J. Lake Sci.(湖泊科学),2019,**31**(5):1447-1458
DOI 10.18307/2019.0526
© 2019 by *Journal of Lake Sciences*

三峡工程运用后城陵矶—武汉河段河床调整及崩岸特点*

孙启航,夏军强**,周美蓉,邓珊珊
(武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室,武汉 430072)

摘　要:为研究近期城汉河段河床调整及崩岸特点,利用实测水沙及地形等资料,采用河段平均的方法,计算了城汉河段断面形态的调整过程,主要包括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:城汉河段平滩河宽由2003年的1710 m增加至2016年的1732 m,增幅为1.28%,平滩水深由2003年的16.47 m增加至2016年的17.95 m,增幅为9.0%;白螺矶、界牌、簰洲及武汉等河段河床调整以纵向冲深为主,但陆溪口河段河床调整横向展宽与纵向冲深同步发展;2006－2016年城汉河段多年平均崩退速率为5.5 m/a,崩岸总长19.6 km,占岸线总长的8.3%,右岸占55.3%.簰洲河段岸线崩长占城汉河段岸线崩退总长的75.9%.此外还分析了河床边界与水沙条件等因素对重点河段(簰洲河段)崩岸过程的影响,来水来沙条件占主导地位,局部区域崩岸的发生依赖于河床边界条件;建立了典型断面平滩河宽与前期水沙条件之间的经验关系,较好地反映了水沙条件变化对崩岸过程的影响.
关键词:河床调整;平滩河槽形态;崩岸特点;城汉河段;三峡工程

Characteristics of channel adjustments and bank erosion in the Chenghan reach after the Three Gorges Project operation

SUN Qihang, XIA Junqiang**, ZHOU Meirong & DENG Shanshan
(*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *P.R.China*)

Abstract: The Chenghan reach is undergoing considerable channel degradation, and significant bank retreat processes have occurred at local sites due to the operation of the Three Gorges Project (TGP). The adjustment process of cross-sectional profiles in the Chenghan reach was investigated quantitatively by adopting the reach-average method and using the measured topographic and hydrological data after the TGP operation. It mainly covers the adjustment of bankfull channel dimensions and the relationship between these bankfull variables and the previous flow-sediment conditions. These results indicate that the bankfull channel width in the Chenghan reach increased from 1710 m in 2003 to 1732 m in 2016, with an increase of 1.28%. The bankfull channel depth increased from 16.47 m in 2003 to 17.95 m in 2016, with an increase of 9.0%. The channel adjustments in the subreaches of Bailuoji, Jiepai, Jiayu, Paizhou and Wuhan were mainly characterized by an increase in bankfull depth. The channel adjustments in Luxikou subreach behaved to have an increase in both depth and width. The average annual bank-erosion rate of the Chenghan reach from 2006 to 2016 was 5.5 m/a, and the cumulative bank-erosion length of 19.6 km accounted for 8.3% of the total length of the bankline, with 55.3% of the bank-erosion regions located at the right bank. The bank-erosion regions in the Paizhou subreach accounted for 75.9% of the total length of the retreated bankline in the Chenghan reach. Various factors influencing bank retreat in the key subreach of Paizhou have been presented, and the results indicate that the sediment hydrograph is a dominant control factor, and localized bank collapse depends on channel boundary conditions. Finally, empirical relationships were developed between the section-scale bankfull width at typical section with severe bank collapses and the average fluvial erosion intensity during flood seasons in previous years. The proposed empirical relation can consider the effect of the altered flow and sediment regime on the variation in bankfull width at a typical section.
Keywords: Channel adjustments; bankfull channel geometry; bank retreat; Chenghan reach; Three Gorges Project

---

* 国家重点研发计划项目(2016YFC0402305)和国家自然科学基金项目(51725902,51579186)联合资助.2018-10-20收稿;2019-03-24收修改稿.孙启航(1996~),男,硕士研究生;E-mail:sunqihang@whu.edu.cn.
** 通信作者;E-mail:xiajq@whu.edu.cn.

河岸崩退是冲积河流河床演变过程的重要组成部分. 在我国长江中下游等河段,普遍存在崩岸现象. 三峡水库自 2003 年蓄水运用后,因上游入库沙量减少及水库拦沙作用,进入城汉河段的沙量急剧减少,整个城汉河段表现为冲淤相间且整体呈冲刷态势,局部区域崩岸时有发生. 2017 年 4 月 19 日巡查人员发现洪湖市虾子沟长江堤段发生窝崩险情,崩窝长 75 m,宽 22 m,距堤脚最近 14 m[1]. 局部河段的河床调整危及河势的稳定,影响河道防洪安全,故有必要研究近期城汉河段的河床调整及崩岸特点.

关于河床形态调整及崩岸研究方法,现有成果主要包括数学模型[2-3]、物理模型[4-5]及各类经验公式估算[6-7]、利用遥感影像分析河床演变[8]及定性分析等[9-11]. Jia 等[3]将河岸崩塌力学模式与水沙模型结合,构建了河道摆动的三维数学模型,用于模拟由非均质河岸坍塌引起的河道横向摆动过程. 虽然数学模型能够较为准确地模拟河床调整及崩岸过程,但对输入资料的内容及精度要求较高. 张幸农等[4]、余明辉等[5]通过概化模型试验分别研究了渐进坍塌型崩岸的力学机制和相同水力作用下近岸河床组成对黏性岸坡崩塌的影响规律. 但模型试验中河岸土体一般较原状土体在物理力学性质及内部结构等方面发生较大改变,故试验结果误差较大. Lawler 等[6]分析了 Swale-Ouse 河崩岸速率的沿程变化规律,建立了平均崩退速率与下游沿程距离之间的经验关系;梁志勇等[7]建立了河道展宽速率与河岸土体的起动切应力的经验关系. 这些经验方法在河床演变分析中应用较为广泛. Yang 等[8]利用遥感影像分析了 1983－2013 年下荆江河段平面形态变化,研究了葛洲坝及三峡工程建成运用后下荆江的河床演变规律. 余文畴等[9]就长江中下游水文泥沙条件对崩岸机理进行了总结,认为崩岸实质是近岸河床与水沙运动之间相互作用的结果;张幸农等[10-11]根据长江中下游有关崩岸实例,从不同的角度对崩岸的类型进行了划分,并且分析了河岸地质、河道地形、水文气象和人类活动等因素对河道崩岸的影响.

长江中游宜昌—枝城河段崩岸发生少,国内学者对荆江段河床调整及崩岸研究较多[12-13]. 城陵矶—武汉河段(简称城汉河段)河型复杂,且该河段的河床调整及崩岸直接威胁到长江经济带重要城市武汉的防洪安全,故本文选取城汉河段为研究对象. 近期在自然因素与人类活动的共同作用下,进入城汉河段的水沙条件发生显著改变,河床形态调整较为显著. 已有研究[14-15]多从宏观上定性描述城汉河段的演变规律及调整趋势,但近期显著的河床调整使该河段平面及断面形态发生较大改变,因此亟需定量研究该河段的河床形态调整及崩岸特点. 本文利用城汉河段 2003－2016 年 128 个固定断面的地形资料及 2001、2006、2016 年的水下地形图,采用 Xia 等[16]提出的河段尺度的平滩河槽形态参数计算方法,首先计算 2003－2016 年河段平均的平滩河槽形态特征参数,建立这些平滩特征参数与前期水沙条件之间的关系;其次定量确定城汉河段岸线变化及典型断面的崩岸过程;最后研究重点河段(簰洲河段)的崩岸特点,分析河床边界与水沙条件等因素对崩岸过程的影响,并建立典型崩岸断面平滩河宽与前期水沙条件之间的经验关系.

