近50年来荆江监利段河床平面及断面形态调整特点

林芬芬, 夏军强*, 周美蓉, 邓珊珊

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072

* 联系人, E-mail: xiajq@whu.edu.cn

2016-10-08 收稿, 2016-12-27 修回, 2016-12-29 接受, 2017-06-08 网络版发表

国家自然科学基金(51579186, 51339001)和国家重点研发计划课题(2016YFC0402303/05)资助

摘要 利用近50年来实测水沙及地形等资料, 采用河段平均的方法, 详细计算了监利段河床平面及断面形态的调整过程, 主要包括河道深泓线及岸线变化、平滩河槽形态调整及其与前期水沙条件之间的关系. 计算结果表明: 上车湾裁弯后监利河段河势调整剧烈, 其河段尺度的年均深泓摆幅约为35.1 m/a, 20世纪90年代因该河段高水位历时较长深泓摆幅增至45.4 m/a, 三峡工程运用后受护岸工程影响该值降至32.8 m/a. 2002~2013年监利河段年均崩退速率约为14.3 m/a, 岸线累计崩长达15.4 km, 其中左岸占64%; 荆江门、七弓岭及观音洲河湾的凸岸发生崩退, 岸线崩长占河段崩岸总长的43%. 目前该河段的曲折系数稳定在2.02, 而局部河段——七弓岭河湾的曲折系数随八姓洲狭颈逐步缩窄增至3.82, 有发生自然裁弯趋势. 监利河段典型崩岸断面的平滩河宽可随水沙条件的改变迅速做出响应, 但由于大规模护岸工程的修建, 河段尺度的平滩河宽变化不大; 断面形态调整主要表现在河段平滩水深变化方面, 已累计增加约0.9 m, 相应平滩面积增加近6.6%, 且二者均与前5年汛期平均的水流冲刷强度密切相关. 此外在持续冲刷过程中, 监利段河床纵比降趋于调平, 目前稳定在 4.35×10^{-5} 左右, 河床在纵深方向上趋于稳定.

关键词 河床调整, 断面形态, 平面形态, 监利河段, 三峡工程

监利河段位于下荆江尾部, 属典型的弯曲型河道. 近50年来在自然因素与人类活动的共同作用下, 进入该河段的水沙条件发生显著改变, 河床形态调整剧烈, 对河道防洪、航运及岸滩土地利用等均有深刻影响, 故有必要研究该河段的河床演变特点. 已有研究^[1~6]多从宏观上定性描述监利河段的演变规律及调整趋势, 但河势剧烈变化使该河段平面及断面形态发生显著改变, 亟需定量研究其河床形态调整特点. 目前关于河床变形的定量研究主要基于平衡或准平衡条件^[7,8], 对于受人类活动严重影响使河床处于显著调整中的河流并不适用. 为研究非平衡状态下冲积河流河床形态随水沙条件的变化, Shin等人^[9]提出了描述韩国Hwang河实际河宽的指数关系式,

廖治棋等人^[10]建立了考虑来水过程影响的平滩面积滞后响应模型. 但上述方法仅适用于特定水文断面, 故Harman等人^[11]采用基于对数转换的几何平均法来计算河段平均的平滩参数. Xia等人^[12]则对上述方法进行改进, 提出了基于河段尺度的平滩河槽形态参数的计算方法, 该方法综合考虑了断面分布不均对计算结果的影响, 并保证了河槽尺寸的连续性, 即河段尺度的平滩面积恒等于相应河宽与水深的乘积.

本文利用监利水文站1955~2015年实测水沙数据, 监利河段1969~2015年43个固定断面的地形资料及2002、2013年精度为1:10000的水下地形图, 采用Xia等人^[12]提出的河段平均方法, 分析近50年来监利段河床平面及断面形态的调整特点. 首先计算河段

引用格式: 林芬芬, 夏军强, 周美蓉, 等. 近50年来荆江监利段河床平面及断面形态调整特点. 科学通报, 2017, 62: 2698~2708

Lin F F, Xia J Q, Zhou M R, et al. Variations in planform and cross-sectional geometries of the Jianli reach over the past fifty years (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2698~2708, doi: 10.1360/N972016-01106

尺度的深泓摆幅及摆向参数(深泓点距相应左岸滩唇距离与平滩河宽的比值),用于定量描述河段整体的深泓摆动特点;在此基础上对河道岸线变化进行分析,重点研究三峡工程运用后监利河段的崩岸特点及可能的出险部位;其次建立典型崩岸断面的平滩河宽与前期水沙条件之间的经验关系,用于反演局部河段的河岸崩退过程;最后计算2002~2015年河段尺度的平滩河槽形态特征参数,同样建立这些平滩参数与前期水沙条件之间的关系,用以反映持续冲刷过程中断面形态的调整特点。

