湖出汇口——城陵矶较近,其水流动力势必受到洞庭湖出流影响,可能引起上游水位抬升、流速变缓、主流摆动等现象,进而影响到弯曲河道的演变规律。在干流流量(监利流量)不变的情况下,洞庭湖出流顶托造成水位抬升,使得河漫滩提前淹没,是造成七弓岭—沙咀弯道段河漫滩冲刷蚀退的原因之一。已有研究表明,三峡水库蓄水以来,洞庭湖出口洪道并无明显的冲淤调整<sup>[26]</sup>,洞庭湖出流量与干流流量的比值也未发生明显变化且下游侵蚀基准面短期内基本维持稳定<sup>[27]</sup>,因此三峡水库蓄水前后下荆江河段下边界条件较为稳定,洞庭湖出流对下荆江河床演变规律调整无明显影响。

## 5 结论

根据三峡水库蓄水前后下荆江弯曲河型实测水文、地形资料,对水库下游弯曲河型的演变规律及驱动机制进行了总结,得到主要结论如下:

(1) 三峡水库蓄水前,弯曲河型的演变规律主要包括两类:第Ⅰ类弯曲河型以凸岸淤积、凹岸冲刷为主。第Ⅱ类弯曲河型以凸岸冲刷,凹岸淤积为主。三峡水库蓄水以来,两类弯道均发生了凸岸冲刷、凹岸淤积的现象。

(2) 三峡水库蓄水后,水流含沙量减少致使下荆江平滩河槽发生累积性冲刷,在弯道段冲刷部位集中于枯水河槽与基本河槽之间的低滩,冲淤部位的调整主要由流量过程决定,上游河势、河床边界以及支流入汇等因素也存在一定影响作用。

(3) 对三峡水库下游弯曲河型而言,当流量增大至平滩流量过程中,凸岸侧水流挟沙力明显增强,在三峡水库蓄水后,缺少大洪水作用的情况下,对凸岸冲刷力度最强的流量级为平滩流量附近( $20000\sim 25000\text{ m}^3/\text{s}$ )。平滩流量附近流量级持续时间超过20天时,凸岸边滩冲刷。悬沙中粗沙输运量减少起到了增强了水流冲蚀力度,造成凸岸冲刷幅度增大的作用。而洞庭湖出流顶托作用主要影响了七弓岭—沙咀弯道的河漫滩冲刷。

本文从水库下游弯曲河型演变规律调整出发,分析了造成这种规律调整的驱动机制,需要承认的是,这种研究方式主要针对于河床演变的宏观变化,从微观角度考虑,近底层流速变化,弯道环流的输沙作用等均是弯道冲淤规律变化的动力,需要结合模型试验,开展进一步的研究工作。

#### 参考文献(References)

- [1] Zhou Xiangshu, Liu Huaihan, Huang Chengtao, et al. Analysis of riverbed evolution and waterway condition variation of Laijiapu bend of lower Jingjiang River. Yangtze River, 2013, 44(1): 26-29. [周祥恕,刘怀汉,黄成涛,等.下荆江莱家铺弯道河床演变及航道条件变化分析.人民长江,2013,44(1): 26-29.]
- [2] Wang Wenye, Wang Zhenduo, Yang Jinliang, et al. Research on submerged vanes for bank protection in river bends. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(3): 29-64. [王文野,王振铎,杨金良,等.导流屏在河流弯道护岸工程中的应用研究.水利学报,2000(3): 59-64.]
- [3] Liu Yanjie, Tian Zhongmei, Li Dongzheng. The flood control and regulation of meandering reaches in Yellow River. Water Resources Development & Management, 2002, 22(1): 54-56. [刘衍杰,田忠梅,李东征.谈黄河下游弯曲性河段防洪工程现状与治理.水利建设与管理,2002,22(1): 54-56.]
- [4] Frascati A, Lanzoni S. Morphodynamic regime and long-term evolution of meandering rivers. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2009, 114: F02002.
- [5] Yang Chao, Cai Xiaobing, Wang Xuelei, et al. Remotely sensed trajectory analysis of channel migration in lower

