

三峡工程运用初期石首河弯河势演变三维数值模拟

假冬冬, 邵学军, 王 虹, 肖 毅, 周 刚

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 采用考虑河岸坍塌的三维水沙数值模型, 对三峡工程运用初期石首河弯的河势演变进行了模拟分析。数值模型中采用基于非正交网格的局部网格可动技术, 将传统水沙模型与二元结构河岸坍塌力学模型相结合。利用三峡水库蓄水前后 2002~2004 年石首河段冲淤演变资料对模型进行了验证, 模拟结果与实测结果吻合较好; 模型不仅能模拟出河道的垂向冲淤过程, 而且还可模拟出由河岸坍塌所引起的河道横向摆动过程。计算分析了三峡工程运行至 2016 年末河段的河势演变情况, 结果可为河段的河道整治提供参考。

关键词: 三峡工程; 石首河弯; 河势演变; 河岸坍塌; 三维; 水沙数值模拟

中图分类号: TV 147.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)01-0043-07

三峡工程运行后, 出库泥沙量将大为减小, 下游河道将发生长期、长距离的冲刷, 而荆江河段更是“首当其冲”。对于下荆江, 河岸抗冲性较弱、坍塌严重, 由此引起剧烈的河势变化, 并对防洪、航运及人们的生产生活产生一定影响, 对其河势变化的研究具有重要实际意义。陆永军等^[1]采用二维水沙数值模型, 对上荆江瓦口子至马家咀河段进行了模拟研究; 谢作涛等^[2]则对宜昌至杨家脑河段的冲淤演变进行了二维水沙数值模拟。随着计算技术的进步, 三维水沙数学模型得到了一定的发展和应用^[3-8]。但对三峡水库运用后, 下游干流河道河势演变的三维水沙数值模拟研究则较少。尤其对下荆江等蜿蜒型河道来说, 其水沙运动具有显著三维性。为此本文采用考虑河岸坍塌的三维水沙数值模型^[8], 对三峡工程运用初期石首河弯的河势演变进行了模拟分析。模型中采用基于非正交网格的局部网格可动技术, 将三维水沙数学模型与二元结构河岸坍塌力学模型有效结合。模型不仅能模拟出河道的垂向冲淤过程, 而且还可模拟出由河岸坍塌引起的横向摆动过程。利用三峡水库蓄水前后 2002~2004 年石首河段的冲淤演变资料对模型进行了验证, 并计算分析了三峡工程运行至 2016 年石首河段的河势演变情况, 可为河段的河道整治提供参考。

1 考虑河岸坍塌的三维水沙数值模型

1.1 三维水沙模型

三维水沙模型可参见文献 [8], 其中本文采用非均匀沙计算模式。

1.2 崩岸模型

河床沿垂向冲淤变形以及边岸的淤长过程通过传统的泥沙冲淤计算即可模拟出, 但边岸的后退过程, 是无法通过沿垂向冲淤变形体现的, 需对崩岸过程进行模拟才能实现^[8]。

下荆江河岸由二元结构组成, 在垂向存在明显的分层结构, 下层是较厚的非粘性泥沙, 而上层则为较薄的粘性土层。通常下部的非粘性岸坡坡度接近泥沙颗粒的摩擦角, 而上部粘性土体则几乎为直立的。崩岸为

收稿日期: 2009-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50879042; 50979043); “十一五” 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAB05B03; 2006BAB05B02)

作者简介: 假冬冬 (1982 -), 男, 广西桂林人, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: jdd05@mails.tsinghua.edu.cn

坍塌形式, 其冲蚀机理可分作两个相互作用的过程^[9], 一个是水流的直接淘刷下层非粘性土层的过程, 另一个就是上层粘性土层在重力作用下的失稳过程。当河岸下层的非粘性土层冲蚀宽度达到极限状态后, 上部挂空的粘性土层将会受拉崩裂, 其受力状态如图 1 所示。

考虑纵向因素影响时, 粘性土层所受的力主要包括: 重力 $G = BH_u W_c \alpha_b$ 、侧面凝聚力 $F_c(i-1)$ 、 $F_c(i+1)$ 以及断裂面的拉力; 根据力矩平衡, 处于坍塌临界状态时有如下受力关系:

$$\{G - [F_c(i-1) + F_c(i+1)]\} \frac{W_c}{2} = \{BH_u W_c \alpha_b - cH_u W_c [p(i-1) + p(i+1)]\} \frac{W_c}{2} = \frac{BH_u^2 T_0}{6} \quad (1)$$

