

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.02.007

岸滩侧蚀对航道条件影响的三维数值模拟

——以长江中游太平口水道为例

假冬冬¹, 夏海峰², 陈长英¹, 张幸农¹

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

2. 中交疏浚(集团)股份有限公司, 北京 100088)

摘要:长江中游河道岸滩侧蚀现象普遍, 易对航道稳定形成不利影响, 深入研究岸滩侧蚀冲刷机理及其航道响应过程具有重要意义。建立了考虑相邻土体影响的黏性岸滩侧蚀坍塌力学模式, 以长江中游太平口水道为例, 基于局部网格可动技术, 构建了岸滩侧蚀及其河床冲淤变化的三维水沙动力学模型; 在模型验证相似的基础上, 分析了清水冲刷条件下腊林洲边滩侧蚀对太平口水道航道格局的影响。研究表明: 模型可较好地模拟由岸滩侧蚀所引发的河势演变过程; 上游来沙减少后, 太平口水道河床以及未守护低滩部位将进一步产生冲刷; 腊林洲边滩稳定与否, 对太平口水道“南槽-北汊”航道格局的稳定具有重要作用。

关键词:岸滩侧蚀; 航道; 三维数值模拟; 长江中游

中图分类号: TV147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)02-0223-08

长江中游河道岸滩侧蚀引起河床横向变形的现象十分普遍, 易对航道稳定形成不利影响, 如沙市河段、窑监河段和戴家洲河段等均因此而造成航道条件恶化。三峡枢纽蓄水运行以来, 清水下泄, 出库沙量大幅减少, 坝下河段河床将发生长距离、长时段自上而下的冲刷, 使得局部深槽冲深、近岸坡脚淘刷, 滩槽高差加大, 岸滩稳定性进一步降低, 目前多个河段岸滩侧蚀引起河床横向变形的现象已有加重迹象, 枯水河床有向宽浅型方向发展的趋势, 浅滩碍航情况时有发生。因此, 深入研究岸滩侧蚀冲刷机理及其航道响应过程具有重要意义。

传统冲积河流河床冲淤变化的模拟研究, 一般是针对垂向的冲淤变化, 并且依据冲积泥沙(即新淤土)运动规律的基础理论。而岸滩侧蚀及其引起的河床横向变形, 涉及水、土两方面因素, 力学机制十分复杂, 不仅表现形式多为崩塌后退, 而且土质基本上为原状土, 现有泥沙运动理论并不完全适用。因而, 在传统泥沙模型试验和数值模拟计算中, 航道演变模拟时一般均假定河床仅发生沿垂向冲淤变化, 而不考虑岸滩侧蚀过程^[1-3]。对于岸滩侧蚀现象明显的河段, 不仅需考虑垂向冲淤变化, 还应考虑由岸滩侧蚀所引发的河势调整过程。随着崩岸机理认识的深入, 国内外学者对考虑河岸崩塌的二维数值模拟方法进行了相关研究^[4-9], 但此类方法多借用断面二维力学模式, 对于类似长江中游上荆江河道而言, 其岸滩一般以黏性土层为主, 黏性岸滩崩塌判断时, 由于土体凝聚力的存在, 不仅需考虑断面上的力学影响因素, 还应从三维角度分析沿纵向相邻土体对其稳定性的影响^[10]。

本文以长江中游太平口水道为例, 针对传统断面二维力学模式的不足之处, 建立考虑相邻土体影响的均质黏性岸滩侧蚀坍塌力学模式, 基于全三维水沙模型研究成果^[11-12], 通过局部网格可动技术, 构建岸滩侧蚀及其河床冲淤变化的三维动力学模型。在模型验证相似的基础上, 分析清水冲刷条件下腊林洲边滩侧蚀对太平口水道航道格局的影响, 研究成果可为航道治理措施的制定提供科技支撑。

收稿日期: 2016-10-08; **网络出版时间:** 2017-02-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20170221.1127.010.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579151; 51679147)

