



# 长江上游胡家滩航道整治数值模拟研究\*

钟亮<sup>1,2</sup>, 许光祥<sup>1,2</sup>, 周鑫靖<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 长江上游胡家滩为弯曲展宽河段浅滩。探讨了胡家滩浅滩河段河床演变特征、碍航特性及滩险成因, 提出了航道整治思路与方案。应用平面二维水流泥沙数学模型, 采用2002—2011年的水沙序列资料, 对方案整治效果进行分析。结果显示, 整治后航槽流速增加且不会成为急滩, 消落期航槽内泥沙冲刷加强, 起冲时间提前, 冲刷历时延长, 航道尺度满足规划要求, 航槽基本稳定, 说明采用筑坝、疏浚与炸礁相结合的方法对胡家滩浅滩航道整治较为有效。

**关键词:** 弯曲展宽河段; 浅滩; 航道整治; 数值模拟

中图分类号: U 617.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0153-08

## Numerical simulation of Hujiatan waterway regulation in upper reaches of the Yangtze River

ZHONG Liang<sup>1,2</sup>, XU Guang-xiang<sup>1,2</sup>, ZHOU Xin-jing<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Hujiatan waterway is a bending and broadening reach located in the upper reaches of the Yangtze River. This paper studies the bed evolution characteristics, navigation-hindering features, and formation causes of Hujiatan shoal waterway, and puts forward the waterway regulation ideas and schemes. The regulation effects are analyzed using 2-D flow and sediment mathematical model and based on the flow and sediment data of year 2002 to 2011. The results show that after the regulation, the navigation channel flow velocity increases and the reaches will not turn into rapids. Moreover, in the water level fluctuating period, the channel sediment erosion strengthen, the scour starting time advanced and the erosion duration prolonged. Correspondingly, the channel scale meets the design requirements and can remain stable, which indicates that the combined methods of construction of dikes, dredging and reef blasting are effective to Hujiatan shallow shoal regulation.

**Keywords:** bending and broadening reach; shallow shoal; waterway regulation; numerical simulation

依托长江黄金水道建设长江经济带近期已提升为国家经济持续发展的战略需求。长江重庆市主城区河段内有多个大型港区, 是长江黄金水道的重要组成部分, 根据交通运输部《长江干线航道总体规划纲要》, 该河段航道等级规划为内河I级, 至2020年航道尺度应达到3.5 m × 150 m × 1 000 m (设计水位下航深 × 航宽 × 弯曲半径)。然而, 受胡

家滩、砖灶子、九龙滩、铜元局和猪儿碛等滩险影响, 该河段的现状航道等级仅为Ⅲ级, 维护尺度2.7 m × 50 m × 560 m, 且每年需进行维护疏浚才能保证最小航道尺度要求, 与长江黄金水道建设很不匹配, 亟待开展相关滩险的整治工作。

胡家滩河段位于马桑溪长江大桥下游约2.4 km处, 距宜昌航道里程679.3 ~ 680.7 km, 左岸岸壁

收稿日期: 2014-09-11

\*基金项目: 重庆市科委自然科学基金计划资助项目 (cstc2012jjA00020); 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJ120403)

作者简介: 钟亮 (1980—), 男, 博士, 副教授, 从事航道整治理论与技术研究。

陡峭,右岸为倒钩碛大边滩,下游紧接 $90^\circ$ 的急转弯道(骆公子弯道),枯水期展宽比1.73,洪水期展宽比1.49,属典型的弯曲展宽河段(图1),因水流在展宽段流速减缓且趋于均匀,泥沙易在环流较弱的弯道进口附近落淤出浅,形成碍航浅滩。弯曲展宽河段浅滩是长江上游枯期需重点维护的滩险<sup>[1-2]</sup>,其整治方法主要是通过布置整治建

筑物束水攻沙,调整弯道环流,保持航槽稳定,必要时配合疏浚或炸礁措施增大弯曲半径,确保船舶安全航行。本文将在分析胡家滩浅滩河段河床演变特征、碍航特性及滩险成因的基础上,提出航道整治思路及方案,应用平面二维水流泥沙数学模型,采用2002—2011年的水沙序列资料,对方案整治效果进行分析评价。