式中 T_0 、 α_b 分别为粘性土层的抗拉强度、凝聚力以及容重, 可通过实测得到; B 、 H_u 分别为粘性土层的宽度及高度; $p(i-1)$ 、 $p(i+1)$ 分别是与其紧邻的上、下游侧面所受凝聚力的方向系数, 当其紧邻的断面上层粘性土层判断发生坍塌时, 其取值为负, 否则取值为正, 绝对值范围为 0 到 1。

根据上式可求得以绕轴坍塌方式崩岸时, 二元结构中上部挂空粘性土层的临界挂空长度 (W_c) 为

$$W_c = \frac{\sqrt{T_0 H_u}}{\sqrt{3\{\alpha_b - c[p(i-1) + p(i+1)]\}/B}} \quad (2)$$

根据二元结构下层非粘性层的冲刷距离 W 以及 W_c 就可以判断上层粘性土层的稳定与否: 当 $W < W_c$ 时, 河岸上部的粘性土层不会受拉而发生坍塌; 当 $W = W_c$ 时, 河岸上部的粘性土层处于坍塌临界状态; 当 $W > W_c$ 时, 河岸上部的粘性土层将会受拉而发生坍塌。

由于下部较厚的非粘性土层岸坡坡度接近泥沙颗粒的摩擦角, 根据断面平面几何关系 (图 2) 可确定坡脚受冲刷后上层粘性土层的实际悬空距离为

$$W = B + Z \text{ctg} \beta \quad (3)$$

式中 Z 为垂向冲刷距离; B 为侧向冲刷距离, 可由 Osman 等^[10] 提出的计算公式计算; β 为泥沙颗粒的摩擦角。

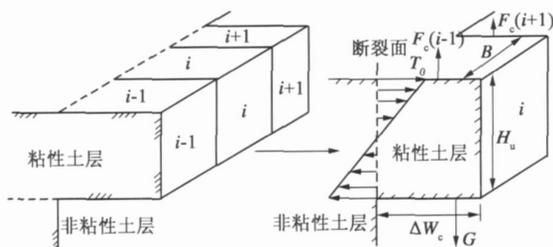


图 1 二元结构河岸中粘性土层受力图

Fig. 1 Force diagram in riverbank with bibasic structure

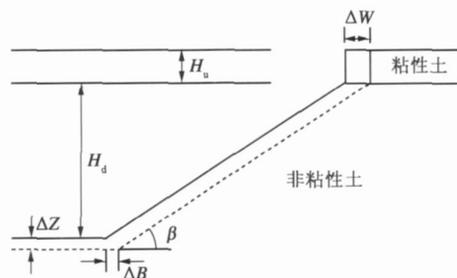


图 2 二元结构河岸断面示意图

Fig. 2 Sketch of cross-sectional profile with bibasic structure

1.3 局部网格可动技术

在应用模型对崩岸进行模拟时, 坍塌的发生会改变模型的地形, 而坍塌宽度不一定正好与坍塌处的计算网格宽度相等, 这就使网格对边岸的准确拟合变得困难, 因此一般固定网格很难准确地处理这种动态的变化过程, 采用动网格技术虽能准确地拟合边岸的变化过程, 但是需要实时生成网格, 特别是在边界复杂时, 正交网格的实时生成存在较大困难^[8]。

鉴于目前存在的一些不足, 本文采用基于非正交网格的局部动网格技术对崩岸过程进行了跟踪, 其基本思想为: 在整个计算域内生成网格, 在模拟过程中, 仅对发生崩岸附近的网格进行移动, 使其能够准确地跟踪边岸位置, 同时其余网格位置不变; 这样做既能较准确地拟合崩岸后的岸坡位置, 又无需重新生成整个计算域内的网格, 亦可实时反映河岸变形对水沙计算的影响, 弥补了传统固定网格以及动网格在这方面存在的一些不足, 详见文献^[11]。

1.4 三维数值模型计算步骤

模型采用非耦合求解模式, 具体计算步骤如下:

- (1) 给定各变量初值, 计算该时刻流场、水位等水流信息;
- (2) 根据水流信息, 计算各粒径组悬沙含沙量及推移质输沙率;
- (3) 计算河床变形, 并修改地形及调整床沙级配^[12];
- (4) 根据河岸坍塌力学模型, 判断边岸状态, 若失稳, 则修改边岸及近岸地形, 依据局部网格可动技术调整近岸网格, 并调整近岸床沙级配;
- (5) 进入下一时段的水流计算, 即步骤 (1), 直至计算结束。

2 2002 ~ 2004 年河段冲淤验证

2.1 计算条件

石首河段位于长江中游下荆江之首, 上起茅林口, 下至南碾子湾, 全长约 31 km, 由顺直过渡段与急弯段组成, 并在本河段进口附近右岸有藕池口分流入洞庭湖, 河道形态较为复杂。模型所选取的计算河段上起古长堤、下至北碾子湾, 长约 16 km, 其间有石首水位站, 弯顶上游有一新生滩 (图 3)。以河段 2002 年 9 月实测地形 (图 3) 为初始地形。计算河段平面网格总数为 171×80 ; 垂向分为 12 层网格。计算过程中, 水流时间步长 5 s, 泥沙时间步长为 20 s。

河段河床由中细沙组成, 平均粒径约为 0.17 mm; 河岸为粘土及沙组成的二元结构, 上层粘土覆盖层较薄, 约 1~4 m, 其抗拉强度、凝聚力以及容重分别取 16 kN/m^2 、 13 kN/m^2 以及 19 kN/m^3 , 其余下层则为非粘性沙层。模型进口来水来沙过程采用 2002 年 9 月 ~ 2004 年 7 月沙市站实测资料, 并按藕池口分流、分沙比给予相应调整。出口边界由水位控制, 按石首站实测水位和该河段实测比降插值得到。

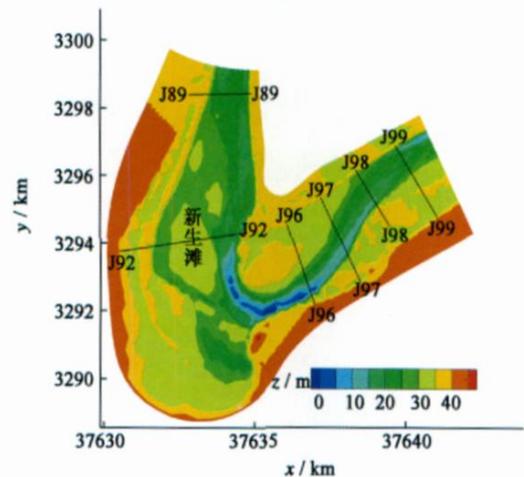


图 3 2002 年 9 月实测地形 (1954 年北京坐标系)

Fig. 3 Observed bed elevation in September 2002

2.2 水位流场验证分析

由于只有该段石首站的水位资料而没有流场资料, 因此采用模型对典型流量下的水位进行验证, 并对典型流量下三维流场的模拟结果进行合理性分析。石首站水位率定结果如图 4 所示, 从图中可以看出, 模拟值与实测值之间误差一般在 10 cm 左右, 两者吻合较好。图 5 为典型流量 ($21000 \text{ m}^3/\text{s}$) 下弯顶附近底层及表层流速的分布情况。由图可见, 流速分布呈现出典型弯道水流特性: 底层流速流向弯道凸岸, 而表层流速则流向弯道凹岸, 在急弯处两者夹角可达 50 度左右。

2.3 典型断面冲淤验证

河段典型断面的冲淤对比如图 6 所示, 从图中可以看出, 除局部差别较明显外, 各断面冲淤部位和幅度均与实测值吻合较好, 模型不仅能模拟出河道的垂向冲淤过程, 而且还可以模拟出由于河岸坍塌引起的横向摆动过程。荆 89 (J89, 下同) 断面位于计算河段的进口段, 2002 年 9 月 ~ 2004 年 7 月期间该断面左侧发生了淤积, 最大淤积厚度在 2 m 左右, 右侧则发生冲刷, 并形成相应的深槽。J92 断面横跨新生滩, 使左侧深槽进一步冲刷下切, 最大冲深达 7.5 m 左右, 右汊冲淤不明显, 稍有淤积, 但量较小。位于弯道顶点附近的 J96 断面, 时段内冲淤不明显, 断面形状稳定。位于北门口附近的 J97、J98 断面, 由于受到弯道水流的顶冲作用, 右岸均发生崩退, 其中 J97 断面右岸后退约 150 m, J98 断面右岸崩退距离在 210 m 左右。J99 断面位于计算河段末端, 时段内主槽发生强烈冲刷, 最大冲深达 5 m 左右。