1 近期城汉河段概况

1.1 研究河段概况

城汉河段上接荆江和洞庭湖水系,流经岳阳、嘉鱼及武汉等城市,全长 235.6 km(图 1)[17]. 河段内宽窄相间,洲滩众多,按河道平面形态特征,可划分为微弯单一型、弯曲型和分汊型 3 种河型. 左岸有白螺矶、杨林矶、螺山等节点,右岸有城陵矶、道仁矶、龙头山等节点,这些节点对河势变化和河床调整起着控制作用. 根据河段地理位置、河道特性以及控制节点等因素,习惯上将城汉河段自上而下划分为白螺矶、界牌及陆溪口等河段[15]. 河段内分布的众多洲滩,使得局部区域碍航问题突出,三峡工程运用后在该河段实施了陆溪口水道、嘉鱼-燕子窝航道、界牌河段航道整治二期等整治工程[18-20]. 这些整治工程对河段的河床演变具有重要影响,基本上稳定了滩体,刷深了航槽,但对局部水流结构产生了较大影响,增加了河道崩岸发生的概率.

三峡工程运用后,城汉河段河势总体基本稳定,但河床纵向冲刷明显,局部河势发生显著变化. 研究河段内床沙组成主要为细沙;大堤岸坡以土质、砂质岸坡为主,局部地段为淤泥质岸坡;岸坡结构多变,抗冲强度不均[21]. 如图 1 所示,近期在自然因素和人类活动共同作用下,局部河段崩岸险情较为严重.

1.2 水沙条件

上游荆江段、洞庭湖及各级入流入汇是城汉河段水沙的主要来源,汛期通常从 5 月持续到 10 月[12]. 河

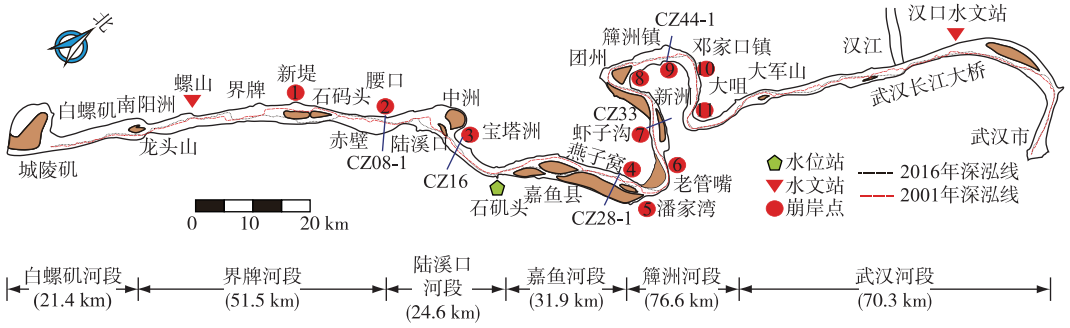


图 1 城汉河段示意图

Fig.1 Sketch of the Chenghan reach

段左岸有东荆河、汉江、沦水,右岸有陆水、金水等入汇. 可用河段进口附近的螺山水文站实测水沙数据近似代表进入城汉河段的水沙条件. 三峡工程运用后(2003－2016 年),进入城汉河段的年水量略有减少,年沙量却大幅降低. 多年平均汛期水量从蓄水前(1955－2002 年)的 4747.9 亿 m^3 降至蓄水后(2003－2016 年)的 4227.7 亿 m^3,减少幅度为 11.0%. 多年平均汛期沙量从蓄水前(1955－2002 年)的 3.512 亿 t 降至蓄水后(2003－2016 年)的 0.690 亿 t,减少幅度为 80.4%(图 2).

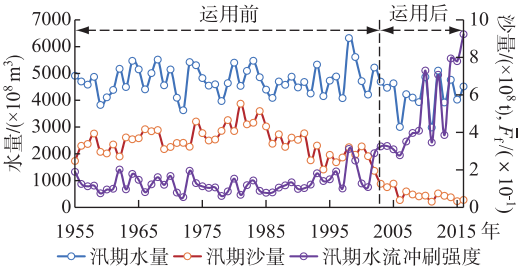


图 2 螺山站汛期水量、沙量和水流冲刷强度(1955－2016 年)

Fig.2 Temporal variations in flood-season average water volume, sediment discharge and fluvial erosion intensity at Luoshan from 1955 to 2016

近期吴保生[22]的研究成果表明,在含沙量较大的黄河上,水沙条件通常采用多年汛期平均流量及来沙系数表示. 但是在低含沙量河流上,水沙条件一般用水流冲刷强度来表示[12]. 定义汛期水流冲刷强度 $\bar{F}_f = (\bar{Q}^2/\bar{S}) / 10^8$,其中 $\bar{Q}$ 为汛期平均流量,m^3/s;$\bar{S}$ 为汛期平均悬移质含沙量,kg/m^3. 利用螺山站水沙数据计算水流冲刷强度参数,结果如图 2 所示. 三峡工程运用后,城汉河段汛期水流冲刷强度呈增大趋势,2003－2016 年增长了 183.7%. 在计算水流挟沙力时采用张瑞瑾的公式[23]:

$$S_* = k\left(\frac{U^3}{g \cdot R \cdot \omega}\right)^m \tag{1}$$

式中,S_* 为悬移质水流挟沙力,kg/m^3;U 为断面平均流速,m/s;g 为当地重力加速度,取 $g=9.81\ m/s^2$,R 为水力半径,m;ω 为代表沉速,m/s;k 和 m 为经验系数,k 取 0.07 kg/m^3,m 取 1.14[24]. 悬移质泥沙的代表沉速取 $\omega = \left(\sum_{i=1}^{N} \Delta p_i \omega_i^m\right)^{1/m}$,$\Delta p_i$ 为第 i 组含沙量的级配,ω_i 为第 i 组泥沙的沉速[25]. 非均匀悬移质泥沙共分为 0.002~0.004、0.004~0.008 及 0.008~0.016 mm 等 9 组,即 $N=9$.

计算了螺山及汉口站 2003－2016 年的汛期平均水流挟沙力,并与汛期实测悬移质含沙量进行了对比,绘出了 2003－2016 年螺山及汉口站汛期平均水流挟沙力及含沙量的变化,如图 3 所示. 定义次饱和系数为 $\xi = (S_* - S)/S$,其中 S_* 为水流挟沙力,kg/m^3;S 为悬移质含沙量,kg/m^3. 用 ξ 来表征水流的次饱和状态,近期(2013－2016 年)螺山和汉口站 ξ 的平均值分别为 1.65 和 0.39,因此城汉河段还处在次饱和状态. 三峡工程运用后(2003－2016 年),螺山站汛期平均水流挟沙力变化不大,实测汛期平均悬移质含沙量在逐渐减小,汉口站汛期平均水流挟沙力由于床沙粗化的原因与实测汛期平均悬移质含沙量基本上同步减小,因此螺山站次饱和程度逐渐增大,汉口站变化不大. 计算结果显示城汉河段悬移质在沿程恢复,但水沙不平衡的状况依然存在,次饱和程度仍较高. 由此可知,城汉河段近期整体上仍呈持续冲刷态势.

