

乌江郭母子至狮子口滩群河段碍航特性与整治

赵志舟¹, 景晓菊¹, 赵世强², 张晓明², 赵健²

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 乌江郭母子至狮子口滩群河段由多个碍航滩点组成,且受三峡水库与上游电站运行的影响,通航环境较为复杂,整治难度较大.在滩性分析的基础上,将该滩群组成重新划分为进口汉道浅险滩、中间顺直微弯过渡段浅滩、下游弯曲段浅险滩等3个滩段;采用物理模型研究了该滩群的整体整治方案,对航道尺度、通航水流条件的改善程度、挖槽稳定性等方面进行了多组方案比选,提出了本滩群的整治原则与措施,试验研究表明,推荐方案可以满足航道尺度与通航水流条件的要求.

关键词: 滩群河段; 回水变动区; 航道整治

中图分类号: U617.3

文献标志码: A

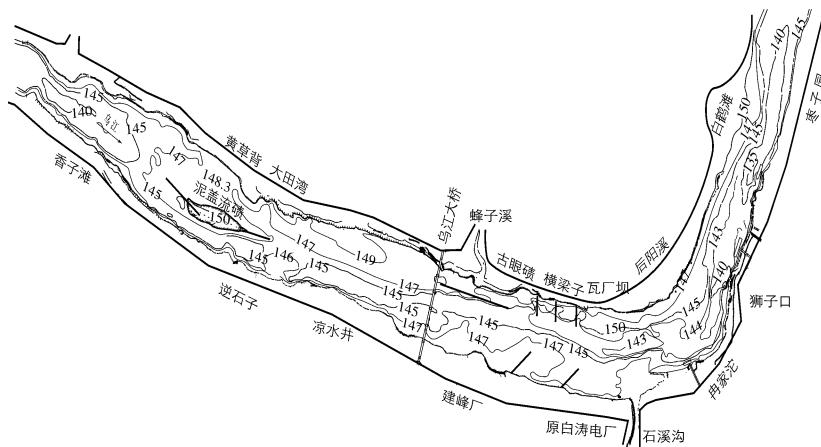
文章编号: 1009-640X(2012)05-0055-07

与单一滩段的航道整治相比,多个距离较近滩点形成的复杂滩群的通航环境复杂,往往成为山区河流航道整治的重点^[1].乌江郭母子至狮子口滩群由多个滩点组成,且受三峡水库、上游电站运行的影响^[2],整治难度大,有必要通过模型试验深入研究其碍航机理与航道整治技术.

1 河段概况

1.1 河势特征

乌江郭母子至狮子口滩群位于乌江河口桐麻湾峡与小溪峡之间开阔段,上、下游航道较为顺直,中间的冉家沱急弯段中心角约 80° ,弯曲半径为720 m(图1).



枯水期有长 500 m, 宽约 100 m 的泥盖流碛分水流为左右两汉. 左汉宽浅, 枯期最小水深 0.5 m, 礁石多, 不能通航. 右汉为通航主汉, 枯水平均宽度约 65 m, 进口水深 1.8 m, 有效航宽小于 30 m, 弯曲半径 100 m, 最大流速 2.87 m/s, 横比降 0.55‰. 航槽上段右岸流态紊乱; 出口有长 140 m, 宽 35 m 沙卵石暗碛. 中洪水期两汉均能通航, 但船舶一般走右汉.

(2) 大田湾至横梁子顺直微弯河段. 枯水主槽由上游右岸凉水井经乌江大桥左侧通航孔, 过渡至左岸整治建筑物坝头位置. 左岸上边滩高程 149.2 ~ 148.4 m, 宽约 120 m; 右岸沙卵石下边滩宽约 90 m, 滩面高程 147.0 ~ 147.7 m.

(3) 横梁子至狮子口弯道段. 弯顶凸岸卵石滩与冉家沱封弯顺坝对峙, 枯水期河宽仅 80 m. 在大件码头上端有溪沟汇入, 该溪一般流量为 0.2 ~ 0.5 m³/s, 暴雨季节, 沟口建筑弃碴堆积使岸线向江心推出. 狮子口河段为单行控制河段, 在大件码头后方设有控制信号台.

