



太平洲捷水道航道整治工程对主江的影响分析

李有为, 沈磊, 雷雪婷, 陈婧, 王晓燕

(长江航道规划设计研究院, 湖北武汉 430011)

摘要: 太平洲捷水道位于长江下游太平洲右汉, 属于典型的感潮河段。太平洲左汉是长江通航主江, 近期正在积极开展长江口 12.5 m 深水航道建设。太平洲捷水道整治在达到本河段治理目标的同时, 需要充分认识到其对主江各方面的影响, 并做好相应的对策。从水沙动力角度入手, 建立了扬中河段潮流泥沙数学模型, 在河床演变分析的基础上, 针对捷水道重点碍航区域顺应治理思路, 概化出多种强度高、治理范围广的工程措施, 分别从定床、动床两方面来分析其对主江水流、河床变形的影响。

关键词: 潮流泥沙数值模拟; 非恒定流; 相对冲淤; 分流比

中图分类号: P 733; TV 142

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)12-0051-07

Impact of Taipingzhou shortcut waterway regulation engineering on the main river

LI You-wei, SHEN Lei, LEI Xue-ting, CHEN Jing, WANG Xiao-yan

(Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

Abstract: Taipingzhou shortcut waterway lies to the right branch of Taipingzhou in the lower Yangtze and it belongs to a typical tidal reach. The left branch of Taipingzhou is the main navigation channel, and the 12.5 meter Deep Waterway Project in the Yangtze Estuary to be implemented in the near future. During regulation engineering of Taipingzhou reach, we need to fully recognize its impact on the main river, and take relevant countermeasures. This paper establishes an unsteady 2-D shallow water flow tidal sediment mathematical model for the Yangzhong reaches and analyzes the impacts of Taipingzhou reach regulation engineering on the river bed evolution of the main river.

Keywords: tidal sediment mathematical model; unsteady flow; relative erosion and siltation; split ratio

太平洲捷水道位于长江下游太平洲右汉, 两岸为镇江的扬中、丹阳和镇江新区。近年来, 镇江市大力实施“以港兴市、以港兴城”战略, 充分发挥港口岸线的资源配置作用, 大力发展临港经济, 助推产业结构升级, 港口经济成为推动全市经济发展的重要力量。随着港口资源利用速度的明显加快, 岸线资源不足问题已十分突出, 剩余深水岸线主要分布在太平洲捷水道两岸及洲岛区域, 加之太平洲捷水道两岸已初步形成了一定规模的临港产业开发区, 因此对太平洲捷水道港口开发的需求日益旺盛。根据《镇江港总体规划》和《镇江市长江岸线开发利用总体规划》(修编稿), 夹江岸线规划为 1 000 ~ 10 000 吨级港口岸线。

航道是港口发展的基础, 港口岸线的发展需

要稳定、畅通的航道。而太平洲捷水道已开辟为公用航道, 由长江航道局南京航道局扬中航道管理处负责维护。2013 年以前, 太平洲捷水道航道维护自然水深 2.8 m, 仅限 200 总吨以下船舶通过, 沿江港口经济发展受到制约。2013 年 8 月 8 日, 太平洲捷水道航道维护尺度提高工作正式启动, 确定按照“积极稳妥、统筹规划、分步实施、提升能力”的总要求, 解决太平洲捷水道航道尺度提升的问题, 确定按照充分利用自然水深原则, 先行提高太平洲捷水道航道维护尺度, 并于 2013 年 12 月 29 日将航道维护水深提高到 3.5 m, 航宽不低于 100 m, 达到国家 I 级航道的标准。该尺度仅能满足 2 000 吨级内河船舶通航要求, 对于岸线规划的 2 000 吨级以上江海轮, 航道水深和航

收稿日期: 2014-10-08

作者简介: 李有为 (1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事航道科研与设计工作。

宽均不足,且受河道演变影响,太平洲捷水道上段的航道条件还不稳定,部分航段内弯曲半径不足,航道条件较差,存在出浅、碍航的可能,必须实施必要的航道整治工程,提高航道尺度,改善船舶通航条件,以充分利用港口岸线资源。

在夹江航道目前尚未定级的条件下,根据太平洲捷水道的实际情况以及拟分流主江的船舶尺度,捷水道航道整治标准定为Ⅰ级航道,全河段尺度 $5.0\text{ m}\times 200\text{ m}\times 800\text{ m}$ (水深 \times 航宽 \times 弯曲半径),保证率为98%。满足3 000吨级江海直达船通航,设计代表船型尺度为 $80\text{ m}\times 15.7\text{ m}\times 4.2\text{ m}$ (船长 \times 型宽 \times 满载吃水)。