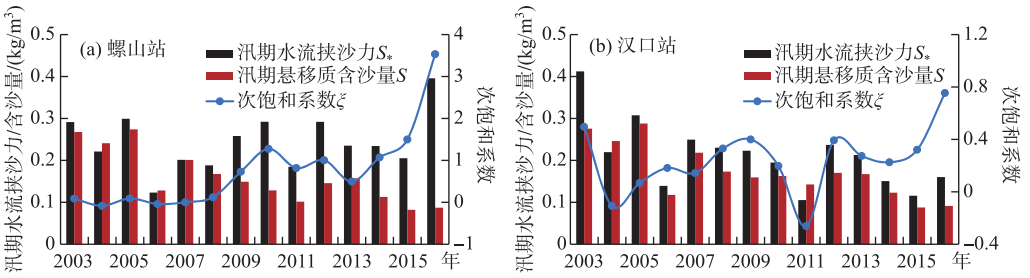


图 3 螺山及汉口站 2003－2016 年汛期水流挟沙力与含沙量变化

Fig.3 Temporal variations in flood-season average sediment carrying capacity and concentration at Luoshan and Hankou from 2003 to 2016

2 近期城汉河段河床调整特点

2.1 冲淤过程

近期三峡水库下泄沙量大幅度减少，城汉河段整体呈冲刷态势. 2003－2016 年城汉河段枯水、基本与平滩河槽的累计冲刷量分别为 4.451 亿、4.708 亿和 4.684 亿 m^3（图 4）. 枯水、基本及平滩河槽分别为宜昌站 5000、10000 及 30000 m^3/s 流量对应水面线以下的河槽[26]. 枯水河槽冲刷量占平滩河槽冲刷量的 95.0%，因此可以认为冲刷部位主要集中在枯水河槽. 图 3b 显示 2003、2004、2008 与 2009 年枯水河槽年内冲淤量占平滩河槽冲淤量的比例不足 50%，冲淤部位主要集中在枯水河槽外，三峡工程 2003 年蓄水运用，2008 年汛末进入试验性蓄水阶段，运用及试验蓄水后，荆江河段枯水河槽冲刷量突然增大，进入城汉河段的水流次饱和程度较小，枯水河槽的冲淤量较小，因此 2003、2004 及 2009 年枯水河槽占平滩河槽冲淤量的比例偏小，2008 年城汉河段枯水河槽表现为微弱冲刷，平滩河槽表现为淤积，这与 2003－2008 年冲刷强度不断减弱有关；2005 年等其余年份枯水河槽年内冲淤量占平滩河槽冲淤量的比例均达 70% 以上，年内冲淤变化主要表现在枯水河槽. 荆江河段的悬移质含沙量在三峡工程运用后呈减小趋势，2014 年后减小速度放缓，2014 年监利站全年平均含沙量减至 0.15 kg/m^3，因而进入城汉河段的悬移质含沙量较小，水流不饱和程度较大，冲刷幅度明显增加（图 3a）. 2013－2016 年研究河段平滩河槽累计冲刷量为 3.902 亿 m^3，占蓄水后总冲刷量的 83.3%.

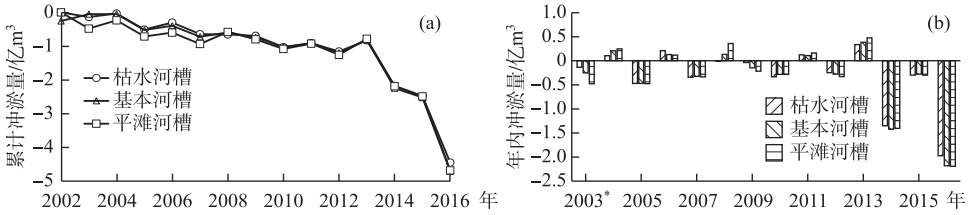


图 4 2003－2016 年城汉河段累计冲淤过程

（正值为淤积，负值为冲刷；2003* 为 2001 年 10 月－2003 年 10 月数据之和）

Fig.4 Cumulative channel evolution volume in the Chenghan reach from 2003 to 2016

为了分析冲淤过程与来水来沙条件之间的关系，考虑到河床形态调整存在滞后响应[22]，本研究采用前 n 年汛期平均水流冲刷强度 $\bar{F}_{nf}$ 表示前期水沙条件，$\bar{F}_{nf}$ 的表达式为：

$$\bar{F}_{nf} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\bar{F}_{fi} \tag{2}$$

式中，$\bar{F}_{fi}$ 为第 i 年的平均水流冲刷强度. 研究表明[12] 冲积河流平滩河槽形态与前期 5 年汛期平均的水流冲

刷强度之间有较好的经验关系,又因河床冲淤的直观反映就是河流平面形态的变化,因此推测城汉河段冲淤量与前 5 年汛期平均水流冲刷强度有较好的经验关系. 从图 5 可知,城汉河段累计冲淤量与前 5 年汛期平均水流冲刷强度的关系较好,呈较为明显的对数关系. 由此可见,三峡工程运用引起的水沙条件改变对城汉河段的冲淤过程产生了较为显著的影响.

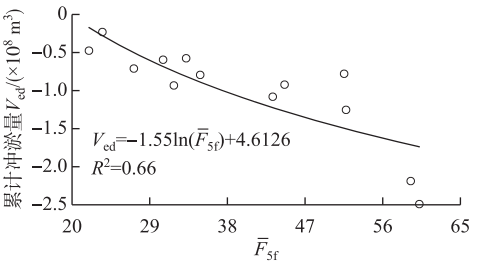


图 5 城汉河段累计冲淤量与前 5 年汛期平均水流冲刷强度的关系

Fig.5 Relationship between cumulative channel evolution volume and the previous five-year average fluvial erosion intensity during flood seasons in the Chenghan reach

2.2 横断面形态变化

城汉河段横断面形态调整与来水来沙条件、河道形态及河床边界条件等因素密切相关. 近期因三峡水库清水下泄,城汉河段整体呈冲刷态势,且各分河段平滩河槽形态发生了较大的调整. 本文采用 Xia 等[16]提出的基于对数转换的几何平均与断面间距加权平均结合的方法,结合 2003－2016 年的断面实测资料,计算了河段尺度的平滩河槽形态参数,得到了城汉河段及各分河段平滩河宽与水深随时间的变化过程,如图 6 所示. 三峡工程运用以来,城汉河段平滩河宽($\overline{W}_{bf}$)、水深($\overline{H}_{bf}$)及面积($\overline{A}_{bf}$)呈增加趋势(图 6). $\overline{W}_{bf}$ 由 2003 年的 1710 m 增加至 2016 年的 1732 m,增幅为 1.28%;$\overline{H}_{bf}$ 由 2003 年的16.47 m 增加至 2016 年的 17.95 m,增幅为 9.0%;$\overline{A}_{bf}$ 由 2003 年的 28312 m^{2}增加至 2016 年的 31087 m^2,增幅为 9.8%. 各分河段平滩河宽与水深变化如表 1 所示. 其中陆溪口河段平滩河槽展宽幅度达到 2.6%,大于城汉河段平均值 1.28%. 白螺矶、界牌及武汉河段平滩河槽深度增幅大于城汉河段平均值,尤其是白螺矶河段增幅达 11.0%. 分析表 1 中数据可知,三峡工程运用以来(2003－2016 年)白螺矶、界牌、嘉鱼、簰洲及武汉河段河床调整以纵向冲深为主;但陆溪口河段河床调整横向展宽与纵向冲深同步发展.