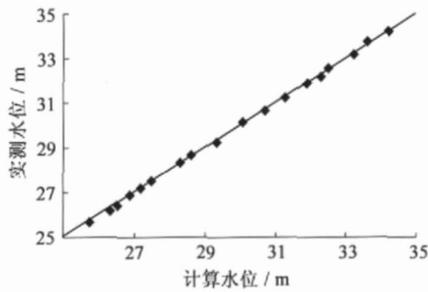


图 4 石首站水位率定

Fig. 4 Calibration of water levels at Shishou station

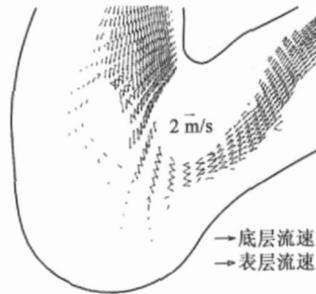


图 5 典型流量下表、底层流速分布

Fig. 5 Velocity fields at bottom and top levels

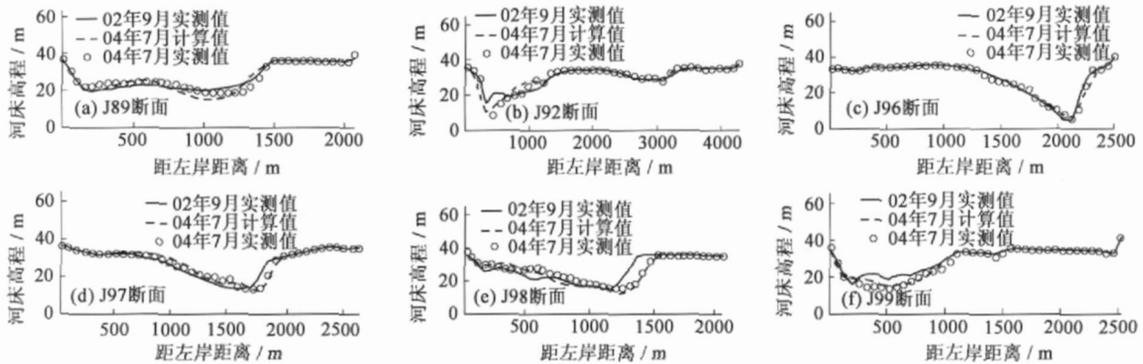


图 6 典型断面冲淤验证

Fig. 6 Computed and observed cross-sectional profile at typical sections

3 三峡工程运用初期石首河弯演变计算

采用上述 3D 模型，对三峡工程运用初期 (至 2016 年末) 石首河段的河势变化过程进行了计算。其中水沙条件采用 2002 年 9 月 ~ 2004 年 9 月期间的实测资料进行重复计算。

3.1 冲淤变化分析

图 7 为 2004 年 7 月至 2016 年末石首河段的计算冲淤分布图。由图可见，三峡水库运用初期，石首河段以冲刷为主，河床平均冲深 1.7m 左右，最大冲深一般出现在河段上游主流摆动较大处及下游右岸处。由图 7 可见：石首河段新生滩以上，仍以右侧深槽冲刷为主，左侧边滩则发生淤积，其中右侧深槽冲深一般为 2.5 ~ 7m；新生滩附近河段，新生滩头部受到冲刷，最大冲深约 15m，滩头后退，位于左侧的原深槽部位则发生一定淤积，最大淤积厚度一般为 6m 左右，从而造成深泓线右移；石首河段的弯顶附近，由于右侧东岳山的控制，河道不能自由摆动，右侧凹岸发生冲刷，冲深一般为 5m 左右，左侧凸岸则发生一定淤积，淤积厚度约 1 ~ 2m，此段河势仍较稳定；弯顶以下河段，由于右侧北门口一带边岸抗冲性较差，随着顶冲点的下