近期长江南京以下12.5 m深水航道二期工程正在稳步推进中,作为扬中河段主要汉道的太平洲捷水道在实施整治工程并达到治理目标后,工程本身可能对主江造成一定的影响。为充分评估其影响的程度,从水沙动力角度入手,建立了扬中河段潮流泥沙数学模型,在河床演变分析的基础上,概化出多种强度较大的工程措施,分别从定床、动床两方面分析其对主江水流、河床变形的影响。

1 河道特性

太平洲捷水道全长约43.9 km,河道窄浅而弯曲,平均河宽573 m,平均水深8.5 m,从河道形态来看,河道总的趋势是由中段弯曲段接两个较长的微弯顺直河段组成,其中中段由大路弯道、兴隆弯道、姚桥弯道和九曲河弯道4个弯道组成,兴隆河弯为中间放宽的小炮沙分叉河道,其它3个河弯为单一的弯曲河道,弯道段局部河道曲折系数为1.8左右。太平洲捷水道经多年堤防建设后,原弯道凹岸的崩塌已得到一定程度的控制,多年分流比维持在10%,分沙比略小于分流比,是长江下游河势较为稳定的支叉河道。

2 河床演变分析

2.1 近期演变

1) 岸线及浅滩演变。

太平洲捷水道历史上平面形态变化不大,比

较多年来河段0 m等深线变化可知:本河段岸线基本稳定,岸线变化较小,仅在大路弯道的凸岸段、小炮沙头部及洲体右缘、姚桥闸凸岸3处变化略大。经水利部门护岸及护岸加固工程后,河势趋于稳定,2001年来,岸线变化幅度趋小,最大变化幅度仅约175 m。从0 m等深线来看,在1976、1991、1998年,水道上段河心存在0 m心滩,在2010、2013年新港河口附近贴左岸也形成约 $450\text{ m}\times 160\text{ m}$ 的0 m心滩。

2) 主流变化。

本河段内水流受岸线约束后,主流摆动幅度已逐年减小。但在水道较为宽浅的进口顺直段、大路河弯的进口段、兴隆弯道小炮沙汉道段的分汇流区内及水道九曲河弯以下较长的顺直段等4处位置,深泓变化幅度较大,最大摆动幅度约330~800 m;其他河段深泓较为稳定,摆动幅度不大。

从深泓纵剖面资料来看,在深泓摆动较大部位,水深相对较浅、河道冲淤变化幅度相对较大,且多年来位置比较稳定。捷水道内水深上浅下深,进口顺直段、大路弯道及中段小炮沙水深最浅,是需要重点整治的部位;小炮沙以下河道水深较深,但结合河段内深槽平面变化图可以看出,在深泓摆动较大的九曲河弯以下的长顺直段部位,深槽平面变化幅度也较大,仍存在航道水深不足、航道宽度较窄、局部航线不稳等问题。

3) 5 m深槽变化。

太平洲捷水道全河段内基本上具备了提高至5 m的河道条件,而针对5 m等深线,仍在捷水道进口段及中上段存在局部浅险区域,分别是进口浅滩、大路弯道扬中大桥下游边滩和兴隆弯道。从2013年9月捷水道最新测图分析:大桥以上航槽5 m等深线虽然贯通,但5 m深槽线型不规则、平顺,特别是在扬中大桥以下约600 m,形成一个伸入河心的舌状浅梗,浅梗内局部水深仅约2.5 m,影响该段的航道条件。近年5 m等深线比较见图1。