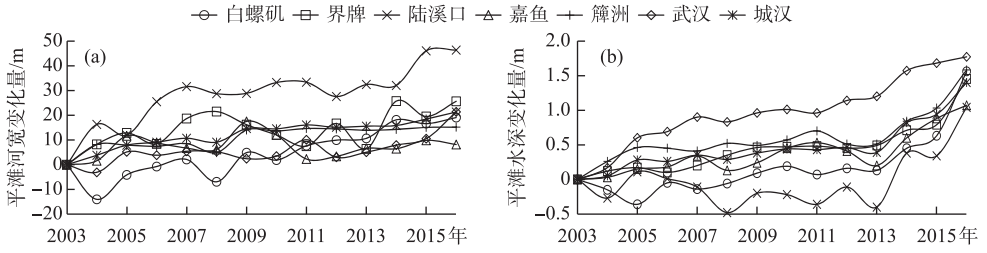


图 6 城汉河段平滩河宽与水深变化量(与 2003 年相比)

Fig.6 Temporal changes of bankfull channel width and depth in the Chenghan reach (compared with 2003)

表 1 城汉河段 2003－2016 年平滩河宽与水深变化

Tab.1 Variations in bankfull channel width and depth in the Chenghan reach from 2003 to 2016

河段名称	$\overline{W}_{bf}$ 变化范围/m	$\overline{W}_{bf}$ 变化率/%	$\overline{H}_{bf}$ 变化范围/m	$\overline{H}_{bf}$ 变化率/%
白螺矶	2052~2071	0.9	14.1~15.7	11.0
界牌	1852~1877	1.4	15.6~17.1	9.3
陆溪口	1781~1827	2.6	15.9~16.9	6.6
嘉鱼	1858~1867	0.44	16.2~17.3	6.6
簰洲	1415~1430	1.1	17.5~19.1	9.0
武汉	1803~1825	1.2	16.8~18.5	10.6
城汉	1711~1732	1.28	16.6~18.0	9.0

为研究河床调整与上游来水来沙条件的关系,分别点绘出城汉河段平滩河宽、水深和面积与螺山站前 5

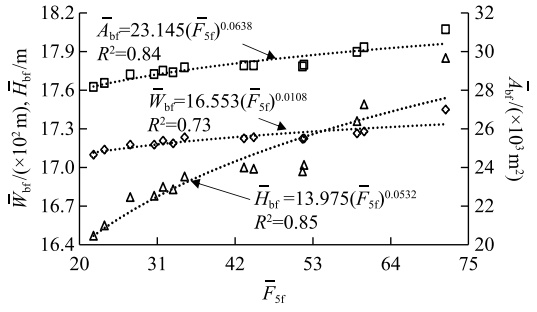


图 7 城汉河段平滩河槽形态参数与前 5 年汛期平均水流冲刷强度的关系

Fig.7 Relationship between the bankfull channel geometry and the previous five-year average fluvial erosion intensity during flood seasons

年汛期平均水流冲刷强度之间的关系,相关系数均达到 0.7 以上(图 7). 由此表明,城汉河段河床对三峡工程运用后的新水沙条件做出了适应性调整. 此外河道整治、非法采砂、堤边取土及两岸植被砍伐等人类活动对河床调整也有一定的影响.

3 城汉河段崩岸过程及特点

近期城汉河段河床冲淤相间,但整体呈持续冲刷态势,导致局部河段发生严重崩岸. 为研究城汉河段的崩岸特点,本研究基于 2001、2006 及 2016 年实测水下地形图,确定了这些年份中的水边线位置. 相应时间段内螺山站的平均水位分别为 25.5、20.7 和 20.4 m. 因 2001 与 2016 年螺山站平均水位相差 4.8 m,故用水边线位置不能准确判断实际崩岸情况. 2006 与 2016 年螺山站平均水位相差仅 0.3 m,故可用水边线的位置变化大致确定城汉河段的岸线崩退情况. 表 2 给出了 2006－2016 年水下地形图中岸线的对比结果. 城汉河段近期(2006－2016 年)崩岸总长度达19.6 km,占岸线总长的 8.3%,多年平均崩退速率为 5.5 m/a,其中约有 55.3%的崩岸位置分布在河道右岸,规模较大的崩岸中绝大部分为条崩,少部分为窝崩,洗崩规模较小但分布较广、发生频率较高[10,21]. 2003－2016 年历年汛后 118 个断面的地形资料表明:CZ03-1、CZ05、CZ28-1、CZ44-1 等断面存在较为明显的崩岸现象,累计崩宽均达到 50 m 以上. 姚仕明等[21]不完全统计成果表明,2003－2005 年城汉河段崩岸长度共计2.9 km,且主要集中在界牌河段. 因此相对 2006－2016 期间的崩岸范围,2006 年前城汉河段的崩岸程度相对较弱,这也与该时段内河床冲刷强度相对较小有关.

表 2 城汉河段崩岸区域统计结果(2006－2016 年)

Tab.2 Statistics of the riverbank collapse sites in the Chenghan reach from 2006 to 2016

河段名称	序号	崩岸位置	岸别	累计崩退长度/m	累计崩退宽度/m	多年平均崩退速率/(m/a)
界牌河段	1	新堤	左岸	897	73.5	7.35
	2	腰口	左岸	275	47.7	4.77
陆溪口河段	3	宝塔洲	左岸	3542	112.0	11.2
簰洲河段	4	燕子窝	左岸	1715	58.5	5.85
	5	潘家湾	右岸	4817	26.7	2.67
	6	老官嘴	右岸	2621	42.2	4.24
	7	虾子沟	左岸	554	81.7	8.17
	8	团州	右岸	1443	40.6	4.06
	9	新洲	右岸	1950	60.3	6.03
	10	邓家口镇	左岸	251	26.9	2.69
	11	大咀	左岸	1502	25.3	2.53
合计				19568		

3.1 城汉河段崩岸区域分布

统计数据表明,城汉河段崩岸主要分布在宝塔洲、燕子窝、潘家湾、邓家口镇及大咀等区域(图 1). 白螺矶河段左岸上部主要分布为黏土、亚黏土和亚砂土,下部为沙层,局部夹淤泥或砾石[15]. 在水流持续冲刷作用下,下部沙层易被冲走,导致岸坡变陡,引发相应位置的崩岸. 界牌河段河床组成以中细沙为主,床沙中值粒径范围为 0.16~0.22 mm,可动性强[27]. 深泓出南阳洲右汊后遭节点龙头山的节制,改变方向,沿左岸下