作者简介: 假冬冬(1982—), 男, 广西桂林人, 博士, 主要从事河流海岸动力学研究。E-mail: ddjia@nhri.cn

1 黏性岸滩侧蚀坍塌数值模拟技术

长江中游(尤其是荆江河段)河势演变过程,不仅包括垂向的河床冲淤变化,同时亦包括因岸滩侧蚀所引发的平面变形过程。河床垂向冲淤变化以及边滩淤长过程可通过传统泥沙模型模拟;但岸滩侧蚀崩退引发的平面变形过程,则需对崩岸进行模拟才能实现。对于岸滩侧蚀坍塌的模拟而言,首先是模拟水流冲刷过程(包括侧向冲蚀和垂向冲淤),其次是上部岸滩失稳坍塌过程,之后坍塌土体又会堆积在坡脚,对近岸河床起到掩护作用。关于长江中游二元结构岸滩侧蚀坍塌的模拟方法,可见文献[11],下面主要介绍考虑相邻土体影响的黏性岸滩侧蚀坍塌力学模式。

1.1 黏性岸滩侧蚀坍塌机理

1.1.1 侧蚀冲刷计算

水流淘刷作用下,下部岸滩侧蚀冲刷过程可由 Osman 公式计算^[13],亦可由笔者提出的岸滩侧蚀速率公式计算^[14]:

$$\omega_b = \lambda \sqrt{\frac{\gamma(u^2 - u_c^2)}{\gamma_b}} \quad (1)$$

式中: ω_b 为岸滩侧蚀速率; λ 为侧蚀系数,由实测资料进行率定; γ 为水体容重; γ_b 为河岸容重; u 为近岸处水流流速; u_c 为泥沙起动流速。

1.1.2 岸滩崩塌力学模式

对于长江中游上荆江河道而言,其岸滩一般以黏性土层为主,黏性土体岸滩崩塌判断时,由于土体凝聚力的存在,不仅需考虑断面上的力学影响因素,还应从三维角度分析沿纵向相邻土体对其稳定性的影响。图1为黏性岸滩的崩塌土体示意图,对于图1(a)中的土体*i*来说,其崩塌将受到与其相邻的土体*i-1*及*i+1*的影响,两相邻土体将凝聚力 $F_c(i-1)$ 、 $F_c(i+1)$ 作用于土体*i*,如图1(b)所示。本文借鉴 Osman 和 Thorne^[13]的思路,依据土体力学平衡,推导建立了考虑相邻土体影响的崩塌力学模式,若黏性岸滩发生初次崩塌后,则假定此后的崩塌方式为平行后退,即崩塌后的边坡角度恒为 β ,且滑坡过坡脚位置。下面给出考虑相邻土体影响的黏性土岸滩稳定性分析的具体计算过程。

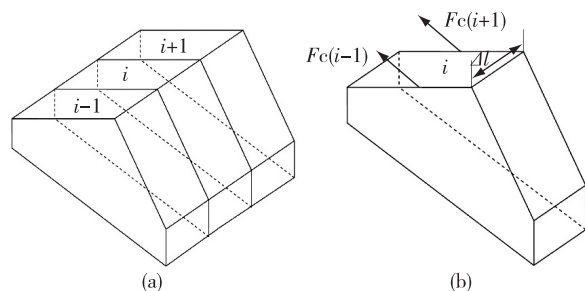


图1 黏性土岸滩立体示意

Fig. 1 Sketch of the riverbank

(1) 初次崩塌

在已知初始岸滩高度 H_0 ,初始岸坡*i*的情况下,根据水沙模型计算得到边坡坡脚处横向冲刷值为 ΔB ,河床冲深为 ΔZ 。模型根据垂向与横向变形的计算结果,修正岸坡的实际形态。图2为发生冲刷后初次崩塌的示意图,由于地形概化的原因,在河岸纵向变形计算中用到的地形是图2中的连线A-B-C-D。经过水流冲刷及崩岸,计算得到岸坡地形变为A'-B'-C'-D。 H 为冲刷后的河岸高度; H' 为岸坡线转折点以上的河岸高度; F_s 为土体滑动力, F_R 为土体抗滑力, W 为单位河岸宽度的崩塌土体重量; BW 为崩塌土体宽度; H_1 为河岸上部拉伸裂缝的深度; β 为发生初次崩塌时,滑动面与水平面的夹角,可由下式计算:

$$\beta = 0.5 \left\{ \tan^{-1} \left[\left(\frac{H}{H'} \right)^2 (1.0 - k^2) \tan i \right] + \Phi \right\} \quad (2)$$

式中: k 为河岸上部拉伸裂缝的深度 H_1 与河岸高度 H 之比,一般取0.5,但实际计算中可根据黏性土岸滩的临界直立高度确定 k 值; Φ 为岸滩土体的内摩擦角。