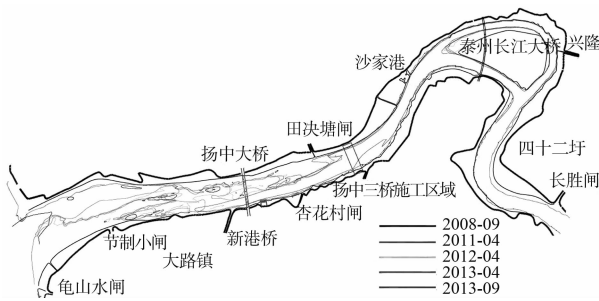


图 1 太平洲捷水道 5 m 等深线比较

2.2 碍航特性

从该段多年来的变化来看, 捷水道上游的两处浅滩仍处于变化之中, 其中, 太平洲进口浅滩头部有向河道中央发展的趋势, 原右岸航槽的水深达不到维护标准; 扬中大桥下游边滩有逐渐向下游偏右岸推移的趋势, 边滩的上角有明显向桥区航道中央延伸趋势。扬中大桥下游杏花村至扬中三桥, 受田决塘闸边滩影响, 5 m 等深线较窄。捷水道中段兴隆弯道即小炮沙河道段航宽、弯曲半径均较小, 航道条件较差, 其他河段水深条件良好, 5 m 等深线贯通, 弯曲半径均能达到 800 m 以上, 航道条件较好。捷水道扬中二桥以下河段 9 m 等深线贯通, 10 m 等深线时断时通, 航道条件好于进口段及中段。

2.3 治理思路

根据太平洲捷水道建设标准及航道存在的主要问题, 结合今后的发展趋势, 确定太平洲捷水道航道整治的关键在于小炮沙以上河段的治理, 其思路为: 在已有河势控制工程的基础上, 充分利用目前较为有利的滩槽格局, 通过对水道内浅滩段实施整治, 稳定航道边界, 提高航道水深; 同时辅以切滩措施, 增加弯曲段弯曲半径, 改善通航条件, 实现航道整治目标。

3 模型研究方案

基于太平洲捷水道河床演变分析结论和碍航特性, 结合治理思路, 整治工程方案拟在捷水道进口段右岸实施护滩工程、扬中大桥下游左岸实施潜丁坝及接岸工程、小炮沙洲头鱼骨坝及根部护岸工程、小炮沙洲尾右岸切滩及护岸工程。其

整治建筑物主要功能为: 守护进口段凸岸边滩, 抑制其冲刷后退, 确保凹岸深槽稳定; 守护凸岸边滩, 防止桥区下游段深槽摆动, 稳定深槽位置, 确保航道水深达到建设标准; 适当提高分流区低滩高程, 稳定两汉分流比, 守护洲头高滩, 防止越滩流对洲头高滩的冲刷; 增加出口段弯曲半径, 并对新形成的岸线进行守护, 防止其冲刷后退。

考虑到工程平面布置和结构设计还在深入进行中, 为了充分认清太平洲捷水道治理对主江的影响程度, 模型研究方案在工程范围和强度两方面做了足够大的加强, 以求模拟出未来实施工程可能引起的水道最大改变效果。基于此, 模型研究方案设计如下: 在进口右岸低滩区沿整治线满铺 2 m; 在扬中大桥下游左岸潜丁坝区沿整治线范围全部抬高至 1.6 m (85 国家高程, 下同); 在小炮沙洲头鱼骨坝区满铺 2 m; 扩大小炮沙洲尾右岸切滩区, 地形疏浚至 -6 m。方案平面布置见图 2。