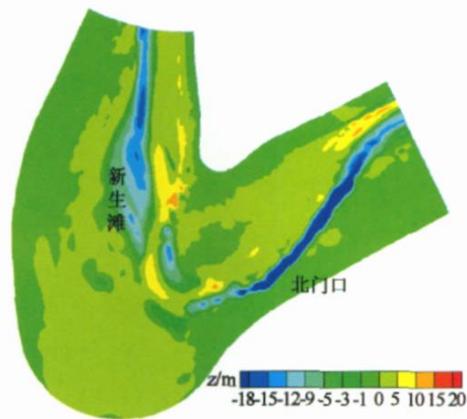


图 7 2016 年末计算冲淤厚度分布

Fig. 7 Computed distribution of bed erosion and siltation until Dec 2016

移, 右岸发生冲刷崩退, 一般冲深 3~10m, 最大冲深约 18m, 出现在 J98 断面附近, 左侧边滩则略有淤积, 一般为 1~4.5m, 最大淤积厚度为 11m 左右, 出现在 J99 断面一带。

J92 及 J98 两典型断面冲淤变化如图 8 所示。J92 整个断面在 2010 年末前均处于冲刷状态, 至 2016 年末时, 原左侧深槽发生淤积, 而右侧新生滩左边缘则不断受到冲刷而后退, 后退距离约 450m; 位于弯顶下游北门口一带的右岸发生崩退, 其中 J98 断面后退 310m 左右, 由于原左侧河道发生一定淤积, 而右侧持续冲刷, 深槽右移约 250m。

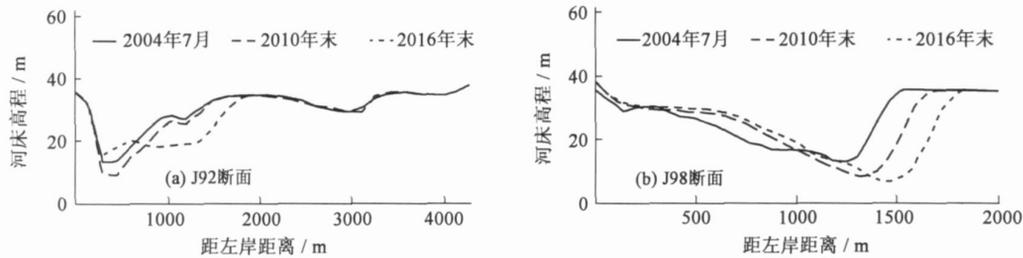


图 8 典型断面冲淤变化

Fig. 8 Computed cross-sectional profile at typical sections

3.2 平面河势变化

三峡水库蓄水运用初期, 石首河段计算 28m 等高线变化如图 9 所示, 从图中可以看出, 三峡水库蓄水运行后, 石首河段发生较强烈的冲刷, 进口段右侧深泓线不断下移, 并冲刷新生滩头部, 致使滩头后退, 其面积不断减小, 从 2010 年末的等高线可以看出, 在左侧出现一新的心滩, 在一定流量下出现三岔分流的局面, 并逐渐扩大; 至 2016 年末该心滩有与左岸边滩相连接的趋势。河段中间的弯顶附近, 由于右侧受到东岳山天然节点的控制作用, 河道不能自由摆动, 凹岸发生一定冲刷, 凸岸则略有淤积, 此段河势较为稳定。位于弯顶以下的河段, 由于受到弯道水流的顶冲作用, 右岸发生崩退, 约 50~230m, 而左岸则发生一定的淤进, 一般在 30~190m 左右, 深槽逐渐右摆。

3.3 三峡水库运用初期河段演变综合分析

综上所述, 在三峡水库蓄水运行初期 (至 2016 年末), 石首河段沿程出现明显冲刷, 局部河势变化较为剧烈, 河床冲淤交替。上游新生滩头部不断冲刷后退, 其面积不断减小, 而左侧则出现一新的心滩, 并逐渐扩大, 有与左岸边滩相连接的趋势。河段下游右岸北门口一带发生持续崩岸, 一般为 100~300m。总体上说, 该河段上游新生滩一带 (J89~J92) 以及下游北门口一带 (J96~J99) 河势调整较为剧烈, 而位于弯顶附近的河段 (J93~J95) 河势则较为稳定。应当指出, 上述河势预测 (2004 年 7 月至 2016 年末) 结果采用的是 2002~2004 年期间实测水沙资料进行重复计算; 三峡工程建成后, 由于来水来沙条件及边界控制等因素的不确定性, 尤其是入口边界的不确定性, 模拟结果仅作参考。