1 研究河段概况

1.1 研究河段

监利河段上起塔市驿,下迄城陵矶,长94.5 km,属弯曲型河段,主要由监利、荆江门等5个典型河湾组成(图1),尾端有洞庭湖来水入汇^[13]。监利河段河床组成多为中细沙,床沙中值粒径在0.12~0.21 mm之间,卵石层在床面以下埋藏较深^[14,15]。河岸左右岸边界组成物质有一定差异,左岸属典型的二元结构,上部黏性土层较薄,下部沙土层较厚,且其顶板常露出于枯水位以上,故河岸总体抗冲能力较差^[16];右岸多为花岗岩组成的丘陵阶地,为限制河道右摆的天然节点,故河岸抗冲能力相对较强^[14,15,17]。近50年来监利河段经历了上车湾人工裁弯(1969年),乌龟洲主支汊两次易位(1972, 1995年),故该河段河势调整较为剧烈。如1980年天星阁段岸线崩退长度近1800 m^[13]。1984年后,下荆江实施了较大规模的河势控制工程,守护岸线长度达57 km,崩岸严重的局部河段得到初步控制^[18]。1998年大水后,监利河段典型河湾凹岸、天字一号等险工段的护岸工程进行了多次新建与加固,如尾间段(熊家洲-城陵矶段)的护岸长度达28 km,河道岸线趋于稳定^[5]。三峡工程运用后,进入该河段的沙量大幅降低,低含沙水流的长期顶冲或贴岸冲刷致使铺子湾、天字一号、部分河湾凸岸等局部区域崩岸频发(图1)。这些局部河段的崩岸过程不仅影响河道防洪安全,还会危及河势稳定及河道治理效果等^[16]。

1.2 水沙条件及河床冲淤过程

(i) 水沙条件。 监利河段水沙主要来源于长江干流,汛期集中在5~10月,尾端有洞庭湖来水入汇,

图1 (网络版彩色)监利河段示意图

Figure 1 (Color online) Sketch of the Jianli reach

而区间内无较大汇流或分流,故监利站实测水沙数据可较好地反映进入该河段的水沙条件。由图2可知,上车湾裁弯后(1969~2002年),由于荆江三口分流分沙比减小^[17],进入监利河段的水沙总量有所增加,其中多年平均汛期水量增幅较大,较裁弯前(1955~1968年)的 $2433 \times 10^8 \text{ m}^3$ 偏丰13%。三峡工程运用后,监利站水量变化不大,沙量却大幅降低,多年平均汛期沙量降至 $0.72 \times 10^8 \text{ t}$ (2003~2015年),较蓄水前(1969~2002年)减小80%。

(ii) 河床冲淤过程。 随水沙条件的显著改变及裁弯工程的实施,监利河段经历了“冲刷-淤积-相对平衡-持续冲刷”的河床冲淤过程,各时期河床冲淤量变化如图3所示。1969~1991年,监利河段河床处于累计冲刷状态。主要是因为上车湾裁弯后,裁弯段上游水面比降增大,且汛期下泄水量较以往(1955~1968年)偏丰,故该河段河床发生了强烈的溯源冲刷,累计冲刷量达 $2.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[19]。1991~1998年,监利河段

图2 (网络版彩色)1955~2015年监利站汛期水量和沙量

Figure 2 (Color online) Temporal variations in water volume and sediment load at Jianli during flood seasons from 1955 to 2015

图3 (网络版彩色)1969~2015年监利河段累计冲淤过程

Figure 3 (Color online) Cumulative channel evolution volume in the Jianli reach from 1969 to 2015

河床由冲刷转为淤积. 主要原因是该时期大洪水频发, 受荆江来水与洞庭湖出流顶托影响, 该河段高水位历时较长^[14], 大水漫滩造成洲滩淤积明显, 河床累计淤积量达 $1.86 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[19]. 1998~2002年, 监利河段河床冲淤处于相对平衡状态, 表现为轻微冲刷. 三峡工程运用后(2002~2015年), 进入该河段的沙量大幅减少, 河床发生普遍冲刷, 表现为“滩槽均冲”, 采用断面法计算得到的监利段平滩河槽累计冲刷量达 $1.60 \times 10^8 \text{ m}^3$.

2 计算方法

当水位平滩时, 水流造床能力最强^[12], 故本文主要研究监利河段的平滩河槽形态调整特点. 平滩河槽形态的特征参数通常包括平滩水位下的河宽、水深及面积等. 监利段实测断面地形资料表明, 各断面平滩河槽形态之间存在显著差异, 因此特定断面的形态调整特点难以反映整个河段的变化规律. 此处采用Xia等人^[12]提出的河段平均的方法, 计算监利段河段尺度的平滩河槽形态参数, 并建立其与前期水沙条件之间的经验关系, 用于定量反映这些参数随水沙条件的变化趋势.

2.1 河段尺度的平滩河槽形态参数计算

假定计算河段长 L , 内设若干个固定观测断面, 第 i 个断面的平滩河槽形态参数可表示为 G_{bf}^i , 相应河段尺度的平滩河槽形态参数 $\bar{G}_{bf}$ 可按式(1)计算:

$$\bar{G}_{bf} = \exp \left(\frac{1}{2L} \sum_{i=1}^{N-1} (\ln G_{bf}^{i+1} + \ln G_{bf}^i) \times (x_{i+1} - x_i) \right), \quad (1)$$

式中, x_i 表示第 i 个断面距大坝的距离; N 为计算河段的断面总数.