行,同时造成对左岸的顶冲与持续冲刷. 新堤附近 CZ08-1 断面地形图显示 2003－2016 年深泓点向左摆 1099 m,高程由 3.7 m 冲深至-3.7 m. 据不完全统计该分河段 2003－2005 年崩岸长度为 1.9 km,主要分布在新堤、石码头等局部区域. 2006－2016 年界牌河段崩岸长度约 1.2 km,多年平均崩退速率为 6.7 m/a. 陆溪口河段河床中值粒径为 0.11~0.23 mm,左岸由河流松散冲积物组成,右岸有赤壁山等天然控制性节点[28]. 深泓在宝塔洲附近紧贴左岸,造成对滩面的持续冲刷,断面地形图显示冲刷深度达 11 m. 该分河段 2006－2016 年约有 3.5 km 的岸线发生崩退,多年平均崩退速率达 11.2 m/a. 簰洲河段内有簰洲弯道,其弯曲系数达 12 以上[15]. 深泓沿燕子窝下行顶冲潘家湾,出急弯后向左摆动紧贴虾子沟岸段,造成对河岸的持续冲刷. 同时,虾子沟区域为非法采砂高发区,不合理的采砂会使局部岸坡变陡,增加岸坡失稳破坏的可能性. 因此,燕子窝、潘家湾及虾子沟等局部区域为重要崩岸险工段. 2017 年 4 月,长江干堤虾子沟堤段(桩号 413+250~413+325)发生崩岸险情[1]. 邓家口镇河段处于急弯段凹岸,并且岸坡为土质结构,易起动,抗冲性差[29]. 在水流的顶冲下,2003－2016 年 CZ44-1 断面累计崩退宽度 66 m. 从河床演变的角度来看,崩岸的严重程度与崩岸宽度及平滩河宽密切相关,崩岸宽度越大,平滩河宽越小,崩岸对河床造成的影响越大,崩岸越严重. 为研究河段崩岸的严重程度,此处定义:

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta B_i}{\bar{B}_{fi}} \right) / n \tag{3}$$

式中,η 为崩岸严重程度参数;n 为河段内的统计断面数;ΔB_i 为第 i 个断面在研究时段内的崩岸宽度,m;$\bar{B}_{fi}$ 为第 i 个断面在研究时段内平滩河宽平均值,m. 利用城汉河段 2003 和 2016 年 128 个断面的地形数据,通过计算得到,白螺矶、界牌、陆溪口、嘉鱼及武汉段的崩岸严重参数分别为 0.0082、0.0113、0.0246、0.0046、0.0120 和 0.0061.

3.2 城汉河段典型断面崩退过程

为了更直观地反映三峡工程运用后典型断面河岸的崩退过程,图 8 给出了近期城汉河段内 CZ03-1、CZ16 等 4 个典型条崩断面的形态变化过程. CZ03-1 断面位于白螺矶下段,断面形态调整以左岸崩退为主(图 8a),2003－2016 年崩退总宽度为 60 m. 由图 8a 可知 2010－2013 年崩岸强度较大,多年平均崩退速率达 20 m/a,2011 年左岸崩退约 54 m. CZ16 断面位于中洲下段,深泓紧贴左岸,滩面持续冲刷,如图 8b 所示,13 年内近岸河床冲深下切 12.9 m,河岸崩退宽度 64 m,多年平均崩退速率 4.9 m/a. CZ28-1 断面位于燕子窝附近,如图 8c 所示,该断面 2003－2016 年左岸近岸处冲深下切 2.5 m,河岸崩退宽度为 24 m,多年平均崩退速率达 1.8 m/a. 2006 年 2 月－2008 年 4 月,航道部门对燕子窝新滩进行了固定,保持了其滩头的稳定,限制了右汊的冲刷发展[19]. 2016 年 11 月－2017 年 4 月,燕子窝处近岸河床最低点下切 5.4 m,岸坡变陡,且该河段为沙基岸段,地质条件差,抗冲能力弱,最终于 2017 年 4 月发生窝崩险情,严重危及洪湖长江干堤的安全[1]. CZ44-1 断面位于团州下游 10 km 处,如图 8d 所示,虽有抛石护岸,但近期该断面凸岸仍不断崩退,2003－2016 年崩退总宽度达 66 m,多年平均崩退速率为 5.1 m/a,近岸处河床下切约 4.7 m.

4 重点河段崩岸影响因素分析

上述统计数据表明,城汉河段的崩岸险工段主要集中在簰洲河段. 簰洲河段上起潘家湾,下至纱帽山,全长 76.6 km,为弯曲型河段. 已有研究成果表明[21,30],2003－2005 年簰洲河段局部地区护岸工程水毁严重,崩岸地区主要分布在胡家湾、新沟、邓家口镇等地. 根据 2006－2016 年水下地形图对比结果显示,该河段 10 年间崩岸总长度 14.9 km,占岸线总长比例为 19.4%,绝大部分崩岸的类型为条崩,少部分为窝崩[21]. 该分河段崩岸总长度占城汉河段崩岸总长的 75.9%,多年平均崩退速率为 4.1 m/a. 因此该河段崩岸问题较为突出、严重且具有代表性. 故本研究将重点分析簰洲河段崩岸的影响因素.

4.1 河床边界条件

河床边界条件主要包括河岸土体组成与分布及河湾形态等[13]. 考虑到簰洲河段为典型的弯曲型河段,且河岸土体特性及深泓贴岸对崩岸的影响较大,本文将着重分析河岸土体组成、河湾形态及深泓贴岸等因素对崩岸的影响.

4.1.1 河岸土体组成的影响　河岸土体组成与分布决定了河岸的抗冲性,而河岸的抗冲性直接影响着河道崩

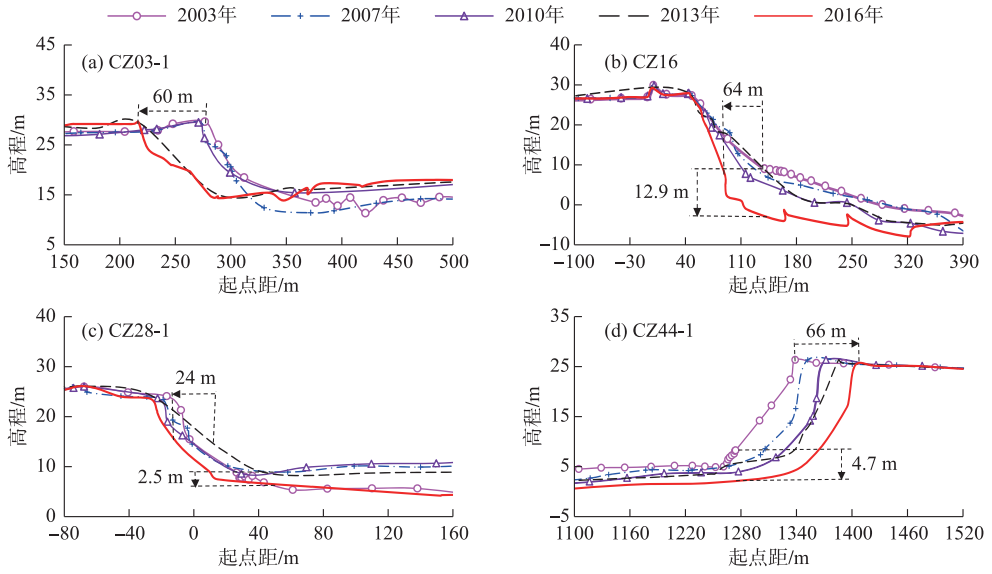


图 8 城汉河段典型断面形态变化过程

Fig.8 Temporal changes of lateral profiles at four typical sections in the Chenghan reach

岸[31]. 簰洲河段的河岸土体组成主要为黏土、亚黏土、亚砂土和粉细砂土及由不同物质所组成的互层和夹层结构. 河床组成均为细沙，2006 年汛后床沙中值粒径为 0.168 mm，抗冲性较弱[15]. 洪湖长江干堤燕子窝崩岸发生的堤段，上部为壤土、砂壤土，厚 6~8 m，下部为粉细砂层. 壤土、砂壤土及砂土，土粒比重分别为2.72、2.75 和 2.69，凝聚力 C 分别为 20、15 及 0 kPa[32]. 壤土、砂壤土内部因有凝聚力的存在，起动流速一般大于砂土[12]. 2017 年 4 月处于汛前涨水期，流量逐渐增大，近岸流速明显增加，下部砂土层处于冲刷状态；上部粘性土层的悬空宽度逐渐增大，到达稳定极限后，土体易坍落形成窝崩险情.