根据力学推导分析,初次崩塌的临界条件为

$$\left(\frac{H}{H'}\right)_c = 0.5 \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \sqrt{\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2 - 4\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1}\right)} \right] \quad (3)$$

式中: $\lambda_1 = \frac{(1-k^2)}{\tan\beta} \{ \gamma_b \sin\beta - \gamma_b \cos\beta \tan\Phi - c/\Delta l [p(i-1) + p(i+1)] \}$; $\lambda_2 = \frac{2c(1-k)}{H' \sin\beta}$; $\lambda_3 = \frac{1}{\tan i} \{ c/\Delta l [p(i-1) + p(i+1)] + \gamma_b \cos\beta \tan\Phi - \gamma_b \sin\beta \}$; 其中 c 为土体凝聚力; Δl 为黏性土岸滩崩塌的纵向宽度; $p(i-1)$ 、 $p(i+1)$ 分别为上、下游侧面所受凝聚力系数。

计算得到 $(H/H')_c$ 后, 根据实际值 $(H/H')_m$ 和临界值 $(H/H')_c$ 的大小, 判断是否会发生初次崩塌, 具体步骤如下: (1) 若 $(H/H')_m < (H/H')_c$, 边坡稳定, H' 不是发生崩塌的临界高度, 进入下一个时段的水沙计算; (2) 若 $(H/H')_m \geq (H/H')_c$, 边坡不稳定, 发生崩塌。利用边坡几何形态关系, 可计算出崩塌土体的

宽度 $BW = \left(\frac{H-H_1}{\tan\beta} - \frac{H'}{\tan i} \right)$ 及崩塌体积 $VB = \frac{1}{2} \Delta l \left(\frac{H^2-H_1^2}{\tan\beta} - \frac{H'^2}{\tan i} \right)$ 。

(2) 二次崩塌

岸滩发生初次崩塌后, 假定以后的边坡崩塌方式为平行后退, 即边坡崩塌时的破坏角度恒为 β , 崩塌方式如图 3 所示。

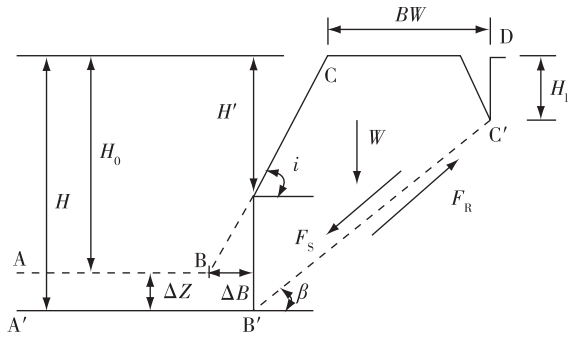


图 2 黏性土岸滩初次崩塌示意
Fig. 2 Sketch of the initial bank failure

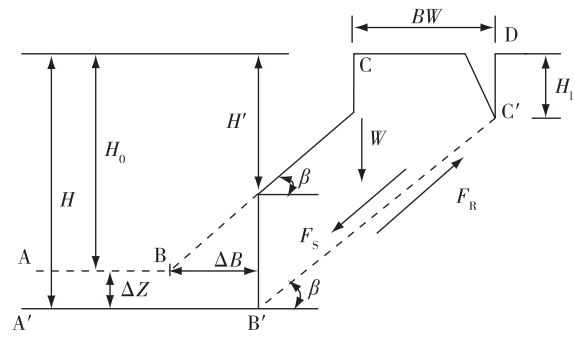


图 3 黏性土岸滩二次崩塌示意
Fig. 3 Sketch of the subsequent bank failure

对二次崩塌进行力学分析可得其临界条件如下:

$$\left(\frac{H}{H'}\right)_c = 0.5 \left[\frac{\omega_2}{\omega_1} + \sqrt{\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + 4} \right] \quad (4)$$

式中: $\omega_1 = \frac{1}{\tan\beta} \{ \gamma_b \sin\beta - \gamma_b \cos\beta \tan\Phi - \frac{c}{\Delta l} [p(i-1) + p(i+1)] \}$; $\omega_2 = \frac{2c(1-k)}{H' \sin\beta}$ 。