2.2 平滩河槽形态调整对水沙过程的响应

来水来沙条件是决定河床冲淤过程的重要因素. 三峡工程运用后监利段的水、沙量集中于汛期(5~10月)下泄, 故认为河床调整主要发生在汛期, 非汛期的河床冲淤可近似忽略, 因此本文仅考虑汛期水沙条件对该河段平滩河槽形态调整的影响. 对于监利河段这样的少沙河流, 一般采用水流冲刷强度表征来水来沙条件^[20]:

$$\bar{F}_f = \frac{(\bar{Q}_f^2 / \bar{S}_f)}{10^8}, \quad (2)$$

式中, $\bar{Q}_f$ 和 $\bar{S}_f$ 分别为监利站汛期平均流量(m^3/s)和悬移质含沙量(kg/m^3).

考虑到河床形态调整存在滞后响应现象^[21], 此处采用前 n 年汛期平均的水流冲刷强度表示前期水沙条件, 参数 $\bar{F}_{nf}$ 的表达式为

$$\bar{F}_{nf} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{F}_{fi}. \quad (3)$$

为研究河床断面形态的调整过程, 可建立特定断面或河段尺度的平滩河槽形态参数(G_{bf}^i 或 $\bar{G}_{bf}$)与前期水流冲刷强度 $\bar{F}_{nf}$ 之间的经验关系^[20,22]. 计算结果表明: 二者相关系数在 $n=5$ 时达到最大, 故平滩河槽形态参数的计算公式可表示为

$$G_{bf}^i \text{ 或 } \bar{G}_{bf} = k (\bar{F}_{5f})^\alpha, \quad (4)$$

式中, k 为系数; α 为指数. 这两个参数需要用实测水沙资料及断面地形资料率定.

3 河床平面形态调整特点

监利段河床在冲淤交替过程中, 平面形态变化剧烈, 主要表现在弯道段及过渡段深泓线摆动频繁, 主流顶冲及贴岸段岸线崩退剧烈, 河段曲折系数随河湾的缓慢下移有所增加, 尾间段(熊家洲-城陵矶段)切滩撇弯现象频发等. 故本节主要从深泓线、岸线及曲折系数变化3个方面, 分析近50年来监利段河床平面形态的调整特点.

3.1 深泓线变化

(i) 深泓摆动幅度. 首先确定监利河段43个固定断面的年均深泓摆动幅 ΔL_i , 即计算各断面当年与上一年汛后深泓点横向摆动距离的绝对值. 然后采用式(1), 计算得到河段尺度的年均深泓摆动幅 $\Delta \bar{L}$, 如表1

所示. 1969~1987年监利河段尺度的年均深泓摆幅约为35.1 m/a, 主要是因为上车湾人工裁弯后, 裁弯段上游水面比降增大, 造成姚圪脑过渡段及乌龟洲汊道段主流的频繁摆动; 此后河势控制工程逐步实施且河势自身调整基本完成, 河床平面变形减缓, 年均深泓摆幅仅20.2 m/a (1987~1993年); 1993~1998年大洪水频发, 监利河段高水位历时较长且河床抗冲能力差, 滩槽冲淤交替明显, $\Delta\bar{L}$ 值增至45.4 m/a; 三峡工程运用后, 由于护岸工程的修建及加固, 监利河段河势趋于稳定, 年均深泓摆幅降至32.8 m/a (2002~2015年), 但部分河湾由于发生撇弯现象, 深泓摆动明显, 如七弓岭河湾的深泓摆幅最大达105 m/a.

(ii) 深泓摆动方向. 为定量分析深泓摆动方向, 此处计算了监利河段1969~2015年河段尺度的深泓摆向参数 $\bar{M}_{th}$. 假设河段内第 i 个断面深泓点距相应左岸滩唇距离 B_{lh}^i 与平滩河宽 B_{bf}^i 的比值为该断面的深泓摆向参数 M_{th}^i , 河段尺度的深泓摆向参数 $\bar{M}_{th}$, 可类似采用式(1)计算. 当 $\bar{M}_{th} < 0.5$ 时, 深泓居左; $\bar{M}_{th} > 0.5$ 时, 深泓居右; $\bar{M}_{th} = 0.5$ 时, 深泓居中. 计算结果(表2)表明, 近50年来监利河段深泓线整体居于河道左侧. 上车湾裁弯后, 河段平均的深泓摆向参数仅0.210(1975年), 这是因为新河的调整主要表现为凹岸单侧展宽^[17], 而上车湾新河凹向左岸, 故深泓不断向北移动; 1998年大洪水期间, 监利河段主流高水取直而偏离凹岸, 参数 $\bar{M}_{th}$ 值增至0.359; 三峡工程运用后, 七弓岭、观音洲等河湾发生切滩撇弯现象, 深泓累计向左移动约6%的平滩河宽(2003~2015年).

3.2 岸线变化

监利河段岸线随深泓的左右摆动相应发生调整. 上车湾裁弯后, 部分河湾切滩现象频发, 主流顶冲及贴岸段崩岸时有发生; 1984年来下荆江实施了大规模

表1 监利河段深泓摆动幅度(单位: m/a)

Table 1 Calculated thalweg migration ranges at reach-scale in the Jianli reach (Unit: m/a)

年份	$\Delta\bar{L}$	年份	$\Delta\bar{L}$
1969~1987	35.1	2006~2007	22.9
1987~1993	20.2	2007~2008	34.7
1993~1998	45.4	2008~2009	34.0
1998~2002	20.7	2009~2010	20.6
2002~2003	58.4	2010~2011	24.5
2003~2004	26.6	2011~2012	32.9
2004~2005	27.1	2012~2013	39.4
2005~2006	49.5	2013~2014	23.2
		2014~2015	32.6