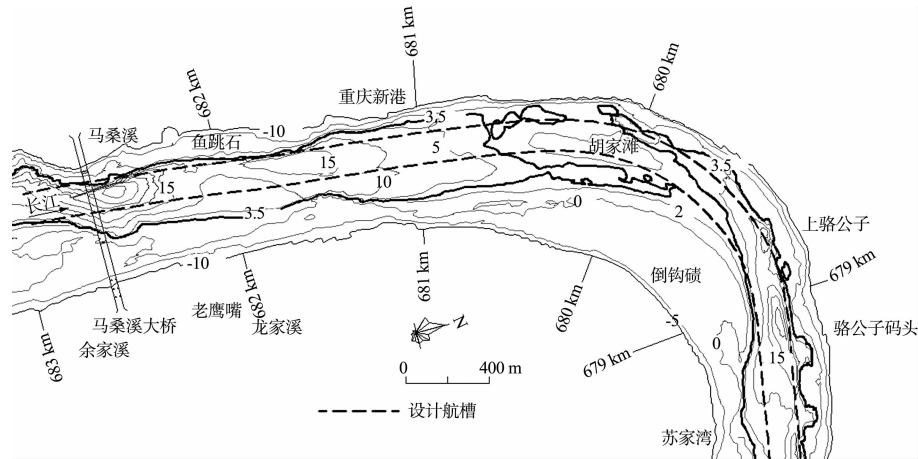


图1 长江胡家滩河段河势(水深:m,下同)

## 1 滩险概况

### 1.1 水文泥沙

胡家滩位于长江重庆市主城区河段,距嘉陵江与长江的汇合口约21 km,工程河段水位受两江汇流比和寸滩水位影响,水沙条件涉及长江寸滩、朱沱水文站和嘉陵江北碛水文站。

#### 1.1.1 水文特性

##### 1) 测站概况。

胡家滩河段上游126 km有长江朱沱水文站,下游28 km有长江寸滩水文站,嘉陵江距朝天门汇合口54 km有北碚水文站,各水文站(简称“3站”)均有较丰富的水文泥沙资料,对研究河段的水沙条件形成了较为完整的控制,本文根据1954—2011年资料统计了3站特征流量。

长江朱沱水文站位于重庆市永川区朱沱镇,控制流域面积69.5万 $\text{km}^2$ ,1954年4月由长江水利委员会设立。朱沱站多年平均洪水流量37 100  $\text{m}^3/\text{s}$ ,多年平均流量8 523  $\text{m}^3/\text{s}$ ,径流年际变化不大,但年内分配不均,5—10月径流量约占全年径流量的79%。

长江寸滩水文站位于嘉陵江和长江汇合口下游7 km处,控制流域面积86.7万 $\text{km}^2$ ,1939年设站,基本水尺位于左岸沙帽石,1956年下迁600 m至三家滩观测至今。经与重庆海关建立关系插补延长,该站具有1892年至今的水位、流量资料。寸滩站多年平均洪水流量51 600  $\text{m}^3/\text{s}$ ,多年平均流量10 911  $\text{m}^3/\text{s}$ ,径流年际变化不大,但年内分配不均,5—10月径流量约占全年径流量的74%。

嘉陵江北碚水文站是嘉陵江流域的出口控制站,控制流域面积15.7万 $\text{km}^2$ (约占嘉陵江流域总面积的99%),1939年设站,测验河段位于温塘峡下段,有1954年至今的长系列观测资料。北碚站多年平均洪水流量24 500  $\text{m}^3/\text{s}$ ,多年平均流量2 066  $\text{m}^3/\text{s}$ ,径流量年内分配不均,汛期5—10月径流量约占全年径流量的83%。

##### 2) 汇流比。

设汇流前长江干流流量为 $Q_c$ ,嘉陵江流量为 $Q_j$ ,定义长江汇流比 $R_c = Q_c / (Q_c + Q_j)$ 。根据1990—2011年的实测资料,统计了分级流量的特征汇流比,结果表明<sup>[3]</sup>,各级流量平均值 $R_c =$

0.625~0.877, 总体平均值为0.834, 各级流量下出现概率最多的汇流比为0.87, 当总流量超过20 000 m<sup>3</sup>/s后, 嘉陵江大于长江流量的概率明显增大, 最大可达16.3%。

### 3) 三峡成库对寸滩水位的影响。

分析认为<sup>[3]</sup>, 当三峡水库坝前水位  $Z \leq 156$  m (全文均为吴淞高程系统) 时, 坝前蓄水对寸滩站水位-流量关系基本无影响, 仍保持成库前的天然状态; 当  $Z > 156$  m 后, 寸滩水位-流量关系呈绳套现象, 可通过流量分段来拟合水位计算公式。