与初次崩岸判别类似, 可根据实际值 $(H/H')_m$ 和临界值 $(H/H')_c$ 的大小, 判断是否会发生二次崩塌。

当坍塌的上部黏性土体堆积在坡脚处河床时, 其抗冲性增强, 对覆盖的近岸河床起着掩护作用。本文假定岸滩上部黏性土体坍塌后, 按一定比例(掩护系数) p_b 均匀分布在近岸处形成掩护层, 另一部分 $(1-p_b)$ 则以源项形式转化为悬沙。掩护系数 p_b 由水流条件确定^[10-11], 当流量大, 水体紊动强时, 该值较小, 亦即坍塌体转化为悬沙的比例较大, 反之 p_b 则较大。

1.2 局部网格可动技术

在应用模型对岸滩侧蚀崩退过程进行模拟时, 崩塌的发生会改变模型的地形, 而崩塌宽度不一定正好与崩塌处的计算网格宽度相等, 这就使网格对岸边准确拟合变得困难, 因此, 一般固定的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坡的变化过程, 但是需要实时生成网格, 特别是在边界复杂时, 网格的实时生成存在较大困难。

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网格可动技术对崩岸过程进行了跟踪, 即在

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。这样既能较准确地拟合崩塌后的岸坡位置,又无需重新生成整个计算域内网格,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。具体过程详见文献[12]。

1.3 岸滩侧蚀数值模拟流程

本文采用的三维水沙模型为非均匀非平衡泥沙输移模型,模型采用非正交曲线网格建立,采用控制体积法进行离散求解^[11-12]。岸滩侧蚀三维数值模拟过程中,首先给定各变量初值,采用三维水沙模型计算该时刻流场、水位等水流信息;然后依据水流流场结果,计算各粒径组悬沙含沙量及推移质输沙率;在此基础上计算河床垂向变形,更新地形;根据岸滩侧蚀坍塌力学模式,计算坡脚侧蚀距离,同时依据动态网格跟踪技术来识别岸滩位置,在此基础上依次循环判断相邻岸滩状态,若失稳,则修改岸滩及近岸地形。

2 太平口水道三维动力学模型建立与验证

太平口水道位于长江中游上荆江中上段,上起陈家湾、下至玉和坪,全长约22 km。该水道属顺直微弯分汊河型(图4),江中太平口心滩,将河道分为南北两槽,下段三八滩将其分为南北两汊,横跨三八滩的荆州长江公路大桥在靠近两岸的北汊及南汊内均布设了通航桥孔,中间为非设计通航桥孔。该水道设计航道走向为从太平口心滩的南槽逐渐过渡至三八滩北汊,即“南槽-北汊”航道格局。近年来,腊林洲头部及低滩部位处于持续崩退的状态,且崩退速度有所加快,本文将建立太平口水道岸滩侧蚀三维水沙动力学模型,并采用实测资料进行模型验证,在此基础上模拟分析腊林洲边滩侧蚀对“南槽-北汊”航道格局的影响。

模型计算范围上起竹林子、下至玉和坪,模拟主河道长约18 km,包括太平口心滩、腊林洲边滩和三八滩等洲滩(图4)。模型采用的贴体曲线非正交网格与复杂岸线贴合良好,模型平面计算网格为280×130,垂向网格分为10层。2011年1月地形情况见图4。

典型流量下($Q=16\,000\text{ m}^3/\text{s}$)模型计算表、底层流速分布特征如图5所示,由图5可见:顺直段表、底层流速方向基本一致,且表层流速值明显大于底层,弯道处表、底层流速则呈现出一定夹角,表层水流流向凹岸、底层流速则趋向凸岸。

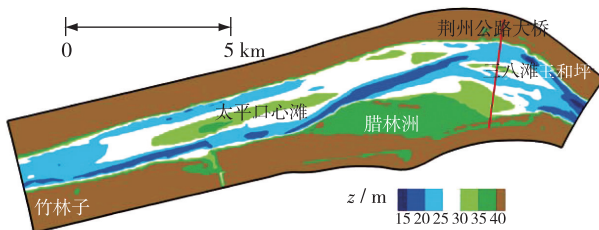
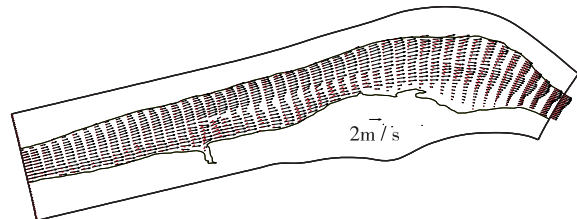