表2 监利河段不同时刻的深泓摆向参数

Table 2 Calculated parameters for the reach-scale thalweg migration orientation in the Jianli reach

年份	$\bar{M}_{th}$	年份	$\bar{M}_{th}$
1969	0.362	2006	0.354
1975	0.210	2007	0.367
1987	0.319	2008	0.360
1993	0.317	2009	0.315
1998	0.359	2010	0.349
2002	0.371	2011	0.351
2003	0.328	2012	0.359
2004	0.350	2013	0.324
2005	0.376	2014	0.369
		2015	0.345

河势控制工程, 河道横向展宽受到抑制, 崩岸险情有所改善; 三峡工程运用后, 荆江门、七弓岭及观音洲等河湾的凸岸发生崩退, 部分河段河床向宽浅方向发展, 对河道防洪、航运及岸滩土地利用等带来一定的影响. 故此处将侧重分析三峡工程运用后监利河段的崩岸特点.

3.2.1 工程运用前监利河段岸线变化

图4给出了1978年3月2日, 1987年3月4日及2002

图4 (网络版彩色)监利河湾卫星遥感影像. (a) 1978年; (b) 1987年; (c) 2002年

Figure 4 (Color online) Landsat MSS and ETM images of the Jianli bend in 1978 (a), 1987 (b), and 2002 (c)

年3月9日的卫星遥感影像资料(资料源于United States Geological Survey: <http://glovis.usgs.gov/>), 可见三峡工程运用前监利河段岸线变化主要表现为: 上车湾裁弯段新河持续冲刷展宽, 老河逐渐淤积形成牛轭湖; 弯道段凹岸崩退, 凸岸淤长, 过渡段变化相对较小^[14]. 其中监利河湾因主支汊发生两次易位, 河势变化十分明显^[13]: 1971年监利河湾发生切滩, 乌龟洲右汊迅速发展, 且铺子湾下段受主流持续顶冲影响, 崩岸过程较为突出, 普遍崩退宽度达500 m; 1975年主流摆回左汊, 致使老河口段发生了长7 km、最大崩退宽度1300 m的崩岸, 同时乌龟洲几乎与右岸相连成为边滩; 1995年后大洪水频发, 主流再次稳定于右汊, 造成乌龟洲右缘全线冲刷后退, 洲体逐渐萎缩且平面上不断向北移动.

3.2.2 工程运用后监利河段崩岸特点

(i) 崩岸分布及崩退趋势. 由表3给出的2002、2013年实测水下地形图中的岸线对比结果可以看出: 至2013年监利河段的年均崩退速率约为14.3 m/a, 岸线总崩退长度达15.4 km, 其中左岸占64%; 崩岸区集中分布在弯道段及过渡段, 且荆江门、七弓岭及观音洲等河湾的凸岸发生崩退(图1), 岸线崩长占河段崩岸总长的43%. 此外根据对监利河段2002~2015年断面地形资料分析可知, 大约有33%断面存在明显的河岸崩退现象, 其中最大崩退速率达158 m/a(2006年荆146+1断面). 可见, 崩岸仍是近期监利河段河床演变的重要组成部分. 由于主流顶冲及贴岸部位岸坡较陡, 崩岸时有发生. 故铺子湾、天字一号、荆江门及七弓岭等局部河段可能继续崩退, 天星阁、洪山头及盐船套等部分区域则存在岸线崩退风险.

(ii) 弯道段凸岸崩退过程. 三峡工程运用以

来, 荆江门、七弓岭及观音洲等河湾的凸岸崩退过程显著(图1). 主要原因在于上述河湾的凹岸侧床沙受护岸工程控制较难起动, 为满足水流挟沙力的最低要求, 冲刷朝凸岸一侧发展, 且该侧河岸土体组成多为二元结构, 抗冲性能较差. 此外这些河湾多为急弯段, 切滩撇弯现象频繁发生. 故在低含沙水流的长期淘刷下, 凸岸边滩持续冲刷后退. 为更直观地反映工程运用对上述河湾河床演变带来的影响, 此处给出了典型断面荆173及JL181.1凸岸的具体崩退过程. 荆173断面位于荆江门河湾, 深槽居右. 三峡工程运用以来, 凸岸边滩不断冲刷后退, 岸坡随之变陡, 至2015年累计崩退宽度约146 m, 滩面高程平均降低8 m左右(图5(a)). JL181.1断面位于观音洲河湾, 深槽居左. 2007年来该断面凸岸不断向后崩退, 8年内累计崩退宽度达162 m(图5(b)). 由此可见, 凸岸崩退是清水冲刷期监利段局部区域河床调整的一个重要方面.