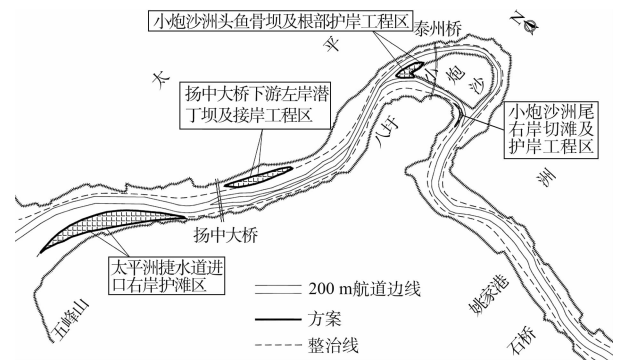


图 2 航道整治工程模型研究方案平面布置

4 数学模型

4.1 基本控制方程

为了便于应用数值格式求解, 浅水二维水沙动力数学模型基本控制方程可以表述为如下的守恒形式:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{\mathbf{F}}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{\mathbf{G}}}{\partial y} + \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \\ hc_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \\ huc_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + gh^2/2 \\ hvc_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\tilde{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \nu_t h (\partial u / \partial x) \\ \nu_t h (\partial v / \partial x) \\ \varepsilon_c h (\partial c_k / \partial x) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \nu_t h (\partial u / \partial y) \\ \nu_t h (\partial v / \partial y) \\ \varepsilon_c h (\partial c_k / \partial y) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{bx} - S_{fx}) \\ gh(S_{by} - S_{fy}) \\ -\alpha_{sk} \omega_{sk} (S_k - S_{*k}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： t 为时间； x 和 y 为空间坐标； h 为水深； u 和 v 为 x 和 y 方向的水流流速； c 为垂向平均总含沙量； c_k 为第 k 组泥沙深度平均含沙量； g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2 ； \mathbf{U} 为守恒量向量； \mathbf{F} 和 \mathbf{G} 为 x 和 y 方向的通量向量； $\tilde{\mathbf{F}}$ 和 $\tilde{\mathbf{G}}$ 为 x 和 y 方向的扩散项向量； \mathbf{S} 为源项向量； S_{bx} 、 S_{by} 分别为 x 和 y 方向的地形坡度， $S_{bx} = \partial z_b / \partial x$ ， $S_{by} = \partial z_b / \partial y$ ； z_b 为河床高程； S_{fx} 、 S_{fy} 分别为 x 和 y 方向的阻力坡度， $S_{fx} = n^2 u \sqrt{(u^2 + v^2)} / h^{4/3}$ ， $S_{fy} = n^2 v \sqrt{(u^2 + v^2)} / h^{4/3}$ ； n 为Manning糙率系数。

4.2 数值方法

1) 离散方程。

为了更好地模拟天然河道边界，计算网格采用非结构三角形网格，对于某一个单元而言，模型基本变量 h 、 u 、 v 和 c 存储在单元中心，地形高程则存储在单元节点上，从而保证了地形在各单元界面处的连续变化。根据本模型计算网格拓扑关

系，方程(1)的离散方程可以写成如下形式^[1]：

$$\frac{d\mathbf{U}_i}{dt} = -\frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^3 \mathbf{E}_{i,j}^* \cdot \mathbf{n}_{i,j} \Delta L_{i,j} + \frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^3 \mathbf{S}_{b i,j}^* \Delta L_{i,j} + \mathbf{S}_{fi} \quad (8)$$

式中： \mathbf{U}_i 和 \mathbf{S}_{fi} 为体积平均值，存储在网格中心； \mathbf{E}^* 为单元界面的法向通量的值， $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$ 为界面法向单位向量； $\Delta L_{i,j}$ 为第 i 个单元对应的第 j 条边的长度。

2) 通量计算。

式(8)中 \mathbf{E}^* 采用HLLC近似黎曼算子计算，本文模型参考了Begnudelli和Sanders方法，通过改值进行通量计算，可以获得具有二阶精度的模型。二阶数据重构计算包括两步：①求单元中心各水力要素的预测值；②求界面的各水力要素值。

3) 源项处理

式(1)的源项由底坡项和阻力项组成，对于源项的处理得当与否直接影响着模型的稳定性和精度。对于底坡项而言，本文采用Valiani和Begnudelli^[2]提出的DFB方法，为了避免小水深情况下出现的不稳定现象（特别是在干湿边界附近），采用全隐式方法处理阻力项。

采用一般的显式方法处理阻力项，模型在模拟计算时，一旦遇到小水深情况时经常会出现不稳定现象，特别是在干湿边界附近，模型甚至会崩溃。为了避免这种情况的发生，参考Yoon^[3]，本文采用全隐式方法处理阻力项。

4) 时间步长。

模型在时间上的离散采用的是显式格式，为了保证模型的稳定性，需要满足CFL（Courant-Friedrichs-Levy）线性稳定条件：

$$\Delta t = \frac{Cr}{\max_{i=1, \dots, N_c} (A_i / \beta \max_{k=1,2,3} |\lambda_k^\perp L_k|)} \quad (9)$$

式中： N_c 为单元数； λ_k^\perp 为垂直于第 k 条边的特征值； Cr 为柯朗数，一般需要满足 $Cr \leq 1$ ，本文所有计算中，取 $Cr = 0.95$ 。

5) 河床变形。

在水流、含沙量计算稳定后，再根据式(8)进行河床冲淤计算：

$$\Delta z = \frac{\Delta T}{\rho'} \sum \alpha_{ck} \omega_k (c_k - S_{*k}) \quad (10)$$