## 1.1.2 泥沙特性

### 1) 输沙量和含沙量。

寸滩、朱沱和北碚站 1956—2011 年间的悬移质年均输沙量分别为3.88亿、2.86亿和1.04亿 t, 悬移质含沙量分别为1.135、1.077和1.596 kg/m<sup>3</sup>; 而1990—2011年间的悬移质年均输沙量分别为2.80亿、2.43亿和0.36亿 t, 悬移质含沙量分别为0.827、0.909和0.580 kg/m<sup>3</sup>; 说明1956年以来悬移质输沙量和含沙量整体上均呈减少趋势, 1990年后尤为明显, 悬移质输沙量的减少主要源于含沙量的减小, 影响比例为97%~98%, 径流量减小的影响仅占2%~3%。三站悬移质输沙主要集中在汛期, 7—9月主汛期输沙量超过年总量的77%, 5—10月汛期输沙量超过年总量的97%。

寸滩、朱沱站 1966—2011 年间的卵石推移质输沙量分别为18.1万和23.7万 t, 1990—2011年间则分别为10.5万和18.5万 t, 卵石推移质输沙量整体呈减少趋势。此外, 寸滩站 2003—2011 年的沙质推移质输沙量也呈明显的递减趋势, 2011年输沙量不到2003年的6%。推移质输沙也主要集中在汛期, 1—3月及12月基本无卵石推移质运动。

### 2) 泥沙粒径。

3站悬移质颗粒较细, 粒径范围0.002~0.86 mm, 中值粒径0.007 5~0.038 1 mm; 比较而言, 朱沱站较粗, 寸滩站次之, 北碚站最细。寸滩、朱沱两站 2001—2010 年间卵石推移质粒径范围8~170 mm, 中值粒径分别为36.7、36.2 mm。寸滩站 2003—2011 年间沙质推移质粒径

范围0.03~2 mm, 中值粒径0.279 mm。据胡家滩河床沙质淤积物取样资料, 不同取样时间对应的特征粒径有较大差异, 各次取样获得的等量综合中值粒径范围为0.019~0.345 mm, 平均0.145 mm。

## 1.2 河床演变特征

1) 长江胡家滩河段具有弯曲展宽的河势特征, 河段岸线固定, 洲滩和深槽位置及断面形态近期基本保持不变, 河势总体稳定。

2) 从流速分布规律看, 滩段没有明显的主流线, 流速横向分布接近矩形, 流速随流量增大而增加, 但未见主流线随流量增大而明显摆动; 滩脊下段(里程680 km附近)设计航槽内, 中枯水期流速分布存在明显的相对低速区; 流速分布均匀且存在低速区的特征, 容易出现中洪水期泥沙落淤滩段。

3) 三峡成库前, 工程河段的河床演变规律为汛期淤积、汛末冲刷、平水期不冲不淤, 年内基本能保持冲淤平衡; 三峡成库后, 工程河段变为汛期和汛后淤积、消落期冲刷, 但由于消落期的泥沙冲刷能力明显小于汛末, 年内难以保持冲淤平衡, 低水位期航道尺度将受影响。

## 1.3 滩险成因

胡家滩河段枯水河槽紧靠左岸, 河心为胡家滩浅碛, 碛顶(里程680.2 km)两侧为浅槽, 河床由卵石夹沙组成。设计流量下胡家滩河段的3.5 m等水深线不贯通, 浅碛最小水深不足2.0 m, 不满足规划航道尺度, 为碍航卵石浅滩, 滩险成因归纳起来有以下几个方面<sup>[3-4]</sup>:

1) 滩段河势展宽, 水流分散减弱了输沙能力。枯水期, 滩段上游最窄处(里程681.5 km)河宽260 m, 滩段(里程680.2 km)河宽450 m, 展宽比1.73; 洪水期, 上游河宽510 m, 滩段扩宽至760 m, 展宽比1.49。里程681 km附近枯水河宽与滩段基本相同, 航槽枯水平均流速明显小于滩段, 但其洪水河宽不到滩段的80%, 中洪水航槽流速明显大于滩段, 航道尺度优良。因此, 洪水展宽是形成浅段的主要原因。

2) 滩段位于弯道进口, 环流强度较弱, 横向

输沙能力不足。

3) 中枯水水流速较小, 中洪水流速分布均匀, 难以集中水流冲刷航槽, 易形成浅区。

4) 滩段航槽位于各级流量的主输沙带, 加大了航槽泥沙输移负担。

## 2 平面二维水流泥沙数学模型及其验证

### 2.1 控制方程及其离散

水流连续方程

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

水流运动方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{g u n^2}{h^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2} - \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{g v n^2}{h^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2} - \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3)$$