图4 太平口水道河势

Fig. 4 River regime of the Taipingkou Waterway



(注:红色矢量箭头代表底层流速,黑色则代表表层流速)

图5 模型计算表、底层流速分布特征($Q=16\,000\text{ m}^3/\text{s}$)

Fig. 5 Computed velocities close to channel bed and water surface($Q=16\,000\text{ m}^3/\text{s}$)

河床冲淤验证计算中以2011年1月地形作为初始地形,模型进口流量、含沙量以及悬沙级配采用2011年1月—2013年7月沙市站实测资料,出口边界由水位控制。图6给出了2011年1月—2013年7月实测冲淤分布与模型验证结果的对比情况,由图6可见,模型计算结果与实测结果吻合较好。三峡水库运行后,河段总体以冲刷为主,模型可较好地反映河段的冲淤分布特征,能够模拟时段内河道右侧腊林洲边滩的侧蚀冲刷情况,相应地,三八滩南汊出现明显冲刷,北汊进口处则呈淤积态势。模型不仅能模拟河床垂向冲淤变化,同时也可模拟由岸滩侧蚀所引发的河势演变过程,从而为研究岸滩侧蚀对河势及其航道条件的影响提供了重要技术手段。

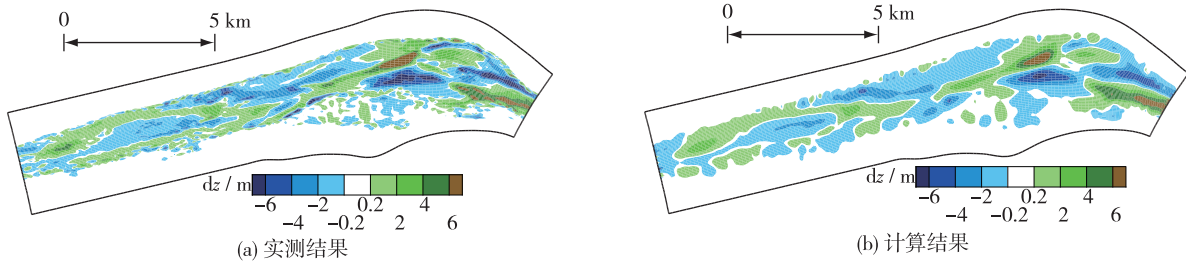


图 6 冲淤分布验证结果

Fig. 6 Simulated and measured results of deposition and erosion distribution

3 岸滩侧蚀对航道条件影响模拟研究

本研究采用太平口水道岸滩侧蚀三维水沙动力学模型, 对不同岸滩边界条件下(腊林洲边滩可冲或不可冲)的河道演变特征进行模拟, 以分析腊林洲边滩稳定与否对太平口水道 3.5 m 航道条件的影响。研究过程中, 以 2011 年 1 月地形为起始地形, 选取三峡水库 175 m 试验性蓄水运用后的 2009—2013 年水沙过程作为数学模型计算的系列年水文条件。

从 2011 年 1 月现状航道条件可看出(图 7), 此时, 太平口水道 3.5 m 航道维持从太平口心滩南侧深槽向三八滩北侧深槽(即荆州公路大桥的主通航孔侧)过度的态势, 亦即“南槽-北汉”的航道格局, 且三八滩北汉 3.5 m 航宽略大于南汉。

河道右侧腊林洲边滩不考虑侧蚀冲刷时(即考虑全面的洲滩守护工程), 经过 2009—2013 年水沙过程后, 太平口水道 3.5 m 航道条件模拟结果见图 8。由图 8 可见, 较现状而言(图 7), 清水冲刷条件下, 河道整体表现为冲刷, 其中三八滩南汉冲刷表现较为明显, 但腊林洲边滩仍具有一定的挑流效果, 该水道 3.5 m 航道仍可基本维持“南槽-北汉”的航道格局, 且三八滩南、北汉 3.5 m 航宽基本一致, 但三八滩北汉进口衔接段航宽仍较窄。此外, 从南汉右侧边滩变化来看(腊林洲边滩下游), 由上游冲刷带来的泥沙在此出现淤积, 与现状条件相比(图 7), 边滩尾部呈下延态势。