式中: ΔT 为分级时间。

4.3 模型验证

扬中河段数学模型的上边界为五峰山, 下边界为利港闸, 计算区域长江主河道总长约 78 km, 包括太平洲左右两汉和砲子洲、禄安洲汉口, 以及淮河入江水道、泰州引江河等主要支汉。采用非结构三角形网格对研究河段进行剖分, 网格数为 71 105 个计算单元, 网格尺度 10 ~ 200 m。为了达到模型计算效率与工程研究对网格精度要求的最佳平衡, 根据不同情况采用不同密度的网格: 对于地形变化较缓的滩地采用稀网格, 对于捷水道区域采用密网格。定床模型水文条件采用同步观测的水文测验资料, 2011-01-05 T10:00—01-06 T17:00 潮汐作用较强的枯水中潮期, 相应长江流量为 16 900 m³/s, 淮河流量为 0。动床模型水文条件采用 2011 年 1 月—2012 年 12 月水沙条件。验证起算地形均为 2011 年 1 月实测地形, 验证地形为 2012 年 12 月实测地形。

通过调整河道糙率、边壁阻力系数、涡黏系数等来符合模型计算值与实测值。水位、流速验证见表 1 和 2, 地形冲淤验证见图 3。各潮位站实测与计算值比较接近, 水位验证误差小于 ±0.10 m, 流速验证误差在 ±10% 以内, 模型计算冲淤形态分布与实测值符合较好, 定量上也满足规范要求。经验证后的模型能够反映本河段潮流运动特性, 能够模拟本河段河床冲淤规律, 模拟精度满足 JTS/T 231-2—2010《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》的要求, 能用来开展方案试验研究。

表 1 水位验证 m

水尺位置	涨急时刻		落急时刻	
	实测	误差	实测	误差
1L(主江五峰山)	1.118	0.003	1.019	-0.001
13L(小炮沙左汉)	1.393	0.002	0.895	-0.002
14L(捷水道出口)	1.575	0.000	0.745	0.001
7L(主江小明港)	1.433	0.002	0.792	-0.001
12L(主江界河口)	1.666	-0.002	0.618	0.001

表 2 垂线平均流速验证 m/s

水尺位置	涨急时刻		落急时刻	
	实测	误差	实测	误差
KAZ1(主江五峰山)	0.42	-0.04	0.96	-0.03
KAZ2(捷水道进口)	0.02	0.02	0.68	-0.03
KAZ10(捷水道出口)	0.05	0.01	0.68	0.01
KAZ7(主江小明港)	0.09	0.00	0.74	0.03
KAZ12(主江界河口)	0.14	0.00	0.81	0.04

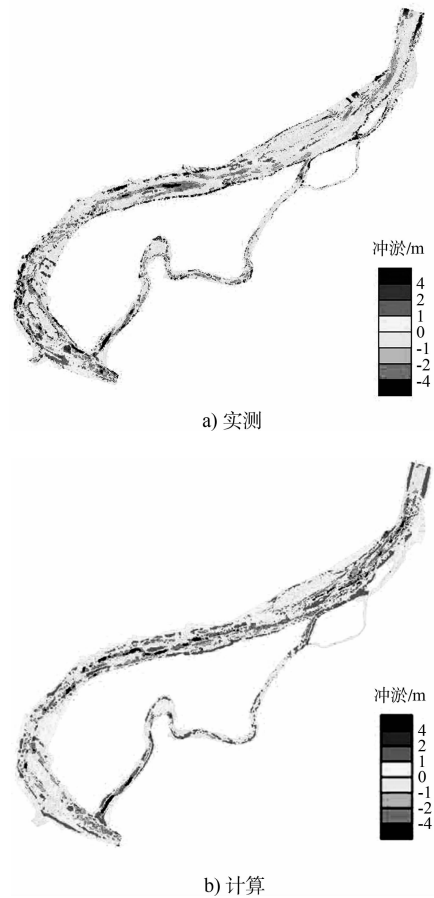


图 3 扬中河段实测与计算地形冲淤分布 (2011 年 1 月—2012 年 12 月)

5 方案试验

5.1 试验水文条件

定床试验水文条件选择验证时用的实测 2011 年 1 月过程, 起算地形为相应的 2011 年 1 月实测地形, 为分析洪水期工程的影响, 增算 1 组洪水条件 (长江流量: 85 400 m³/s, 淮河流量为 15 000 m³/s), 研究对象为水位、流速变化的变幅。

本次模型研究不涉及到工程方案比选, 主要用于计算强度最大的工程方案实施后对河道冲淤及航道条件可能的影响, 因此动床模型主要做系列年研究。选择三峡正常蓄水运行以后的水文系列作为优