悬移质扩散方程

$$\frac{\partial(hS)}{\partial t} + \frac{\partial(huS)}{\partial x} + \frac{\partial(hvS)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x h \frac{\partial S}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_y h \frac{\partial S}{\partial y} \right) = \alpha \omega (S_* - S) \quad (4)$$

推移质不平衡输沙方程

$$\frac{\partial(\alpha_{bx} q_b)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha_{by} q_b)}{\partial y} + \alpha \omega (S_* - S) = \rho'_s \cdot \frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{L_s} (q_b - q_{b*}) \quad (5)$$

河床变形方程

$$\rho'_s \cdot \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial Q_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{iy}}{\partial y} + \frac{\partial(hS)}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

式中:  $z$  为水位;  $h$  为水深;  $t$  为时间;  $u$ 、 $v$  分别为垂线平均流速在  $x$ 、 $y$  方向的分量;  $g$  为重力加速度;  $n$  为曼宁糙率系数;  $\nu_t$  为涡流黏性系数, 取  $\nu_t = c u_* h$ ,  $u_*$  为摩阻流速,  $c$  为系数, 经调试确定;  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的泥沙扩散系数, 近似取  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \nu_t$ ;  $S$  为含沙量;  $\omega$  为泥沙沉速,  $S_*$  为水流挟沙力, 采用张瑞瑾公式<sup>[5]</sup> 计算;  $\alpha$  为泥沙恢复饱和系数, 按韩其为方法<sup>[6]</sup> 取值;  $z_b$  为

床变形;  $\rho'_s$  为床沙的干密度;  $\alpha_{bx}$  和  $\alpha_{by}$  分别为切应力方向余弦函数;  $L_s$  为不平衡调整长度,  $q_b$  为推移质输沙率,  $q_{b*}$  为推移质平衡输沙率, 采用 van Rijn 公式<sup>[7-8]</sup> 计算;  $Q_{ix}$  和  $Q_{iy}$  分别为包括悬移质泥沙和推移质泥沙在内的  $x$ 、 $y$  方向的全沙输沙率,  $Q_{ix} = huS + \alpha_{bx} q_b$ ,  $Q_{iy} = hvS + \alpha_{by} q_b$ 。

水流泥沙控制方程时间离散采用差分法, 空间离散采用有限单元法。

### 2.2 计算条件

数值计算的初始条件需给出初始时刻地形、水位、流速和含沙量等物理量。定解条件为进口给定流量、含沙量及级配, 采用朱沱水文站的实测水沙资料; 出口给定水位, 综合考虑两江汇流比以及三峡成库对寸滩水位的影响, 采用一维水流数学模型推算得到; 对固壁边界, 取法向流速为 0。

### 2.3 验证

#### 2.3.1 计算域及网格生成

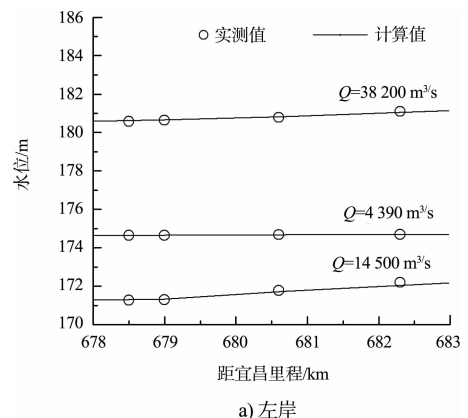
计算区域从上游马桑溪大桥至下游骆公子码头, 长约 4 km, 采用三角形网格对计算区域进行剖分, 共 8 088 个单元, 16 497 个节点, 网格边长平均 30 m, 并对整治区域网格进行局部加密处理。

#### 2.3.2 糙率确定

根据本河段洪中枯 3 级流量的实测瞬时水面线资料推算糙率, 经反复调试, 率定得到本河段综合糙率在 0.024 ~ 0.035, 且枯水糙率大、洪水糙率小。

#### 2.3.3 水位验证

图 2 给出了水位验证结果, 由图可见, 计算水位与实测水位基本一致。



a) 左岸

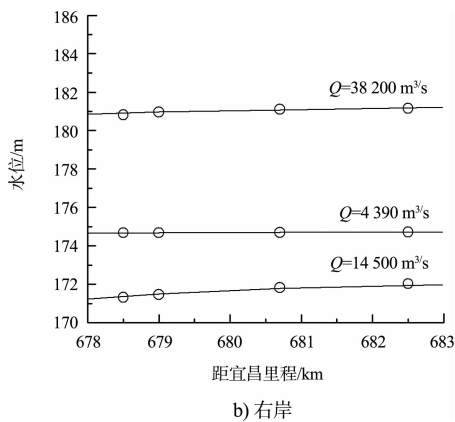


图2 水位验证

### 2.3.4 流速分布及流向验证<sup>[3]</sup>

采用洪、中、枯多级流量下的实测大断面流速资料进行验证,结果表明,流速大小及分布与实测资料较为一致,偏差绝对值基本在 0.10 m/s 以内且不超过 5%;此外,流向验证表明,数模计算流场的流向与浮标迹线走向基本一致。