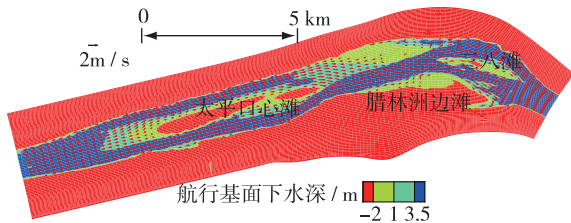


图 7 2011 年 1 月现状条件下太平口水道 3.5 m 航道
Fig. 7 Navigation condition of the Taipingkou
Waterway on Jan. 2011

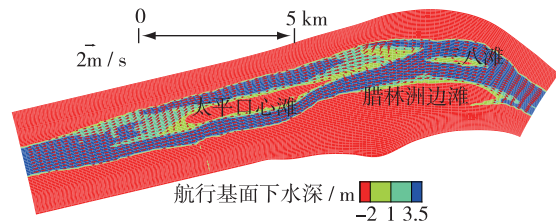


图 8 无边滩侧蚀条件下太平口水道 3.5 m 航道模拟结果
Fig. 8 Predicted navigation condition of the Taipingkou
Waterway without bank erosion

河道右侧腊林洲边滩考虑侧蚀情况时(与现状冲淤验证情况一致), 经过 2009—2013 年水沙过程后, 太平口水道 3.5 m 航道条件模拟结果见图 9。由图 9 可见, 较现状而言(图 7), 清水冲刷条件下, 河道总体表现为冲刷, 三八滩南汉的冲刷程度较腊林洲边滩不可冲时更为明显。此外, 腊林洲边滩侧蚀崩退后, 其挑流作用减弱, 主流南移, 三八滩南汉 3.5 m 航宽大于北汉, 且三八滩北汉进口衔接段 3.5 m 航道宽度缩窄明显, 3.5 m 航深线有明显断开趋势, 使得该水道 3.5 m 航道无法维持“南槽-北汉”的航道格局。此外, 从南汉右侧边滩来看(腊林洲边滩下游), 与腊林洲边滩不考虑侧蚀冲刷时相似(图 8), 由上游冲刷带来的泥沙(包括河道冲刷以及边滩侧蚀)在此出现淤积, 与现状条件相比(图 7), 边滩尾部呈明显下延态势, 且下延态势较腊林洲边滩不考虑侧蚀冲刷时更为明显(图 10)。

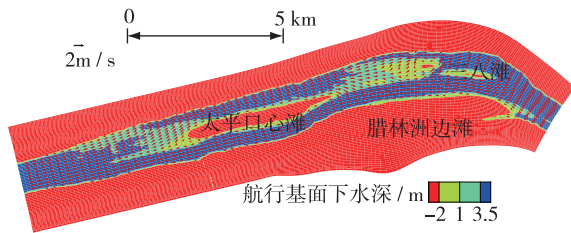


图9 边滩有侧蚀条件下太平口水道
3.5 m 航道模拟结果

Fig. 9 Predicted navigation condition of the Taipingkou
Waterway considering bank erosion

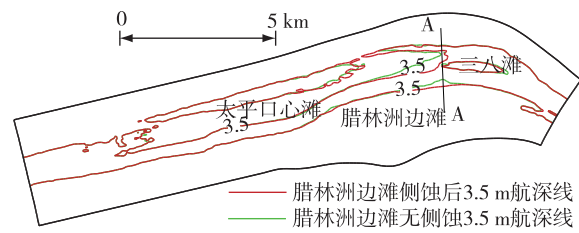


图10 有、无边滩侧蚀条件下3.5 m 航道
条件模拟结果对比

Fig. 10 Comparisons of predicted navigation conditions
with and without bank erosion

为更直接说明清水冲刷后洲滩边界变化特征,将起始洲滩边界与清水冲刷后洲滩边界作对比,结果见图11。由图11可见,清水冲刷条件下,心滩面积均有所减小(包括太平口心滩及三八滩);从腊林洲边滩来看,其侧蚀后退后,主流南偏,对三八滩北汉挑流的作用减弱,相应的对岸边滩下移,使得三八滩北汉进口出现淤积,航道条件恶化;另外,从上游岸滩侧蚀及河道冲刷带来的泥沙,在腊林洲尾部出现一定程度淤积,边滩尾部表现为下延态势。此外还选取三八滩头部 A-A 断面对腊林洲边滩可冲与否条件下的冲淤变化进行了对比(断面位置见图10),如图12所示;右侧边滩冲刷后,水流进一步取直,三八滩右汉进一步冲刷发展,而左汉进口则由明显淤积,已对“南槽-北汉”航道格局造成明显不利影响。