选水文系列。根据前期河床演变分析，大水年对本河段航道演变不利，而近期2010年是三峡高水运行以来流量最大的年份，2012年来水来沙量也非常大，因此本次计算选择2008年（中水年）+2009年（中水年）+2010年（大水年）+2011年（枯水年）+2012（大水年）年共5a作为系列年，该系列年涵盖大、中、小水年，具有一定的代表性。动床试验起算地形为2012年12月实测地形。

5.2 试验结果

1) 定床模型。

定床模型有无工程条件下的试验结果见表3、图4。可以看出，工程的影响局限在捷水道内部，最大水位壅高0.014 m，最大水位降低0.033 m，对主江水位、流速基本无影响。

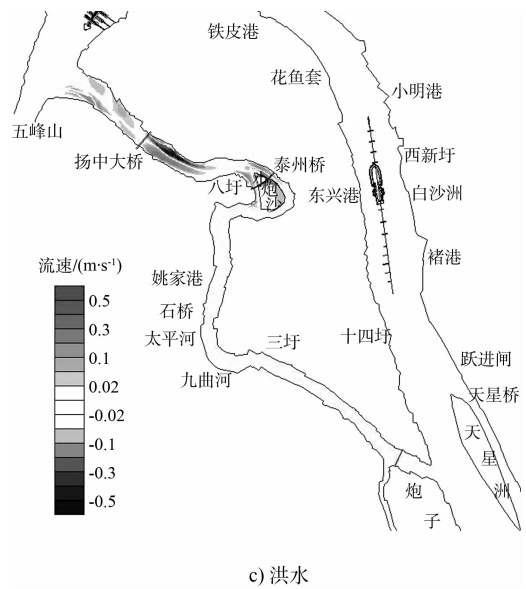
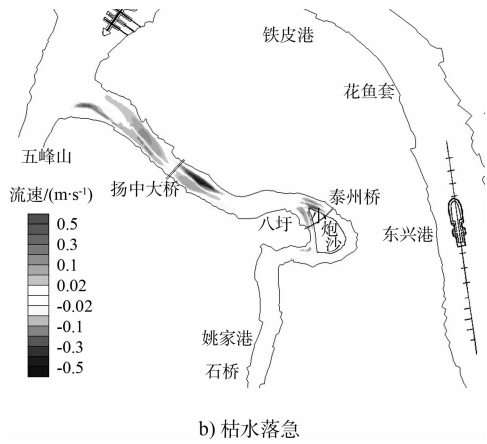
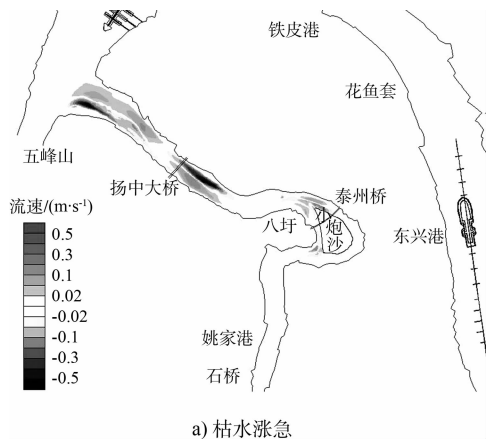


图4 各水文条件下有无工程流速变化分布

表3 有无工程条件下扬中河段水位变化

河段	枯水涨急			枯水落急			洪水		
	无工程	有工程	水位差	无工程	有工程	水位差	无工程	有工程	水位差
1L(主江五峰山)	1.118	1.118	0.000	1.019	1.019	0.000	6.090	6.090	0.000
13L(小炮沙左汊)	1.393	1.407	0.014	0.895	0.887	-0.008	5.851	5.818	-0.033
14L(捷水道出口)	1.575	1.575	0.000	0.745	0.745	0.000	4.977	4.977	0.000
7L(主江小明港)	1.433	1.433	0.000	0.792	0.792	0.000	5.279	5.279	0.000
12L(主江界河口)	1.666	1.666	0.000	0.618	0.618	0.000	4.645	4.645	0.000

2) 动床模型。

动床模型主要研究对象为有无工程条件下的河床相对冲淤变幅（图5）及各年末主要汉道的分流比变化（表4），以弄清楚工程对河床本身调整的影响范围和力度。从图表可以看出，捷水道航道整治工程对河床的调整影响主要集