3.3 河湾蠕动及曲折系数变化

近50年来随监利河段凹岸一侧岸线的逐步崩退, 河段内河湾整体呈缓慢下移趋势. 荆江门河湾弯顶自1952年来下移约3 km^[13], 七弓岭河湾弯顶于1980~1987年下移近2 km, 与洞庭湖出口洪道日趋逼近; 观音洲河湾弯顶因主流持续顶冲而发生强烈崩退, 造成江湖汇流点下移约1.2 km, 影响河势稳定^[5]. 此外, 监利河段的曲折系数呈先减后增趋势: 下荆江系统裁弯前该河段曲折系数为2.82, 裁弯后降至1.93^[17]; 三峡工程运用后监利河段护岸工程的实施限制了河床的平面变形, 至2013年该河段曲折系数为2.02, 较蓄水前仅增长4%. 近期监利河段尾闾处河湾仍较为发育, 其中七弓岭河湾的曲折系数随八姓洲狭颈逐步缩窄增至3.82(2013年), 约为河段整体的2倍, 有

表3 2002~2013年监利河段崩岸区统计结果

Table 3 Statistics of the riverbank erosion regions in the Jianli reach from 2002 to 2013

河段名称	崩岸位置	岸别	累计崩退长度 (km)	累计崩退宽度 (m)	年均崩退速率 (m/a)
监利河段	铺子湾	左岸	1.3	236	21.5
	上车湾	左岸	3.1	131	11.9
	天字一号	右岸	4.4	98	8.9
	荆江门	左岸	1.9	146	13.3
	七弓岭	左岸	3.5	174	15.8
	观音洲	右岸	1.2	162	14.7
合计	—	—	15.4	—	14.3

图5 (网络版彩色)典型断面凸岸崩退过程. (a) 荆173; (b) JLL181.1

Figure 5 (Color online) Temporal changes of bank profiles at two sections of Jing173 (a) and JLL181.1 (b)

发生自然裁弯趋势.

4 河床断面形态调整特点

随河床的冲淤交替发展, 监利河段断面形态亦发生显著调整. 此处主要研究了监利段平滩河槽形态对水沙过程的响应. 考虑到三峡工程运用前实测断面地形资料精度有限且与工程运用后的实测断面位置不完全重合, 故此处将重点分析工程运用后平滩河槽形态特征参数(平滩水深、河宽及面积)随前期水沙条件的调整过程.

4.1 典型断面的平滩河槽形态调整

(i) 工程运用前断面形态调整. 由图4可知, 三峡工程运用前乌龟洲汉道及上车湾裁弯段下游河势变化相对剧烈, 故此处选取这两处的典型断面进行研究. 上车湾裁弯后, 位于乌龟洲汉道的荆145断面凸岸发生切滩现象, 其断面形态由偏“V”型转变为“W”型双槽格局(图6(a)). 由于护岸工程未及时实施, 该断面平滩河宽增加近1倍, 由1969年的1717 m展宽至1987年的3435 m. 20世纪90年代初, 右汊冲刷发展, 左汊淤积萎缩, 至1995年底主流稳定在乌龟洲右汊^[2], 深泓累计右移约2980 m, 左汊相应淤进460 m

左右(1987~1998年). 此后主流持续贴岸冲刷造成乌龟洲右缘大幅度崩退, 累计崩退宽度约385 m, 年均崩退速率达96.3 m/a(1998~2002年). 荆166断面位于上车湾裁弯段下游约3 km处, 1969~1987年该断面平滩面积有所减小, 主要原因是引河的剧烈冲刷造成裁弯段下游河床发生淤积^[23]. 1987年来荆166断面表现为典型的“凹冲凸淤”形式, 主槽向凹岸侧不断移动, 深泓随之左移约415 m, 凹岸累计向后崩退达395 m, 凸岸边滩相应淤进约786 m(1987~1998年), 主槽平均冲深7 m左右(图6(b)). 1998年大洪水后, 大规模护岸工程的修建限制了平滩河槽形态的调整, 荆166断面处于相对稳定状态. 以上两个断面形态的调整过程与图4中卫星遥感影像资料呈现的河道演变趋势一致.

(ii) 工程运用后断面形态调整. 图7给出了三峡工程运用后(2002~2015年)监利河段典型断面岸坡变化过程. 荆146+1断面位于铺子湾段, 深槽居左. 从图7(a)中可以看出, 该断面左岸受主流持续顶冲影响, 岸线崩退剧烈, 至2008年累计崩退宽度达212 m, 深泓点相应向左移动约198 m. 2008年航道部门对铺子湾段长约3.9 km的岸线进行了守护^[13], 此后荆146+1断面基本不发生崩退. 荆150断面位于天字一

图6 (网络版彩色)监利河段典型断面形态变化过程. (a) 荆145; (b) 荆166

Figure 6 (Color online) Temporal changes of cross-sectional profiles at two sections of Jing145 (a) and Jing166 (b)

图7 (网络版彩色)典型断面岸坡形态变化过程。(a) 荆 146+1; (b) 荆 150

Figure 7 (Color online) Temporal changes of bank profiles at two sections of (a) Jing146+1 and (b) Jing150

号上段,主流贴左岸下行使该侧岸线不断向后崩退,13年内累计崩退宽度约131 m,近岸河床累计冲深约8 m,左岸岸坡随之变陡。此处将采用这两个典型断面来研究河岸崩退与前期水沙条件之间的关系。其中荆146+1断面在2008年后基本稳定,断面形态调整主要受护岸工程等人因因素影响,而受前期水沙条件影响较小,故仅选取该断面护岸工程实施前(2002~2008年)的地形数据及相关水沙资料对式(4)进行率定。