### 2.3.5 河床变形验证

#### 1) 验证资料。

河床变形验证收集到了 2007-03、2009-12、2011-09、2011-12 和 2012-05 等 5 个测次的地形资料,除 2007-03 地形测图比例为 1:5 000 (滩段局部为 1:500) 外,其余地形测图比例均为 1:2 000。河床变形验证以 2007-03 地形为初始地形,计算至 2012-05,主要进行冲淤量(统计里程 681.2 ~ 679.2 km,上限高程取当地设计最低通航水位)和冲淤部位验证。

#### 2) 冲淤量验证。

年际冲淤量:2007-03—2012-05 时段内的冲淤量实测值为  $-9.2$  万  $m^3$  (全文冲淤量淤积为“+”,冲刷为“-”),计算值为  $-7.5$  万  $m^3$ ,偏差  $-18.5\%$ ;2009-12—2011-12 时段内的冲淤量实测值为  $-27.4$  万  $m^3$ ,计算值为  $-30.7$  万  $m^3$ ,偏差  $12.0\%$ 。

年内冲淤量:2011-09—2011-12 时段内的冲淤量实测值为  $-3.1$  万  $m^3$ ,计算值为  $-2.7$  万  $m^3$ ,偏差  $-12.9\%$ ;2011-12—2012-05 时段内的冲淤量实测值为  $12.6$  万  $m^3$ ,计算值为  $14.5$  万  $m^3$ ,偏差  $14.9\%$ 。

#### 3) 冲淤部位验证。

图 3 给出了典型横断面地形对比,可知断面形态及其边滩、深泓位置基本一致,地形高程总体差异不大;此外,计算和实测地形的冲淤平面分布也相似,滩槽位置相同,深泓位置与走向一致,地形总体形态和等高线分布基本吻合<sup>[3]</sup>。因此,计算地形和实测地形的冲淤部位较为一致。

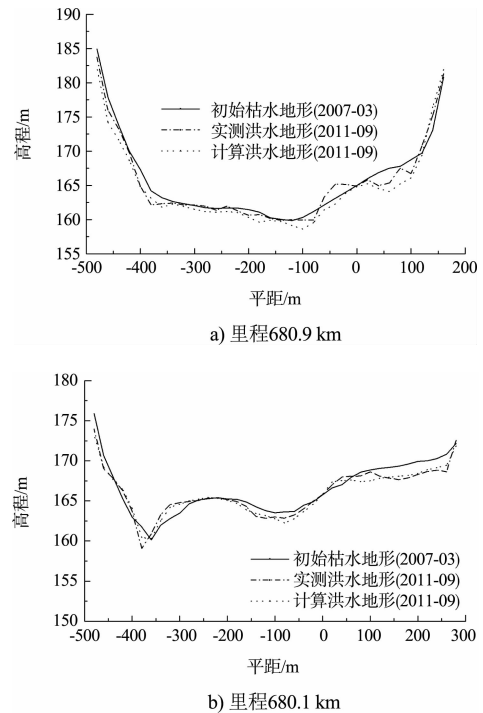


图3 断面地形对比

### 2.3.6 验证小结

通过胡家滩河段水位、流速、流向及河床变形等验证,计算结果与实测资料吻合较好,满足 JTJ/T 232—1998 《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》要求,说明本文采用的平面二维水流泥沙数学模型能正确模拟实际河道的水流运动和冲淤变化,可用于下一步研究。

## 3 整治思路与方案

### 3.1 通航标准

长江胡家滩河段现状航道的维护尺度仅为  $2.7$  m  $\times$   $50$  m  $\times$   $560$  m,根据《长江干线航道总体规划纲要》,到 2020 年,长江干线重庆九龙坡至涪陵河段航道等级应达到内河 I 级,航道尺度  $3.5$  m  $\times$   $150$  m  $\times$   $1 000$  m,通航保证率  $98\%$ 。