中在捷水道内部，各年末主江河床均不发生因工程本身而引起的冲淤变形。经过系列年河床的自身调整，各年末主江分流比变化幅度较小，太平洲左汊最大增加0.09%，落成洲左汊最大增加0.06%，天星洲和禄安洲汊道分流比无变化。

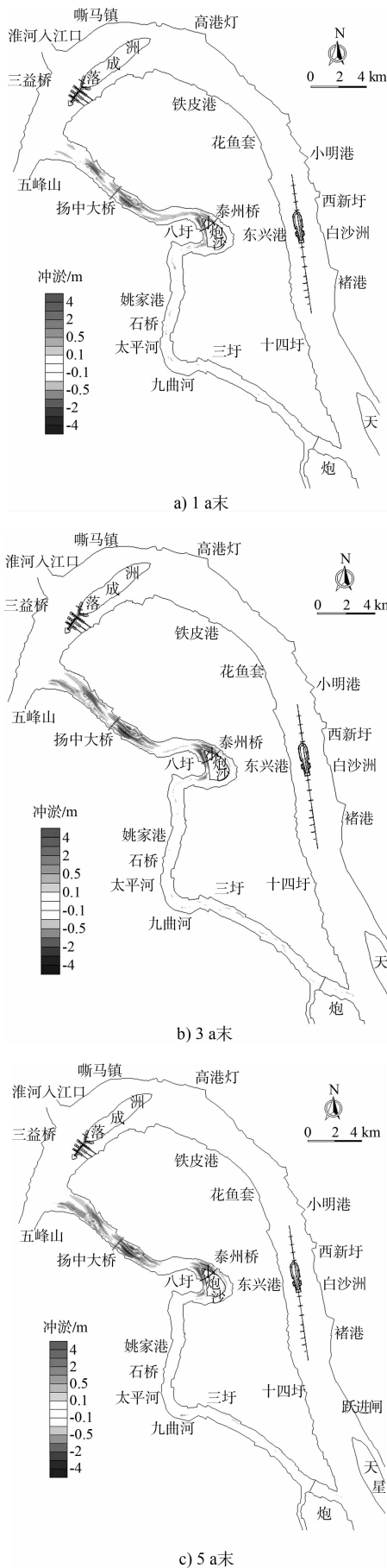


图 5 系列年末有无工程条件下相对冲淤变化分布

表 4 有无工程条件下系列年末主江汉道分流比变化 %

汉道	1 a 末	2 a 末	3 a 末	4 a 末	5 a 末
太平洲左汉	0.09	0.06	0.03	0.01	0.00
落成洲左汉	0.06	0.04	0.02	0.01	0.00
天星洲右汉	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
禄安洲左汉	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

6 结语

1) 建立了扬中河段潮流泥沙数学模型, 模型验证情况良好, 能准确反映河道潮流泥沙运动特性, 模拟精度能满足规范要求。

2) 定床试验结果表明, 经过高强度、大范围的整治工程建设后, 工程对河道的影响仅局限在捷水道内部, 其中水位最大壅高 0.014 m, 水位最大降低 0.033 m, 流速变化幅度在 0.5 m/s 以内, 对主江的水流条件基本无影响。

3) 动床试验结果表明, 有无工程条件下的河床相对冲淤变幅在 2 m 以内, 且冲淤部位集中在捷水道内部, 对主江河床变形无影响。从各年末主江的分流比变化来看, 整治工程实施后, 主江分流比最大增加 0.09%, 落成洲左汉最大增加 0.06%, 随着年份的推移, 分流比变化趋势不变, 但数值逐年减小, 到第 5 a 末, 主江分流比基本无变化。

4) 太平洲捷水道航道整治工程的实施对主江的影响程度较小, 工程影响范围主要集中在捷水道内部, 在后续治理方案研究过程中, 工程对主江的影响幅度应在本文结果之内。

参考文献:

[1] 岳志远, 曹志先, 李有为. 基于非结构网格的非恒定流浅水二维有限体积数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2011, 26(3): 359-367.

[2] Valiani A, Begnudelli L. Divergence form for bed slope source term in shallow water equations [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(7): 652-665.

[3] Yoon T, Kang S. Finite-volume model for two-dimensional shallow water flows on unstructured grids [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(7): 678-688.

(本文编辑 武亚庆)