基于所选断面的地形资料及监利站实测水沙数据,关系式(4)中参数的率定结果如图8所示。由于河岸崩退除与水沙条件相关外,还与河段所在边界条件等因素有关,故不同断面的参数率定值存在差异:荆146+1及荆150断面的 α 率定值分别为1253和1015, β 率定值为0.1577和0.0611。但两个断面的平滩河宽 W_{bf} 与 $\bar{F}_{sf}$ 之间相关性较强,相关系数分别达0.84和0.86。可见典型崩岸断面的平滩河宽能随水沙条件的变化做出迅速调整,故本文建立的经验公式可用于反演局部未守护或守护不良河段的河岸崩退过程。应当指出,关系式中率定的参数仅适用于以水沙条件为主要影响因素的特定断面,河道整治等人因因

素对河宽调整的影响有待进一步研究^[20]。

4.2 河段尺度的平滩河槽形态调整

此处首先采用式(1)计算监利段2002~2015年河段尺度的平滩河槽形态特征参数(平滩河宽,水深及面积),其次根据式(4)建立这些参数与前期水沙条件之间的经验关系。由图9(a)可知,受各类河道整治工程的影响,河段尺度的平滩河宽 $\bar{W}_{bf}$ 变化较小,断面形态调整以河段平滩水深 $\bar{H}_{bf}$ 变化为主,已累计增加约0.9 m,相应河段平滩面积 $\bar{A}_{bf}$ 增加近6.6% (2002~2015年),主槽形态趋于窄深。图9(b)则给出了河段尺度的平滩河槽形态参数与 $\bar{F}_{sf}$ 之间的定量关系式。结果表明:河段平滩河宽 $\bar{W}_{bf}$ 与 $\bar{F}_{sf}$ 之间的关系较弱,二者相关系数仅0.05,主要原因在于大规模护岸工程的修建限制了河道横向展宽过程,故河段平滩河宽受前期水沙条件影响较小^[22];而河段平滩水深及面积与 $\bar{F}_{sf}$ 之间的相关系数均高于0.8,相关性较好。可见,监利段河段尺度的平滩水深及面积可较好地由三峡工程运用引起的水沙条件改变迅速做出响应。

基于各固定断面的平均河底高程(断面平滩高程

图8 (网络版彩色)典型断面平滩河宽与前5年汛期平均的水流冲刷强度的关系。(a) 荆 146+1; (b) 荆 150

Figure 8 (Color online) Relationships between the bankfull widths and the previous five-year average fluvial erosion intensity during flood seasons at two sections of Jing146+1 (a) and Jing150 (b)

图9 (网络版彩色) 监利段河段尺度的平滩河槽形态参数调整. (a) 历年变化过程; (b) 对水沙过程的响应

Figure 9 (Color online) Adjustment in the reach-scale bankfull geometry ($\bar{G}_{bf}$) in the Jianli reach. (a) Temporal variations in $\bar{G}_{bf}$; (b) relationships between $\bar{G}_{bf}$ and $\bar{F}_{sf}$

与平滩水深之差), 可以确定监利段不同时刻的河床纵比降 J 及纵向稳定系数 ϕ_h (床沙中值粒径 d_{50} 与比降 J 的比值). 由图10(a)可知, 2002~2015年该河段河床平均冲深约1.12 m, 其中河段上部河床冲深较下部更为严重. 主要原因是监利段尾端受洞庭湖汇流顶托影响, 河段下部水面比降减小, 致使下部河床冲刷幅度较小, 甚至部分年份(如2005年)出现淤积. 如图10(b)所示, 在河床持续冲刷过程中, 监利段河床纵比降 J 与河床纵向稳定系数 ϕ_h 相应发生调整, 二者变化总体呈相反趋势. 由于监利段河床组成较细且均匀, 沿程变化较小, 不易形成抗冲覆盖层, 在持续冲刷过程中河床纵比降 J 趋于调平, 目前稳定在 4.35×10^{-5} 左右, 较蓄水前(2002年)减小约19.3%; ϕ_h 则由2002年的3.32增至2015年的4.64, 增大近39.7%. 故三峡工程运用后监利段河床整体呈冲深下切趋势, 且在纵深方向上趋于稳定.

5 结论

利用近50年来实测水沙及地形资料, 系统分析了监利段河床平面及断面形态的调整特点, 得到如下结论.

(1) 上车湾裁弯后监利河段河势调整剧烈, 河段平均的年均深泓摆幅约为35.1 m/a; 1993~1998年该河段高水位历时较长, 年均深泓摆幅增至45.4 m/a; 三峡工程运用后受大规模护岸工程的影响, 该值降到32.8 m/a.

(2) 2002~2013年监利河段年均崩退速率约为14.3 m/a, 岸线累计崩长达15.4 km, 其中左岸占64%; 荆江门、七弓岭及观音洲等河湾的凸岸发生崩退, 岸线崩长占河段崩岸总长的43%. 目前该河段的曲折系数稳定在2.02, 但七弓岭河湾随八姓洲狭颈的缩窄逐渐发展为锐湾低滩形态, 曲折系数达3.82, 有发生自然裁弯趋势.