### 3.2 整治原则及思路

整治方案采用“整治为主、疏浚为辅，整治与疏浚相结合”的方法，遵循“因势利导”的原则布置。胡家滩河段左岸江中有一潜碛，将河道分为左右两汉，其中右汉为主航槽；水流经过潜碛后，进入弯道，且右岸为倒钩碛，船舶在此处上行时，需抱紧弯道凸岸倒钩碛而行，过了弯道顶点后，由于左岸潜碛伸入江中，航槽迅速缩窄，加之弯曲半径较小，船舶极易在此搁浅碍航；调研资料显示，在2009、2010年消落期相继在此处出现船舶搁浅现象。据近年测图显示，在水库消落期，航道宽度最小时不足30 m，每年枯水期均要进行维护性疏浚，才能勉强保证航道畅通。滩段航道弯曲，左岸码头趸船较多。因此，提出胡家滩浅滩的整治思路为：对江中潜碛进行开挖，并考虑抛筑整治建筑物引导水流对航槽进行冲刷。

### 3.3 整治参数<sup>[3-4]</sup>

根据碍航特性，对胡家滩进行枯水整治，设计水位采用综合历时保证率为98%的水位，设计流量 $Q_{朱沱} = 2\ 380\ \text{m}^3/\text{s}$ ，整治流量选用第3造床流量( $Q_{朱沱} = 5\ 520\ \text{m}^3/\text{s}$ )，整治水位2.5 m，整治线宽度350~370 m，此时消落期航槽泥沙冲刷效果较佳，且对河道行洪影响很小。

### 3.4 整治方案

胡家滩航道整治推荐方案是在初步方案的基础上，采用河工模型试验和数学模型模拟同步研究的方式，经水流特性研究和典型年泥沙冲淤特性研究2个阶段的层层修改、逐步调试及优化后而形成的。胡家滩推荐方案航道走左深槽，设计航槽穿胡家滩浅碛靠近左槽布置，对航槽内不满足规划尺度的地方进行疏浚或炸礁，采用开挖深度不同的复合开挖方式，平面布置见图4。

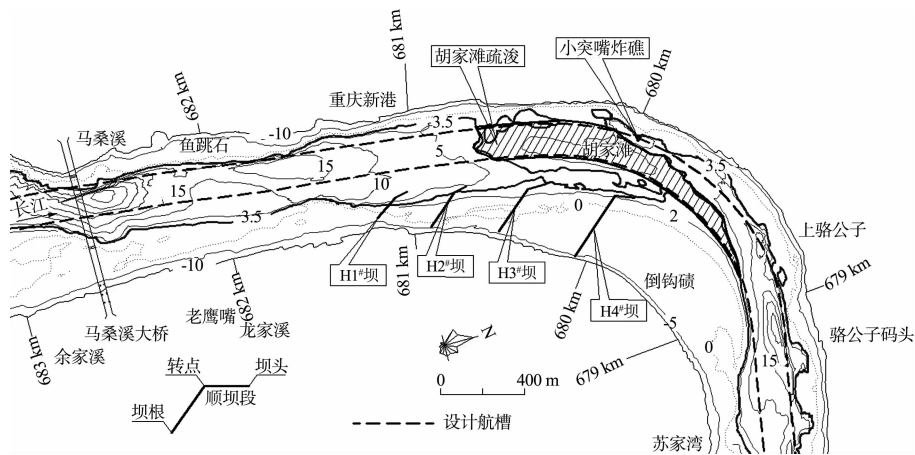


图4 整治方案平面布置

1) 疏浚炸礁：采用复合开挖方式进行胡家滩疏浚，滩下段挖至-4.0 m（以当地设计最低通航水位为零点的高度，高程162.4~162.7 m）、中部挖至-4.1 m（高程162.7~162.8 m）、上段挖至-4.2 m（高程162.8~162.9 m）；同时，对弯顶左岸平台的小突嘴进行少量炸礁，炸礁至-4.0 m（高程162.7 m）。

2) 整治建筑物：在右岸布置1座丁坝（H1#）和3座丁顺坝（H2#~H4#）来归顺水流和束水攻沙，坝长192~438 m，坝头高程为设计水

位上2.5 m（高程169.2~169.8 m），H1#坝从转点按1‰放坡至坝根（高程170.6 m），H2#~H4#坝从转点按1‰放坡至100 m处为2.6 m（高程169.3~169.7 m），然后按1:3坡度升至高3 m（高程169.7~170.1 m），最后按1‰放坡至坝根（高程170.2~170.5 m）。

## 4 整治效果分析

### 4.1 计算水沙序列选定

经分析比较，选用2002—2011年（2002-05-01—

2012-04-30)作为计算水沙序列年,该序列包含丰、中、枯等各种特征年份,特征年较为完整,且为较近的10 a,能充分体现输沙量急剧减小的特性,符合最新来沙来水条件,部分年份还体现了三峡蓄水的影响,图5给出了序列年的3站流量过程线和悬移质含沙量过程线。