4.1.2 河湾形态的影响　在相同河岸土体条件下，弯道段较顺直段的崩岸速率大 1 倍以上. 如图 9a 所示，4 个弯道段深泓线与岸线的夹角分别为 43.6°、56.5°、64.8° 和 25.8°. 岳红艳等[33]发现纵向水流的顶冲角与崩岸的发生有着密切的关系. 纵向水流顶冲角越大，水流对河岸的作用力越大，水流对河岸土体所做的功越大，可动河岸土体发生崩岸的强度也就越大. 因此在弯道段多，顶冲角大，水流动力作用较强的情况下，簰洲河段崩岸分布较多，远高于城汉河段的平均水平.

4.1.3 深泓贴岸的影响　河道深泓点是主槽内床面的最深点，与断面最大流速处基本相当. 从江西省长江岸带的统计资料来看，各崩岸段深泓离岸距离与平均河宽之比一般为 0.03~0.07. 一些强烈的崩岸段，深泓离岸距离与河宽之比都要小于 0.1[34]. 图 9a 显示，簰洲河段 8 处崩岸险工段，有 5 处位于深泓近岸段，深泓距岸线平均距离约 175 m. 燕子窝段由于燕子窝心滩和复兴洲的存在，致使该河段过水断面面积减小，水流流速增大，对河岸的冲刷作用增强，引发左岸相应位置的崩岸. 如图 10 所示，虾子沟段 CZ33 断面自 2008 年以来深泓贴岸，深泓高程由−1.5 m 下切至 2016 年汛后的−7.8 m，且向左岸摆动约 50 m[32]，造成岸坡变陡. 下游距该断面 0.1 km 处最终于 2017 年 4 月发生窝崩. 潘家湾段、老管嘴段、新洲段、邓家口镇河段主要因深泓贴岸造成崩岸. 因为深泓贴岸处单宽流量较大，对河岸的冲刷作用较强，特别是在弯道段，极易形成大流速的竖轴环流与涡旋，对河岸造成强烈的冲刷，形成大范围崩岸[35-36].

4.2 水沙条件

在冲积河流河床演变过程中水沙条件起着至关重要的作用. 三峡工程运用后（2003－2016 年）簰洲河段汛期平均含沙量处于不断减少趋势，河道水体处于次饱和状态，持续冲刷近岸及河床. 同时河道水位突变也是促使崩岸不断发生的水流动力因素. 故此处主要探讨来水来沙条件与河道水位突降对簰洲河段崩岸过程的影响.

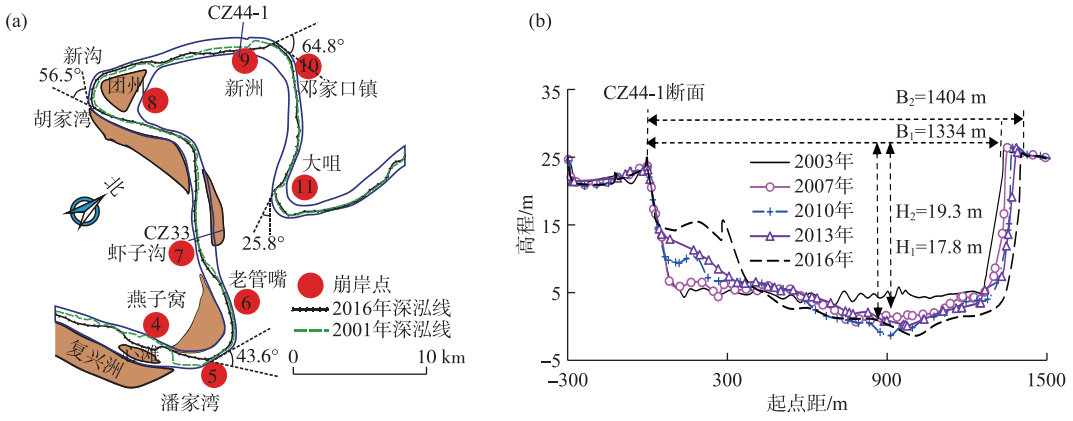


图 9 簰洲河段河势及 CZ44-1 断面形态调整

Fig.9 Sketch of the Paizhou subreach and adjustment of cross-sectional profile at CZ44-1

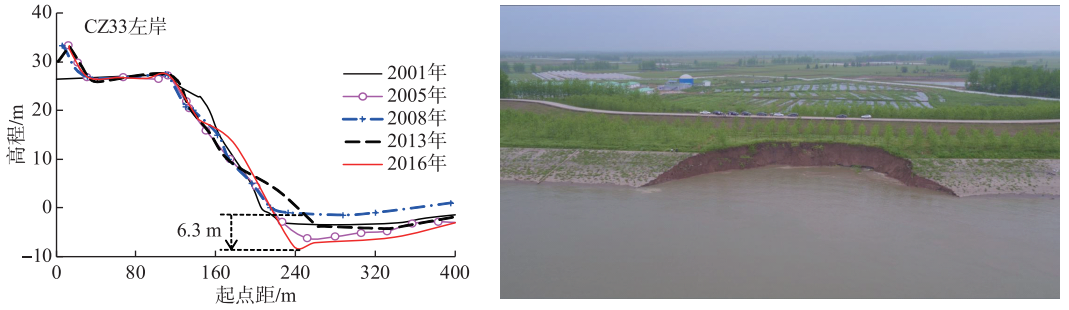


图 10 虾子沟断面变化过程及崩岸形态

Fig.10 Temporal variations of cross-sectional profile at CZ33 and the photo of arc failure at Xiazigou section

4.2.1 来水来沙条件　如图 9b 所示,位于新洲附近的 CZ44-1 断面,河岸及河床在低含沙水流的长期冲刷下不断崩退、下切. 2003－2016 年,该断面平滩河宽从 1334 m 增加至 1404 m,主要表现为右侧河岸崩退;平滩水深从 17.8 m 增加至 19.3 m;平滩面积从 23702 m^2 增加至 27146 m^2,增幅达 14.5%. 为研究来水来沙条件对簰洲河段崩岸的影响,以 CZ44-1 断面为例,建立典型断面 W_{bf} 与 $\bar{F}_{5f}$ 之间的经验关系,选用邻近水文站的实测水沙数据近似代替该断面的水文资料. 本研究选取螺山站的水文资料作为该断面的水沙条件. 从图 11 可以看出,CZ44-1 断面 W_{bf} 与 $\bar{F}_{5f}$ 之间的相关系数高于 0.9,可见由三峡工程运用引起的水沙条件改变对典型断面平滩河宽的调整有较为显著的影响.