(3) 典型崩岸断面的平滩河宽可随水沙条件的改变迅速做出响应. 建立了平滩河宽与前5年汛期平均水流冲刷强度之间的经验公式, 且平滩河宽的计算值与实测值较为吻合. 该公式结构形式适用于以水沙条件为主要影响因素的崩岸断面, 能反演局部未守护或守护不良河段的河岸崩退过程. 由于河岸崩退除与水沙条件密切相关外, 还与断面所在边界条件等因素有关, 故不同断面的参数率定值存在

图10 (网络版彩色) 近期监利段河床纵剖面变化. (a) 河底平均高程; (b) J , ϕ_h 变化

Figure 10 (Color online) Temporal variations in the longitudinal channel profiles in the Jianli reach. (a) Mean riverbed elevation; (b) values of J and ϕ_h

一定差异.

(4) 由于大规模护岸工程的修建, 监利段河段尺度的平滩河宽变化不大; 断面形态调整主要表现在河段平滩水深变化方面, 已累计增加约0.9 m, 相应平滩面积增加近6.6%, 且二者均与前5年汛期平均的

水流冲刷强度之间的相关程度较高. 故建立的经验关系可用于反演监利河段平滩河槽形态随水沙条件的调整过程. 此外在持续冲刷过程中, 监利段河床纵比降有所调平, 目前稳定在 4.35×10^{-5} 左右, 河床在纵深方向上趋于稳定.

参考文献

- Pan Q S. Study on evolution of middle and lower reaches of Yangtze River in recent fifty years (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2001, 5: 18–22 [潘庆荣. 长江中下游河道近 50 年变迁研究. 长江科学院院报, 2001, 5: 18–22]
- Li L Q, Lu X X, Chen Z. River channel change during the last 50 years in the middle Yangtze River, the Jianli Reach. *Geomorphology*, 2007, 85: 185–196
- Xie X P, Zhang S L, Wang Y D, et al. Temporal and spatial evolution of meandering river in the middle reaches of the Chang Jiang River (in Chinese). *Quat Sci*, 2008, 2: 326–331 [谢小平, 张松林, 王永栋, 等. 长江中游曲流河段河道的近代演化过程研究. 第四纪研究, 2008, 2: 326–331]
- Xu Q X, Yuan J, Wu W J, et al. Fluvial processes on middle Yangtze river after impoundment of Three Gorges Project (in Chinese). *J Sed Res*, 2011, 2: 38–46 [许全喜, 袁晶, 伍文俊, 等. 三峡工程蓄水运用后长江中游河道演变初步研究. 泥沙研究, 2011, 2: 38–46]
- Lu J Y, Qu G, Li F Z, et al. Channel evolution of the reach from Xiongjiazhou to Chenglingji in lower Jingjiang River and regulation considerations (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2011, 11: 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, 11: 113–118]
- Yao S M, Lu J Y. Evolution analysis and scouring-deposition prediction of middle and lower reaches of Yangtze River (in Chinese). *Yangtze River*, 2013, 23: 22–28 [姚仕明, 卢金友. 长江中下游河道演变规律及冲淤预测. 人民长江, 2013, 23: 22–28]
- Lee J S, Julien P Y. Downstream hydraulic geometry of alluvial channels. *ASCE J Hyd Eng*, 2006, 132: 1347–1352
- He L, Wilkerson G V. Improved bankfull channel geometry prediction using two-year return-period discharge. *J Am Water Res Assoc*, 2011, 47: 1298–1316
- Shin Y H, Julien P Y. Changes in hydraulic geometry of the Hwang River below the Hapcheon Re-regulation Dam, South Korea. *Int J River Basin Manage*, 2010, 8: 139–150
- Liao Z Q, Fan B L, Li L Y, et al. Delayed response of bankfull area due to variations of water and sediment in Jianli Station (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2016, 33: 1–5 [廖治棋, 范北林, 李凌云, 等. 监利站平滩面积对水沙条件变化的滞后响应. 长江科学院院报, 2016, 33: 1–5]
- Harman C, Stewardson M, DeRose R. Variability and uncertainty in reach bankfull hydraulic geometry. *J Hydrology*, 2008, 351: 13–25
- Xia J Q, Li X J, Li T, et al. Response of reach-scale bankfull channel geometry in the Lower Yellow River to the altered flow and sediment regime. *Geomorphology*, 2014, 213: 255–265
- Cao G J, Wang J. Measurements and Studies of Hydrological and Sediment Data in the Three Gorges Project (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015 [曹广晶, 王俊. 长江三峡工程水文泥沙观测与研究. 北京: 科学出版社, 2015]
- Peng Y M, Gao Z B. Analysis on recent channel evolution of Jianli Reach in the Middle Yangtze River (in Chinese). *Yangtze River*, 2006, 37: 78–81 [彭玉明, 高志斌. 长江监利河段近期河道演变分析. 人民长江, 2006, 37: 78–81]
- Fu Z M, Yan J, Liu H H. River bed evolution and thought of waterway regulation in Jianli section of Lower Jingjiang River (in Chinese). *J Sed Res*, 2011, 5: 30–38 [付中敏, 闫军, 刘怀汉. 下荆江监利河段河床演变与航道整治思路浅析. 泥沙研究, 2011, 5: 30–38]
- Xia J Q, Zong Q L, Xu Q X, et al. Soil properties and erosions mechanisms of composite riverbanks in Lower Jingjiang Reach (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2013, 6: 810–820 [夏军强, 宗全利, 许全喜, 等. 下荆江二元结构河岸土体特性及崩岸机理. 水科学进展, 2013, 6: 810–820]
- Yang H R, Tang R C. Channel Evolution in the Jingjiang Study on Evolution of Jingjiang River in the Middle Reaches of Yangtze River (in Chinese). Beijing: China Water and Power Press, 1999 [杨怀仁, 唐日长. 长江中游荆江变迁研究. 北京: 中国水利水电出版社, 1999]
- Yu W C, Lu J Y. Bank Failure and Revetment in the Yangtze River (in Chinese). Beijing: China Water and Power Press, 2008 [余文畴, 卢金友. 长江河道崩岸与护岸. 北京: 中国水利水电出版社, 2008]
- Changjiang Water Resources Commission. Analysis of Channel Degradation Downstream of the Three Gorges Dam (in Chinese). Scientific Report of Changjiang Water Resources Commission, 2016 [长江水利委员会水文局. 2015 年度三峡水库进库水沙特性、水库淤