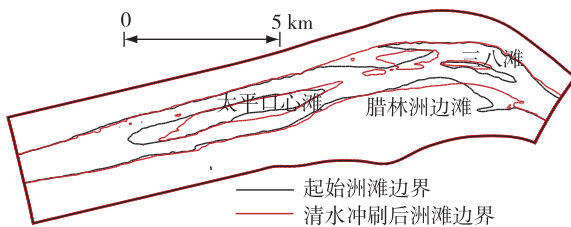


图11 清水冲刷后太平口水道洲滩边界变化情况

Fig. 11 Comparisons of predicted planform evolution on the
Taipingkou Waterway with and without bank erosion

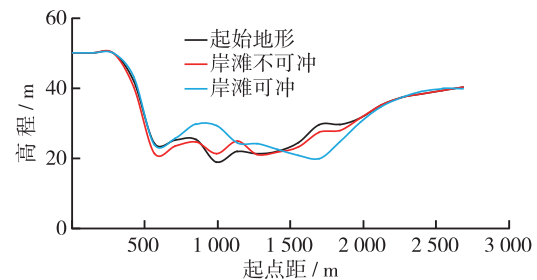


图12 典型断面(A-A断面)冲淤变化对比

Fig. 12 Comparisons of predicted cross-section evolution
with and without bank erosion

综合腊林洲边滩有、无侧蚀情况下太平口水道3.5 m航深线的模拟对比结果可看出(图8—图10),腊林洲边滩侧蚀与否(是否实施全面守护措施),对于“南槽-北汉”航道格局的稳定具有重要作用。因此,对于具有显著洲滩变化的太平口水道航道治理而言,首先应控制不断变化的河势格局。从本河段2011年河势情况来看(图7),太平口南槽出流流态正处于相对较好局面,但若不对相应洲滩进行守护,如水道右侧腊林洲低滩,仍存在不断冲刷后退的不利趋势,任其变化发展,将导致三八滩上方主流右偏,北汉浅滩段输沙不足,好的航道条件难以长期维持,不能满足3.5 m航道尺度的要求(图9)。因此,以已建航道整治工程为依托,进一步实施航道整治工程措施,守护较为有利的洲滩格局,同时适当恢复腊林洲低滩的滩体,是强化和稳定该水道“南槽-北汉”航道格局的关键基础。此外,受三峡枢纽蓄水影响,来沙减少在长江中游河段最为明显,与太平口水道上游砂卵石河段相比,虽然水沙条件相差不大,但该河段河床组成的抗冲能力要明显偏弱;与下游沙质河段相比,虽然河床组成相差不大,但水流挟沙的次饱和程度要明显偏高,因而该河段河床受冲刷程度更剧烈,腊林洲边滩守护的难度也较大。

4 结 论

本文建立了考虑相邻土体影响的黏性岸滩侧蚀坍塌力学模式,并以长江中游太平口水道为例,基于局部网格可动技术,构建了岸滩侧蚀及其河床冲淤变化的三维水沙动力学模型;在模型验证相似的基础上,分析了清水冲刷条件下腊林洲边滩侧蚀对太平口水道航道格局的影响。研究表明:

模型不仅能模拟河床垂向冲淤变化,同时也可模拟由岸滩侧蚀所引发的河势演变过程,从而为研究岸滩侧蚀对河势及其航道格局的影响提供了重要技术手段。

上游水库蓄水运行后下游来沙量减少,太平口水道河床以及未守护低滩部位将会进一步产生冲刷;清水冲刷条件下,腊林洲边滩侧蚀冲刷后,主流南偏,北汊进口淤积,从而影响该水道“南槽-北汊”的航道格局。

腊林洲边滩稳定与否,对于太平口水道“南槽-北汊”航道格局的稳定具有重要作用。因此,以已建航道整治工程为依托,进一步实施航道整治工程措施,守护较为有利的洲滩格局,防止腊林洲边滩侧蚀后退,同时还适当恢复腊林洲低滩的滩体,是强化和稳定该水道“南槽-北汊”航道格局的关键基础。

参考文献:

- [1] 张为,李义天,江凌.三峡水库蓄水后长江中下游典型分汊浅滩河段演变趋势预测[J].四川大学学报(工程科学版),2008,40(4):17-24.(ZHANG W,LI Y T,JIANG L.Fluvial process change of the typical multi-branched meandering reach in the mid-down Yangtze River after Three Gorges Dam impoundment [J].Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2008,40(4):17-24.(in Chinese))
- [2] ZHOU G,WANG H,SHAO X J,et al.Numerical model for sediment transport and bed degradation in the Yangtze River channel downstream of Three Gorges Reservoir[J].Journal of Hydraulic Engineering,ASCE,2009,135(9):729-740.
- [3] 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 Y J,WANG Z Y,ZUO L Q,et al.2-D 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))
- [4] MOTTA D,ABAD J D,LANGENDOEN E J,et al.A simplified 2-D model for meander migration with physically-based bank evolution [J].Geomorphology,2012,163:10-25.
- [5] SUN J,LIN B L,KUANG H W.Numerical modelling of channel migration with application to laboratory rivers[J].International Journal of Sediment Research,2015,30(1):13-27.
- [6] WANG H,ZHOU G,SHAO X J.Numerical simulation of channel pattern changes: part I: mathematical model[J].International Journal of Sediment Research,2010(4):366-378.
- [7] WANG G Q,XIA J Q,WU B S.Numerical simulation of longitudinal and lateral channel deformations in the braided reach of the lower Yellow River[J].Journal of Hydraulic Engineering,ASCE,2008,134(8):1064-1078.
- [8] CHEN D,DUAN J G.Case study: two-dimensional model simulation of channel migration processes in West Jordan River, Utah[J].Journal of Hydraulic Engineering,ASCE,2008,134(3):315-327.
- [9] 钟德钰,张红武.考虑环流横向输沙及河岸变形的平面二维扩展数学模型[J].水利学报,2004(7):14-20.(ZHONG D Y,ZHANG H W.Extended 2-D numerical model for alluvial river considering transverse transport of sediment and bank erosion due to secondary flow in river bends[J].Journal of Hydraulic Engineering,2004(7):14-20.(in Chinese))
- [10] 假冬冬.非均质河岸河道摆动的三维数值模拟[D].北京:清华大学,2010.(JIA D D.Three-dimensional numerical simulation of lateral migration of alluvial channels with composite banks[D].Beijing:Tsinghua University,2010.(in Chinese))
- [11] JIA D D,SHAO X J,WANG H,et al.Three-dimensional modeling of bank erosion and morphological changes in the Shishou bend of the middle Yangtze River[J].Advances in Water Resources,2010,33(3):348-360.
- [12] 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 D D,SHAO X J,WANG H,et al.Three dimensional mathematical modeling for fluvial processes considering bank erosion[J].Advances

in Water Science, 2009, 20(3): 311-317. (in Chinese))

- [13] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis: I: theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1988, 114(2): 134-150.
- [14] 假冬冬, 张幸农, 应强, 等. 流滑型崩岸河岸侧蚀模式初探[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 813-817. (JIA D D, ZHANG X N, YING Q, et al. Preliminary study on the analytical model for slide collapse of riverbanks [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 813-817. (in Chinese))

3-D numerical simulation of the influences of bank erosion processes on navigation conditions: case study of the Taipingkou Waterway on the middle Yangtze River*

JIA Dongdong¹, XIA Haifeng², CHEN Changying¹, ZHANG Xingnong¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. CCCC Dredging (Group) Company Limited, Beijing 100088, China)

Abstract: Riverbank erosion occurs frequently on the middle Yangtze River, which may result in the instability of the channel navigation. A new riverbank erosion model for the cohesive material was developed by considering the effects of adjacent cohesion. On the basis of 3-D flow and sediment transport model and the mechanisms of riverbank erosion, a 3-D morphological model for the Taipingkou Waterway on the middle Yangtze River was developed by using the adaptive grid system. The 3-D model was calibrated by the observed data, and the simulated results agreed with the measured data. The influences of riverbank erosion processes on the navigation conditions were simulated by the numerical model. The developed model is able to calculate the complex morphological changes due to bank erosion. Bed degradation and bank erosion are enhanced with less sediment load input. Simulated results indicated that the riverbank stability of Lalinzhou is critical for the stability of navigation conditions on the Taipingkou Waterway.

Key words: bank erosion processes; navigation conditions; 3-D numerical simulation; the middle Yangtze River

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51579151; No. 51679147).