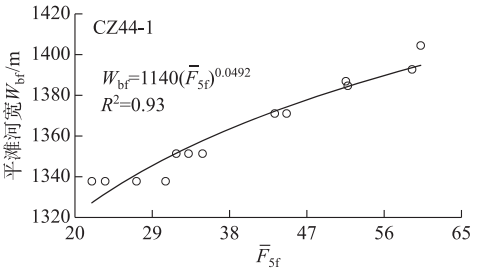


图 11 CZ44-1 断面平滩河宽与前 5 年汛期平均水流冲刷强度的关系

Fig.11 Relationship between the bankfull width and the previous five-year average fluvial erosion intensity during flood seasons at CZ44-1 section

4.2.2 河道水位突降　河道退水过程过快会对河道岸坡的稳定产生不利影响. 簰洲湾河段岸滩崩塌记录资料显示,该河段崩岸发生的时间主要在汛后 11 月至次年 3 月[21]. 三峡工程运用后(2003－2016 年)螺山站平均涨水和退水速率分别为 0.0849 和 0.0817 m/d. 虾子沟崩岸段上部壤土、砂壤土的渗透系数为 0.0053~0.0236 m/d,下部粉细砂层渗透系数为 0.2868 m/d,因此粉

细砂层为主要的水力通道[32]. 在洪水期,河道水体作用于河岸的侧向水压力较大,且河道水补给地下水,渗透压力方向为自河道向河岸,对河岸崩塌有抑制作用. 在退水期,一方面河道水位的快速下降使河道水体作用于河岸的侧向水压力快速减小,另一方面地下水反向补给河道水,渗透水压力方向自河岸向河道,因为上部壤土及砂壤土含水率较高,渗透性较差,所以一部分孔隙水较短时间内来不及排出,转而形成孔隙水压力降低了河道河岸土体的粘聚力,另一部分孔隙水将下部的粉细砂层作为通道,在排出土体的过程中对粉细砂颗粒产生作用力,再加之水流冲刷,导致下部粉细砂被逐渐掏刷,上部壤土及砂壤土坍落[37]. 因此较短时间的河道退水过程会使作用于岸坡土体的力的方向发生改变,土体稳定性降低,极易引发崩岸险情.

5 结论

利用实测水沙及地形资料,系统分析了城汉河段河床形态调整及崩岸特点,得到如下结论:

1)三峡工程运用后,城汉河段年内冲淤变化主要集中在枯水河槽,平滩河宽与水深呈增加趋势. 白螺矶、簰洲及武汉等河段河床调整以纵向冲深为主. 但陆溪口河段河床调整横向展宽与纵向冲深同时发展. 城汉河段的平滩特征参数与前期水沙条件密切相关.

2)城汉河段崩岸主要分布在新淤洲及燕子窝等局部区域. 2006－2016 年城汉河段多年平均崩退速率为 5.5 m/a,崩岸总长 19.6 km,占岸线总长的 8.3%,其中右岸占 55.3%,簰洲河段岸线崩长占城汉河段岸线崩退总长的 75.9%.

3)簰洲河段 2006－2016 年崩岸总长度 14.9 km,占岸线总长比例为 19.4%,多年平均崩退速率为 4.1 m/a. 来水来沙条件占主导地位,局部区域崩岸的发生依赖于河床边界条件,建立了典型崩岸断面平滩河宽与前期水沙条件之间的经验关系,较好地反映了水沙条件变化对崩岸过程的影响.

6 参考文献

[1] Chen M, Shen HZ, Feng Y *et al*. Recent Emergency treatment in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2017, **38**(11): 15-18, 24. [陈敏, 沈华中, 冯源等. 长江中下游河道近年崩岸应急整治. 水利水电快报,2017, **38**(11): 15-18, 24.]

[2] Qu WQ, Yan LY, Zhang XF *et al*. Research on numerical model of river bank failure at Jianli reach of middle reaches of Yangtze River. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, **42**(2): 158-162, 177. [屈文谦, 闫立艳, 张小峰等. 长江中游监利河段崩岸数值模拟. 武汉大学学报: 工学版, 2009, **42**(2): 158-162, 177.]

[3] Jia D, Shao X, Wang H *et al*. Three-dimensional modeling of bank erosion and morphological changes in the Shishou bend of the middle Yangtze River. *Advances in Water Resources*, 2010, **33**(3): 348-360.

[4] Zhang XN, Chen CY, Jia D *et al*. Mechanisms of gradual riverbank collapses and simulation study. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(2): 246-252. [张幸农, 陈长英, 假冬冬等. 渐进坍塌型崩岸的力学机制及模拟. 水科学进展, 2014, **25**(2): 246-252.]

[5] Yu MH, Chen X, Wei HY *et al*. Experimental of the influence of different near-bank riverbed compositions on bank failure. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(2): 176-185. [余明辉, 陈曦, 魏红艳等. 不同近岸河床组成情况下岸坡崩塌试验. 水科学进展, 2016, **27**(2): 176-185.]

[6] Lawler DM, Grove JR, Couperthwaite JS *et al*. Downstream change in river bank erosion rates in the Swale-Ouse system, northern England. *Hydrological Processes*, 1999, **13**(7): 977-992.

[7] Liang ZY, Yin XL. Preliminary mathematical modeling for the changes of lateral profiles in alluvial river. *Journal of Sediment Research*, 1991, (4): 76-81. [梁志勇, 尹学良. 冲积河流河床横向变形的初步数学模拟. 泥沙研究, 1991, (4): 76-81.]

[8] Yang C, Cai XB, Wang XL *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.

[9] Yu WC, Yue HY. Water flow and sediment movement conditions in the mechanism of bank collapse in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Yangtze River*, 2008, (3): 64-66, 95. [余文畴, 岳红艳. 长江中下游崩岸机理中的水流泥沙运动条件. 人民长江, 2008, (3): 64-66, 95.]

[10] Zhang XN, Jiang CF, Chen CY *et al*. Types and features of riverbank collapse. *Advances in Science and Technology of Wa-*

ter Resources, 2008, (5): 66-70. [张幸农, 蒋传丰, 陈长英等. 江河崩岸的类型与特征. 水利水电科技进展, 2008, (5): 66-70.]

[11] Zhang XN, Jiang CF, Chen CY *et al*. Influencing factors for bank collapse in fluvial rivers. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2009, **37**(1): 36-40. [张幸农, 蒋传丰, 陈长英等. 江河崩岸的影响因素分析. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, **37**(1): 36-40.]

[12] Xia JQ, Zhong QL eds. Erosions mechanisms and numerical simulation of composite riverbanks in Jingjiang Reach. Beijing: Science Press, 2015: 14, 23, 67-71. [夏军强, 宗全利. 长江荆江段崩岸机理及其数值模拟. 科学出版社, 2015: 14, 23, 23-38, 67-71.]

[13] Xia JQ, Lin FF, Zhou MR *et al*. Bank retreat processes and characteristics in the Jingjiang Reach after the Three Gorges Project operation. *Advances in Water Science*, 2017, **28**(4): 543-552. [夏军强, 林芬芬, 周美蓉等. 三峡工程运用后荆江段崩岸过程及特点. 水科学进展, 2017, **28**(4): 543-552.]

[14] Liu L, Huang CT, Li M *et al*. Periodic evolution mechanism of staggered beach in typical straight reach of the middle Yangtze River. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2014, **22**(3): 445-456. [刘林, 黄成涛, 李明等. 长江中游典型顺直河段交错边滩复归性演变机理. 应用基础与工程科学学报, 2014, **22**(3): 445-456.]