- Jingjiang Reach during the Period of 1983-2013. *Remote Sensing*, 2015, 7(12): 16241-16256.
- [6] Harmar O P, Clifford N J. Plan dynamics of the Lower Mississippi River. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31: 825-843.
- [7] Zinger J A, Rhoads B L, Best J L. Extreme sediment pulses generated by bend cutoffs along a large meandering river. *Nature Geoscience*, 2011, 4: 675-678
- [8] Luchi R., Hooke J M, Zolezzi G, et al. Width variations and mid-channel bar inception in meanders: River Bollin (UK). *Geomorphology*, 2010, 119: 1-8
- [9] Tan Guangming, Lu Jinyou. The mainstream movement and sandbars' erosion. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electronic Engineering*, 1992, 25(2): 107-112. [谈广鸣, 卢金友. 河道主流摆动与切滩演变初步研究. 武汉水利电力学院院报, 1992, 25(2): 107-112.]
- [10] Tan Guangming, Ning Lei, Li Fujun. The mainstream movement and sandbars' erosion in Hanjiang River from Huangzhuang to Zekou. *Journal of Sediment Research*, 1996(2): 113-117. [谈广鸣, 宁磊, 李付军. 汉江皇庄至泽口河段撇弯切滩研究. 泥沙研究, 1996(2): 113-117.]
- [11] Li Zhiwei, Wang Zhaoyin, Xu Mengzhen, et al. Patterns and mechanisms of neck cutoffs on meandering rivers. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2013, 53(5): 618-624. [李志威, 王兆印, 徐梦珍, 等. 弯曲河流颈口裁弯模式与机理. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(5): 618-624.]
- [12] Camporeale C, Perucca E, Ridolfi L. Significance of cutoff in meandering river dynamics. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: F1.
- [13] Grenfell M, Aalto R, Nicholas A. Chute channel dynamics in large, sand-bed meandering rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(3): 315-331.
- [14] Zhang Junyong, Chen Li, Liu Lin, et al. Perfect morphology of meandering river for middle and lower reaches of Hanjiang River. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2007, 40(1): 37-41. [张俊勇, 陈立, 刘林, 等. 汉江中下游河道最佳弯道形态. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(1): 37-41.]
- [15] Li Ningbo, Zeng Yong, Wu Zhongming. Preliminary study of causes of mainstream bending of Qigongling Bend in Jingjiang reach of Yangtze River. *Yangtze River*, 2013, 44(1): 22-25. [李宁波, 曾勇, 吴忠明. 长江荆江河段七弓岭弯道主流撇弯原因初探. 人民长江, 2013, 44(1): 22-25.]
- [16] Qian Ning, Zhang Ren, Zhou Zhide. *River Dynamics*. Beijing: Science Press, 1987: 121-179. [钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987: 121-179.]
- [17] He Guangshui, Yao Shiming, Jin Zhongwu. Study of atypical erosion of convex bank of river bend in Jingjiang Reach of Yangtze River. *Yangtze River*, 2011, 42(17): 1-3. [何广水, 姚仕明, 金中武. 长江荆江河段弯道凸岸边滩非典型冲刷研究. 人民长江, 2011, 42(17): 1-3.]
- [18] Han Qiwei, Yang Kecheng. The evolution trend of Lower Jingjiang River after the impoundment of Three Gorges Projects. *Journal of Sediment Research*, 2000(3): 1-11. [韩其为, 杨克诚. 三峡水库建成后下荆江河型变化趋势的研究. 泥沙研究, 2000(3): 1-11.]
- [19] Zhang Zhitang, Lin Wanquan, Shen Yongjian. An approach of the main current belt of stream flow in river bend. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1984, 1(1): 47-57. [张植堂, 林万泉, 沈勇健. 天然河弯水流动力轴线的研究. 长江水利水电科学研究院院报, 1984, 1(1): 47-57.]
- [20] Qin Lianchao, Yu Minghui, Tan Guangming, et al. Discussion on the relation between the change of the flow dynamic axis and the bend bypassing and shoal cutting in the bend river course. *Journal of Hydrodynamics*, 2009, 24(1): 29-35. [覃连超, 余明辉, 谈广鸣, 等. 河湾动力轴线变化与切滩撇弯关系研究. 水动力学研究与进展(A辑), 2009, 24(1): 29-35.]
- [21] Wormleaton P R, Hey R D, Sellin R H, et al. Behavior of meandering overbank channels with graded sand beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 131(8): 665-681.
- [22] Albert C, Steffler P. Estimating transverse mixing in open channels due to secondary current-induced shear dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(2): 186-196.
- [23] Yu Wenchou, Lu Jinyou. *The Evolution and Regulation of Yangtze River Channel*. Beijing: China Hydraulic Press, 2005: 84-86. [余文畴, 卢金友. 长江河道演变与治理. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 84-86.]
- [24] Han Jianqiao, Sun Zhaohua, Huang Ying, et al. Features and causes of sediment deposition and erosion in Jingjiang reach after impoundment of the Three Gorges Project. *Journal of Hydraulics Engineering*, 2014, 45(3): 277-286. [韩剑桥, 孙昭华, 黄颖, 等. 三峡水库蓄水后荆江沙质河段冲淤分布特征及成因. 水利学报, 2014, 45(3): 277-286.]
- [25] Lu Jinyou, Qu Geng, Li Fazheng, et al. Channel evolution of the reach from Xiongjiazhou to Chenglingji in Lower Jingjiang River and regulation considerations. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011, 28(1): 113-