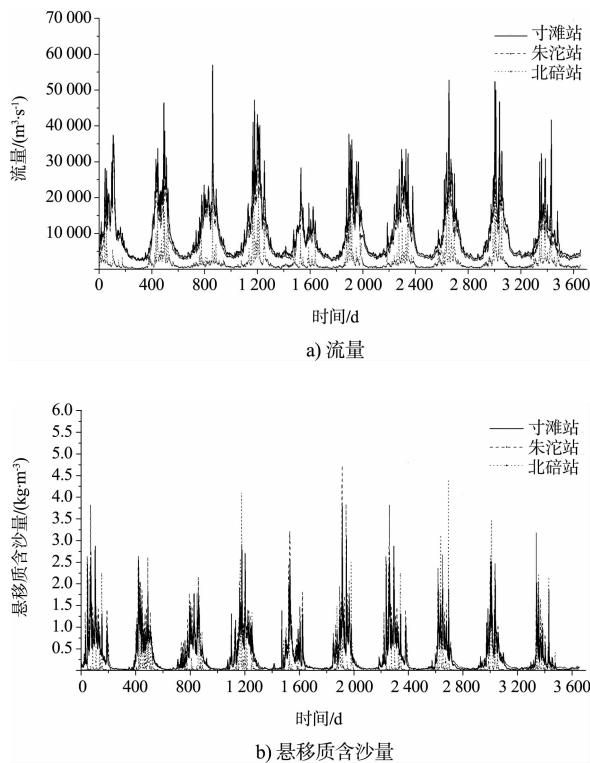


图5 3站流量过程线和悬移质含沙量过程线

## 4.2 整治效果分析

### 4.2.1 水流条件

整治流量下,整治前和整治后方案区的流速范围分别为2.30~2.82 m/s和2.48~3.25 m/s,整治后流速增加0.12~0.58 m/s,有利于加强消落期航槽泥沙冲刷;整治前和整治后的消滩判数范围分别为0.32~0.48和0.36~0.62,整治后消滩判数变化不大,且小于工程河段的急滩临界消滩判数0.80,说明整治后没有成为急滩。此外,丁坝群对右岸河势起到了较为完整的控制和导流作用,整治后水流与航槽走向较为一致,航槽内无明显的斜流和横流等碍航流态,船舶通行水流条件良好。

### 4.2.2 泥沙冲淤特性

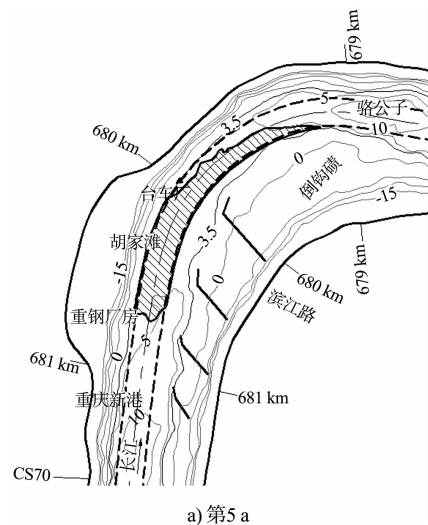
序列年泥沙冲淤计算结果表明,整治前、后

工程河段总体冲淤规律较为一致,主要特征为:1)汛期淤积,消落期冲刷,水文年内表现为淤积;2)序列年内泥沙冲淤规律和冲淤部位具有年复性,各水文年内的泥沙冲淤规律基本一致,冲淤后地形较为相似,且与典型年较吻合;3)汛期弯道凸岸倒钩碛边滩冲刷、凹岸骆公子深沱淤积;4)汛期淤积在滩段主航槽内的泥沙在消落期得到冲刷,主航槽年内冲淤基本平衡,淤沙残存量较少。

与整治前相比,整治后序列年泥沙冲淤具有以下特点:1)在右岸丁坝群束流作用下,消落期航槽内泥沙冲刷加强,起冲时间提前约20 d,冲刷历时延长;2)在右岸丁坝群的固滩及拦沙作用下,倒钩碛泥沙冲刷减弱,坝田区泥沙有所回淤,对浅滩整治有利。