4 结 论

采用考虑河岸坍塌的三维水沙数值模型, 对三峡工程运用初期石首河弯的河势演变进行了模拟分析。模型中采用基于非正交网格的局部网格可动技术, 将三维水沙数学模型与二元结构河岸坍塌力学模型有效结合。

利用三峡水库蓄水前后河段的冲淤演变实测资料对模型进行了验证, 模型成功地复演了石首河弯 2002

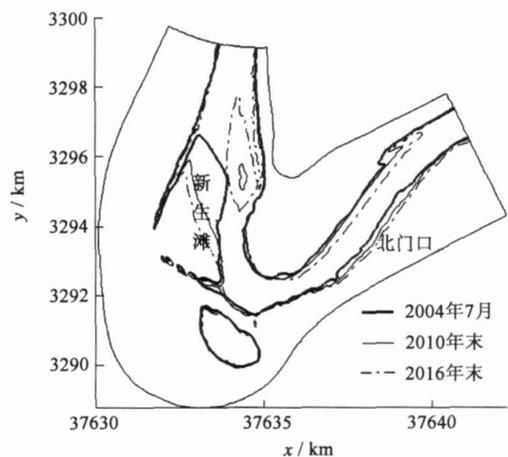


图 9 28m 等高线变化 (1954 年北京坐标系)

Fig. 9 Variation of computed 28m contour

年 9 月 ~ 2004 年 7 月的河势变化过程, 模拟结果与实测结果吻合较好; 模型不仅能模拟出河道的垂向冲淤过程, 而且还可模拟由河岸坍塌引起的横向摆动过程。

计算分析了三峡工程运行至 2016 年末河段的河势演变情况, 石首河段沿程出现明显冲刷, 局部河势变化较为剧烈。上游新生滩头部不断冲刷后退, 其面积不断减小, 而左侧则出现一新的心滩。河段下游右岸北门口一带发生持续崩岸, 一般为 100 ~ 300m。总体上说, 该河段上游新生滩一带 (J89 ~ J92) 以及下游北门口一带 (J96 ~ J99) 河势调整较为剧烈, 而位于弯顶附近的河段 (J93 ~ J95) 河势则较为稳定。

由于石首河段河床、河岸边界抗冲性较差, 虽然局部河段实施了护岸工程, 但三峡水库蓄水运用后, 河段心滩及边滩等部位, 仍可能出现一些崩退, 从而引起河势的剧烈变化, 尤其是新生滩及下游北门口一带, 应引起足够重视。此外, 由于该河段上游新生滩一带冲淤交替, 深泓线不稳定, 河道整治时, 应因势利导, 选择适宜方案。

参考文献:

- [1] 陆永军, 王兆印, 左利钦, 等. 长江中游瓦口子至马家咀河段二维水沙数学模型 [J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 227-234. (LU Yong-jun, WANG Zhao-yin, ZUO Li-qin, et al. 2D mathematical model for water-sediment between Wakouzi-Majiazui reach in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(2): 227-234. (in Chinese))
- [2] 谢作涛, 侯卫国, 任昊. 葛洲坝下游宜昌 杨家脑河段平面二维水沙数学模型 [J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 309-316. (XIE Zuo-tao, HOU Wei-guo, REN Hao. 2D horizontal modeling for the movement of flow and sediment from Yichang to Yangjiaobao reach at the Gezhouba downstream[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 309-316. (in Chinese))
- [3] WU W M, ROD I W, WENKA T. 3D numerical model for suspended load transport in open channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2000, 126(1): 4-15.
- [4] 夏云峰. 感潮河道三维水流泥沙数值模型研究与应用 [D]. 南京: 河海大学, 2002. (XIA Yun-feng. Research on application of 3D hydrodynamic, sediment transport model with non-staggered curvilinear grid for tidal rivers[D]. Nanjing: Hohai University, 2002. (in Chinese))
- [5] LU Yong-jun, DOU Guo-ren, HAN Long-xi, et al. 3D mathematical model for suspended load transport by turbulent flows and its applications[J]. Science in China: Ser E, 2004, 47(2): 237-256.
- [6] FANG H W, WANG G Q. Three-dimensional mathematical model of suspended-sediment transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2000, 126(8): 578-592.
- [7] 黄国鲜. 弯曲和分叉河道水沙输运及其演变的三维数值模拟研究 [D]. 北京: 清华大学, 2006. (HUANG Guo-xian. Study on the three-dimensional numerical simulation of fluvial processes in meandering and braided channel[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese))
- [8] 假冬冬, 邵学军, 王虹, 等. 考虑河岸变形的三维水沙数值模拟研究 [J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 311-317. (JIA Dong-dong, SHAO Xue-jun, WANG Hong, et al. Three dimensional mathematical modeling for fluvial processes considering bank erosion [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 311-317. (in Chinese))
- [9] FUKUOKA S J. 自然堤岸冲蚀过程的机理 [J]. 水利水电快报, 1996(2): 29-33. (FUKUOKA S J. Mechanisms of the erosion processes of natural dike banks[J]. Express Water Resources and Hydropower Information, 1996, 2: 29-33. (in Chinese))
- [10] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis I: Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1988, 114(2): 134-150.
- [11] JIA Dong-dong, SHAO Xue-jun, WANG Hong, et al. Locally-adaptive grid system for 3D numerical simulation of meander migration[C]//16th AHR-APD Congress and 3rd AHR-ISHS. Beijing: Tsinghua University Pres, 2008: 877-882.
- [12] 韦直林, 赵良奎, 付小平. 黄河泥沙数学模型的研究 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(5): 21-25. (WEI Zhi-ling, ZHAO Liang-kui, FU Xiao-ping. Mathematical model for sediment in Yellow River[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997, 30(5): 21-25 (in Chinese))

3D numerical simulation of fluvial processes in the Shishou bend during the early filling of the Three Gorges Reservoir *

JIA Dong-dong, SHAO Xue-jun, WANG Hong, XIAO Yi, ZHOU Gang

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: A 3D mathematical modeling considering bank erosion is adopted to simulate the fluvial processes of the Shishou bend in the Middle Yangtze River during the early filling of the Three Gorges Reservoir. The locally-adaptive grid system based on non-orthogonal grids is used to calculate the lateral migration in channels due to bank erosion with a composite structure. The observed data of bed deformation from September 2002 to July 2004 is adopted to verify the accuracy of the model, and the calculated results agree well with the measured data. The 3D model can not only simulate the longitudinal bed deformation, but also calculate the lateral migration in alluvial rivers. The fluvial processes in the Shishou bend from July 2004 to December 2016 are forecasted using the 3D model after the filling of the Three Gorges Reservoir, and the calculated results can provide scientific basis for the investigation of river regulation.

Key words: Three Gorges Project; Shishou bend; fluvial processes; bank erosion; three-dimensional; mathematical modeling

欢迎订阅《水科学进展》

《水科学进展》是以水为论述主题的学术期刊, 主要反映国内外在暴雨、洪水、干旱、水资源、水环境等领域中的科学技术最新成果、重要进展、当代水平和发展趋势, 报道关于水圈研究的新事实、新概念、新理论和新方法, 交流新的科研成果、技术经验和科技动态。她涉及与水有关的所有学科, 包括水文科学、大气科学、海洋科学、地质科学、地理科学、环境科学、水利科学和水力学、冰川学、水生态学以及法学、经济学和管理科学中与水有关的内容。本刊为全国中文核心期刊, 同时被 Ei 和 CA 等国际权威文献检索系统收录, 2003、2004、2005 年连续获“百种中国杰出学术期刊”称号。

《水科学进展》为双月刊, 大 16 开本, 每期 136 个版面, 逢单月 30 日出版, 每期定价 20.00 元, 全年定价 120.00 元。国际标准连续出版物号: ISSN 1001-6791, 国内统一连续出版物号: CN 32-1309/P, 国内发行代号: 28-146, 欢迎广大读者向当地邮局(所)办理订阅手续。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50879042; No. 50979043) and the National Key Technologies R&D Program of China during the 11th Five-year Plan Period (No. 2006BAB05B03; No. 2006BAB05B02).