[15] Cao GJ, Wang J eds. Measurements and studies of hydrological and sediment data in the Three Gorges Project. Beijing: Science Press, 2015: 870-887. [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: 870-887.]

[16] Xia JQ, Li XJ, Li T *et al*. Response of reach-scale bankfull channel geometry to the altered flow and sediment regime in the lower Yellow River. *Geomorphology*, 2014: 255-265.

[17] Luo WH, Yang LQ, Xu Y. Analysis of sediment particle size changes in the Chenghan reach after the Three Gorges Project operation. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2006, (21): 25-27. [罗文辉, 阳立群, 许毅.三峡蓄水后城汉河段泥沙粒径变化分析. 水利水电快报, 2006, (21): 25-27.]

[18] Hu XQ. Goal Adjustment for Luxikou waterway regulation in the Yangtze River. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2011, **30**(6): 1388-1391, 1428. [胡小庆. 长江中游陆溪口水道航道整治目标调整分析. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011, **30**(6): 1388-1391, 1428.]

[19] Li D, Yuan DQ, Geng, JL. Effect analysis of Jiayu-Yanziwo section channel regulation project in the middle reach of the Yangtze River. *Port & Waterway Engineering*, 2013, (9): 89-94. [李冬, 袁达全, 耿嘉良. 长江中游嘉鱼—燕子窝河段航道整治工程效果分析. 水运工程, 2013, (9): 89-94.]

[20] Liu WL, Li WS, Zhu YD *et al*. Effect analysis of regulation project of Jiepai reach in middle Yangtze River. *Journal of Waterway and Harbor*, 2013, **34**(3): 232-238. [刘万利, 李旺生, 朱玉德等. 长江中游界牌河段已建航道整治工程效果分析. 水道港口, 2013, **34**(3): 232-238.]

[21] Yao SM, Yue HY, He GS *et al* eds. Erosions mechanisms and comprehensive treatment technology of composite riverbanks in the middle reaches of Yangtze River. Beijing: Science Press, 2016: 46-50. [姚仕明, 岳红艳, 何广水等. 长江中游河道崩岸机理与综合治理技术. 北京: 科学出版社, 2016: 46-50.]

[22] Wu BS. Delayed response model for fluvial processes of alluvial rivers— Ⅰ model development. *Journal of Sediment Research*, 2008, (6): 1-7. [吴保生. 冲积河流河床演变的滞后响应模型—— Ⅰ 模型建立. 泥沙研究, 2008, (6): 1-7.]

[23] Zhang RJ ed. River sediment dynamics. Beijing: Water Resources and Electric Power Press,1989. [张瑞瑾. 河流泥沙动力学. 北京: 水利电力出版社, 1989.]

[24] Gao YH, Fan BL, Hou WG *et al*. Application of different verification methods for sediment carrying capacity formulae in middle and lower Yangtze River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, **26**(2): 14-17. [高幼华, 范北林, 侯卫国等. 不同判别方法在长江水流挟沙力公式检验中的应用. 长江科学院院报, 2009, **26**(2): 14-17.]

[25] He MM, Han QW. Concepts about grain size distributions of carrying capacity and effective bed material. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1989, (3): 17-26. [何明民, 韩其为. 挟沙能力级配及有效床沙级配的概念. 水利学报, 1989, (3): 17-26.]

[26] Bureau of hydrology, Yangtze River conservancy commission. Analysis of water and sediment characteristics, reservoir siltation and downstream river channel erosion of the Three Gorges Reservoir in 2016. Wuhan: Bureau of Hydrology, Yangtze River Conservancy Commission, 2016: 227. [长江水利委员会水文局. 2016 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. 武汉：长江水利委员会水文局，2016：227.］

［27］ Chen L，Huang J，Xu M *et al*. An analysis of factors affecting the evolution of shoals at the head of the central bar of Jiepai Reach in the Middle Yangtze River. *China Rural Water and Hydropower*，2015，(6)：25-28.［陈立，黄杰，徐敏等. 影响界牌河段江心洲洲头低滩演变的因素分析. 中国农村水利水电，2015，(6)：25-28.］

［28］ Chen SP，Li YT，Zhu LL *et al*. Research on river evolution mechanism of Luxikou Reach in Middle Yangtze River. *Journal of Sediment Research*，2013，(4)：74-80.［陈尚坡，李义天，朱玲玲等. 长江中游陆溪口水道河床演变机理研究. 泥沙研究，2013，(4)：74-80.］

［29］ He J，Liang C，Xiao P *et al*. Main affected factors and stability evaluation of bank slope from Paizhouwan to Wuxue in the middle of Yangtze River. *Geology and Mineral Resources of South China*，2017，**33**(2)：187-192.［何军，梁川，肖攀等. 长江中游簰洲湾-武穴段岸坡稳定性评价. 华南地质与矿产，2017，**33**(2)：187-192.］

［30］ Chen H，Wang ZG. Operation and effect of bank revetments of hidden works in major levees of the Yangtze River. *China Water Resources*，2006，(16)：34-35，37.［成浩，王造根. 长江重要堤防隐蔽工程护岸工程运行状况和效果分析. 中国水利，2006，(16)：34-35，37.］

［31］ Yu WC. River Boundary conditions of mechanism of bank failure in middle and lower reaches of Changjiang River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*，2008，(1)：8-11.［余文畴. 长江中下游河道崩岸机理中的河床边界条件. 长江科学院院报，2008，(1)：8-11.］

［32］ Changjiang institute of survey and design in Jingzhou. Emergency rectification plan for the bank erosion at Xiazigou site of the embankment for Yangtze River in 2017. Jingzhou：Changjiang institute of survey and design in Jingzhou，2017.［荆州市长江勘察设计院. 2017 年洪湖长江干堤燕窝虾子沟堤段崩岸险情应急整险方案. 荆州：荆州市长江勘察设计院，2017.］

［33］ Yue HY，Yu WC. Erosions mechanisms of composite riverbanks in Yangtze River. *Yangtze River*，2002，(8)：20-22.［岳红艳，余文畴. 长江河道崩岸机理. 人民长江，2002，(8)：20-22.］

［34］ Ma YL，Mei LH，Liu YH. Bank-collapse and its influence factors along the Yangtze River in Jiangxi section. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*，2003，(3)：64-68.［马逸麟，梅丽辉，刘益辉. 江西省长江岸带崩塌及影响因素分析. 中国地质灾害与防治学报，2003，(3)：64-68.］

［35］ Xia XH，Lu CX. Research on disaster and regulation measures of Ω-caving bank at river channel. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*，2001，(6)：11-14.［夏细禾，路彩霞. 河岸窝崩灾害与治理措施的研究. 长江科学院院报，2001，(6)：11-14.］

［36］ Wang YG，Kuang SF. Study on Ω caving mechanism in alluvial rivers. *Journal of Sediment Research*，2006，(3)：27-33.［王延贵，匡尚富. 河岸窝崩机理的探讨. 泥沙研究，2006，(3)：27-33.］

［37］ Deng SS，Xia JQ，LI J *et al*. Influence of the variation of in-channel water levels on the riverbank stability in the Upper Jingjiang Reach. *Journal of Hydraulic Engineering*，2015，**46**(7)：844-852.［邓珊珊，夏军强，李洁等. 河道内水位变化对上荆江河段岸坡稳定性影响分析. 水利学报，2015，**46**(7)：844-852.］