积及坝下游河道冲刷分析. 长委水文局科研报告, 2016]

- 20 Xia J Q, Zong Q L, Zhang Y, et al. Prediction of recent bank retreat processes at typical sections in the Jingjiang Reach. *Sci China Tech Sci*, 2014, 57: 1490–1499
- 21 Wu B S, Zheng S, Thorne C R. A general framework for using the rate law to simulate morphological response to disturbance in the fluvial system. *Prog Phys Geogr*, 2012, 36: 575–597
- 22 Xia J Q, Zong Q L, Deng S S, et al. Adjustments in reach-scale bankfull channel geometry of Jingjiang reach after operation of Three Gorges Project (in Chinese). *J Zhejiang Univ (Eng Sci)*, 2015, 2: 238–245 [夏军强, 宗全利, 邓珊珊, 等. 三峡工程运用后荆江河段平滩河槽形态调整特点. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 2: 238–245]
- 23 Chien N, Zhang R, Zhou Z D. *River Bed Evolution* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1987 [钱宁, 张仁, 周志德. *河床演变学*. 北京: 科学出版社, 1987]

Summary for “近 50 年来荆江监利段河床平面及断面形态调整特点”

Variations in planform and cross-sectional geometries of the Jianli reach over the past fifty years

LIN FenFen, XIA JunQiang^{*}, ZHOU MeiRong & DENG ShanShan

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

^{*} Corresponding author, E-mail: xiajq@whu.edu.cn

The 94.5 km long Jianli reach is located in the most strikingly meandering section of the Middle Yangtze River, from Tashiyi to Chenglingji. Over the recent fifty years, this reach has experienced significant channel evolution in response to the altered flow-sediment regime entering the study reach caused by the implementation of artificial cut-off at Shangchewan, the construction of bank revetment works and the operation of the Three Gorges Project (TGP). In this study, a reach-averaged method was used to describe the bankfull channel geometry (usually represented by bankfull width, depth and area) due to the significant longitudinal variability in the cross-sectional geometry, which integrates a geometric mean based on the log-transformation with a weighted average based on the spacing between two consecutive sections. Because of the limited accuracy of cross-sectional profiles measured prior to the TGP operation, the reach-scale bankfull channel dimensions in the Jianli reach were calculated only for the post-dam period. Based on the measured topographic and hydrological data in 1969–2015, the processes of channel evolution in the Jianli reach were investigated mainly from the adjustments in planform and cross-sectional geometries. It is discovered from the variation in planform geometry that: (1) the Shangchewan cut-off caused the river regime to adjust significantly and the average annual thalweg migration rate at reach-scale was 35.1 m/a in 1969–1987; then the effect of this artificial cut-off reduced gradually and the channel self-adjustment basically completed, with the mean migration rate decreasing to 20.2 m/a in 1987–1993, while it increased to 45.4 m/a over the period 1993–1998 due to the high flows occurring in the 1990s; the mean thalweg migration rate decreased to 32.8 m/a, because of the effect of various bank-revetment works after the TGP operation; (2) the process of bankline migration in the Jianli reach was remarkable since the TGP operation, with the average annual bank erosion rate of 14.3 m/a and the cumulative bank erosion length of 15.4 km; 64% of the riverbank erosion regions were located on the left side, and severe bank retreat processes occurred at convex banks, accounting for 43% of the whole riverbank erosion regions in the Jianli reach; and (3) a nature cut-off may occur in the Qigongling bend since its sinuosity has been greater than 3.8, approximately two times the sinuosity of the whole channel. The variation in cross-sectional geometries indicates that: although there were significant bank erosion processes in local regions, the channel evolution was mainly characterised by the variation in bankfull depth after the TGP operation, with the increased reach-scale bankfull depth of 0.9 m and thus an increase of 6.6% in the reach-scale bankfull area. Furthermore, empirical relationships were developed between the bankfull width at a section with severe bank erosion, the reach-scale bankfull channel dimensions (depth, area) and the previous five-year average fluvial erosion intensity during flood seasons, with correlations degrees of greater than 0.80. Therefore, the proposed empirical relationships can be used to reproduce the adjustment tendency of the bankfull geometry in the study reach. Finally, the Jianli reach tends to be more stable in the longitudinal channel profile after the TGP operation, with the longitudinal channel slope of 4.35×10^{-5} being formed.

channel adjustment, variation in cross-sectional geometry, variation in planform geometry, Jianli reach, Three Gorges Project

doi: 10.1360/N972016-01106