118. [卢金友, 渠庚, 李发政, 等. 下荆江熊家洲至城陵矶河段演变分析与治理思路探讨. 长江科学院院报, 2011, 28 (11): 113-118.]
- [26] Cong Zhentao, Xiao Peng, Zhang Danwu, et al. Water stage at Chenglingji before and after the Three Gorges Project. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(3): 23-28. [丛振涛, 肖鹏, 章诞武, 等. 三峡工程运行前后城陵矶水位变化及其原因分析. 水力发电学报, 2014, 33(3): 23-28.]
- [27] Shi Yong, Luan Zhenyu, Chen Liangang, et al. Numerical study of the evolution trend in the river-lake relationship in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Advances in Water Sciences*, 2010, 21(6): 832-839. [施勇, 栾震宇, 陈炼钢, 等. 长江中下游江湖关系演变趋势数值模拟. 水科学进展, 2010, 21(6): 832-839.]

## The typical meandering river evolution adjustment and its driving mechanism in the downstream reach of TGR

FAN Yongyang<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, HAN Jianqiao<sup>1,2</sup>, YU Mengqing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Sources and Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** The impoundment of huge reservoirs deeply changes the water and sediment process in the downstream reaches and then influences the evolution of the downstream rivers. The meandering rivers sensitively responded to the variation of water and sediment process. That is why the meandering rivers are the important survey regions of river evolution, channels regulation and flood control projects. Based on the measured hydrological and morphological data from 1996 to 2016, the evolution law and its driving mechanism of the typical meandering river in the downstream reaches of Three Gorges Reservoir (TGR) are studied. By building the relationship between the cross-sections variation and the influencing factors, the mechanism is well examined. The results show that (1) before the establishment of the Three Gorges Reservoir, the meandering rivers have two types of evolution laws named "Convex banks deposition and concave banks erosion" and "Convex banks erosion and concave banks deposition". After the impoundment of the great project, the meandering rivers are featured only by the latter type. (2) After the retaining of water and sediment of TGR since 2003, the low flow channel and bankfull channel in Lower Jingjiang River have been continually eroded and the eroded areas are found in the low shoal of convex banks. The phenomenon is mainly resulted from the variation of water flow and sediment transportation and also influenced by the upstream river region, riverbed boundaries and branches. (3) The growing process of flow discharge from low water to bankfull discharge can lead to the increase of sediment transport capacity. When no big flood of discharge over 35000 m<sup>3</sup>/s is observed after the impoundment of TGR, the duration of bankfull discharge (22000- 25000 m<sup>3</sup>/s) decides the erosion or deposition of convex banks after the impoundment. When the number of lasting days of bankfull discharge (22000- 25000 m<sup>3</sup>/s) exceeds 20, the convex banks will be eroded. The concentration of coarse sand decrease contributes to the improvement of strength of water.

**Keywords:** downstream reaches of reservoirs; meandering river; evolution adjustment; driving mechanism; Lower Jingjiang River