### 4.2.3 航道尺度及其稳定性

根据三峡水库调度方案,工程河段汛末水位较高,航槽内3.5 m设计水深可以保证,航道尺度满足设计要求。图6给出了整治后序列年第5 a和第10 a消落期等水深线(2007-04-30和2012-04-30计算地形,设计水位),可见,整治后滩段汛期淤积泥沙的绝大部分消落期能被冲走,航槽内基本不残存汛期淤沙,航槽内3.5 m等水深线完全贯通,加之航槽是按航宽150 m、弯曲半径不小于1 000 m设计的,因此,航道尺度满足规划要求,且航槽稳定性总体可长期保持。



a) 第5 a

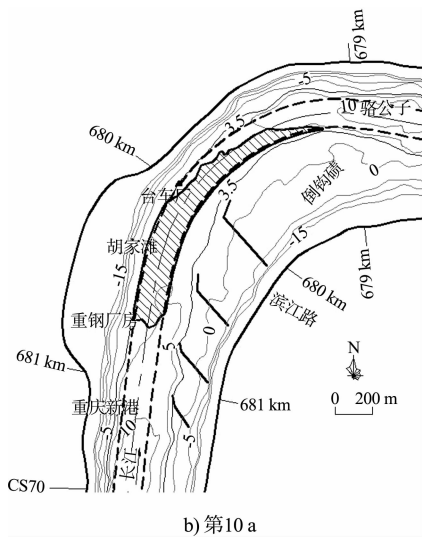


图6 消落期等水深线

#### 4.2.4 方案对防洪的影响

胡家滩位于长江重庆市主城区河段，工程河段防洪标准为100 a一遇。防洪评价计算结果表明，虽整治方案在右岸修建了丁坝群，但因同时进行了较大范围的疏浚开挖和炸礁，整治后沿程各断面的过水面积有增有减，过水面积束窄率变幅 $-2.05\% \sim 3.73\%$ ，不占据三峡水库的有效库容，方案对城市防洪安全基本没有不利影响。

#### 4.2.5 方案对周边环境影响

整治方案的提出进行了广泛实地调研，充分考虑了周边环境因素，方案实施对附近的重庆新港、骆公子码头、马桑溪长江大桥以及滨江路等建筑设施均无不利影响，对城市景观生态也基本没有影响。

## 5 结语

1) 长江胡家滩河段属弯曲展宽河道，滩段位于弯道进口，洪水展宽，环流强度较弱，主流线不明显，流速横向分布均匀，中、枯水期存在明显的相对低速区，消落期难以集中冲刷航槽，泥沙落淤出浅，形成碍航浅滩，亟待进行航道整治，以满足长江黄金水道建设需求。

2) 采用平面二维水流泥沙数学模型进行航道整治研究，通过胡家滩河段水位、流速、流向及河床变形等验证，计算结果与实测资料吻合较好，

满足JTJ/T 232—1998《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》要求。

3) 整治方案遵循“因势利导”的原则布置，经充分优化后形成。选用2002—2011年水沙序列资料对方案整治效果进行模拟分析，结果表明，整治后航槽流速小幅增加，消滩判数小于急滩消滩判数临界值，消落期航槽内泥沙冲刷加强，起冲时间提前约20 d，冲刷历时延长，航道尺度满足规划要求且可长期保持，整治方案对城市防洪、景观生态及周边环境基本没有不利影响，具有可实施性。

4) 胡家滩有左、右双槽，推荐方案走左槽，为消除双槽共存而出现的不稳定航槽平面形态及阻止老槽发展，建议对右槽进行护底，护底范围纵向宜在H2<sup>#</sup>~H4<sup>#</sup>，横向宜在疏浚区右边缘与顺坝段之间，如不能选择遍布，也宜布置4~6道护底。

## 参考文献:

- [1] 赵志舟. 长江上游弯曲放宽河段卵石浅险滩航道整治[J]. 港工技术, 2010, 47(4): 29-32.
- [2] 赵志舟, 周华君. 川江铜鼓滩河段碍航成因分析与整治设想[J]. 水运工程, 2008(4): 72-75.
- [3] 钟亮, 许光祥. 长江上游九龙坡至朝天门河段航道建设工程工可阶段数学模型研究报告[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2014.
- [4] 许光祥, 彭凯. 长江上游九龙坡至朝天门河段航道建设工程工可阶段模型试验研究报告(定床部分)[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [5] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [6] Han Q W. A study of the non-equilibrium transportation of non-uniform suspended load[J]. Chinese Science Bulletin, 1979, 17(7): 804-808.
- [7] Leo C van Rijn. Sediment transport, Part I: Bed load transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 1984, 110(10): 1 431-1 456.
- [8] Leo C van Rijn. Sediment transport, Part II: Suspended load transport [J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 1984, 110(11): 1 613-1 641.

(本文编辑 武亚庆)