1.2 水文及泥沙条件

根据武隆水文站资料分析, 乌江多年平均年径流量为 504 亿 m³, 多年平均流量为 1 600 m³/s, 最大流量 21 000 m³/s, 最小流量 218 m³/s. 汛期 6—10 月平均流量 2 390 m³/s. 乌江年最大洪峰流量出现在 6—7 月, 洪水涨落快, 峰型尖瘦. 乌江输沙量年内集中在 5—10 月, 占全年输沙量的 90% 以上, 多年平均含沙量为 0.633 kg/m³, 多年平均输沙量 3 215 万 t.

郭母子滩泥盖流碛江心洲卵石粒径 $d_{50} = 50$ mm, 狮子口河床为沙卵石覆盖, 沙卵石粒径 $d_{50} = 60$ mm.

1.3 三峡水库与上游电站影响

三峡 175—155—145 m 正常蓄水后, 乌江回水里程分别为 80, 46 和 22 km, 工程所处的网背沱(狮子口下游约 3.5 km)至中咀河段为变动回水区, 消落期河道基本为天然状态.

白马枢纽位于郭母子滩上游约 13 km, 白马航电枢纽为径流电站, 在汛期基本不拦蓄银盘下泄流量, 枯水期和银盘水电站一起调节, 对银盘水电站下泄流量进行有限调蓄. 银盘水库建成蓄水后, 几乎再无推移质进入白马水库; 由于上游水库的拦沙作用, 进入白马水库的悬沙不仅量少, 而且颗粒变细, 在水库运用初期排沙比均可达到 97.7%, 10 a 末出库含沙量 0.122 kg/m³, d_{50} 为 0.021 4 mm^[3].

上游电站日调节运行的下泄流量过程将对本河段产生明显影响. 三峡水库低水、上游下泄最小流量的最不利工况下, 郭母子滩段处水位低于设计水位 0.36 m^[4].

根据 1983—2002 年资料分析, 汛期上游来水量常呈现较枯状况, 武隆站汛期 6—9 月份最小流量为 426 m³/s, 加之蓄水期泥沙累积性淤积, 本滩群在三峡水库正常蓄水后仍会出现天然枯水期的碍航局面.

1.4 航道通航标准

乌江白马以下 45 km 河口段航道等级由 V 级提升至 III 级, 航道尺度由 1.5 m × 25 m × 180 m 提升至 2.7 m × 45 m × 480 m. 经综合分析, 确定该河段允许的流速和比降组合^[5-6]为: 比降 2‰, 流速 4.5 m/s; 比降 3‰, 流速 4.0 m/s; 比降 4‰, 流速 3.4 m/s; 比降 5‰, 流速 2.5 m/s; 比降 6‰, 流速 1.5 m/s.

2 河床演变与整治历史

2.1 郭母子滩

郭母子滩是多年形成的峡口汉流滩. 该滩于 1989 年底至次年 2 月进行整治, 修筑洲头坝调整了两汉分流比、减缓了右汉进口横流; 右岸上口切咀, 减缓了中洪水挑流形成的紊乱流态; 洲尾坝调整了两汉水流交汇角, 减少了汇流处泥沙淤积; 疏浚挖槽改善了右汉进口水流条件, 增大了进口弯曲半径, 使航槽增深增宽. 整治后满足 V 级航道条件, 多年测图和现场调查表明, 该滩较为稳定.

2.2 狮子口滩群

2.2.1 整治历史 1968 年以前, 冉家沱、狮子口两滩水急、困弯、航道弯曲(弯曲半径 150 m), 古眼碛滩枯水水深仅 0.8 ~ 1.0 m. 1964—1979 年先后进行筑坝整治, 由于坝位、线型等原因, 河道逐渐变弯、窄、浅、水流

急湍,航行条件恶化^[7].在1989年前的20 a内,左岸横梁子沙卵石淤积并向江心展宽,航道更趋弯曲,狮子口下边滩向河心推移40 m,河宽由130 m缩窄为90 m.1967年前古眼碛至冉家沱沙卵石边滩长1 470 m,平均宽120 m;1989年时该边滩长650 m,平均宽90 m,滩顶高程降低约1 m(见图2).

1990年底至次年3月整治时仅保留了1#和2#顺坝,拆除了其他坝体.采取江心疏挖航槽与筑坝相结合的措施,加长古眼碛原1#顺坝,左岸新建1#、3#、5#及7#丁坝,右岸新建2#和4#丁坝及狮子口4#顺坝(图2).经1991年的洪水期后,航槽增宽,流速变缓、航行条件得到改善,但冉家沱弯顶上方航槽有局部浅区.

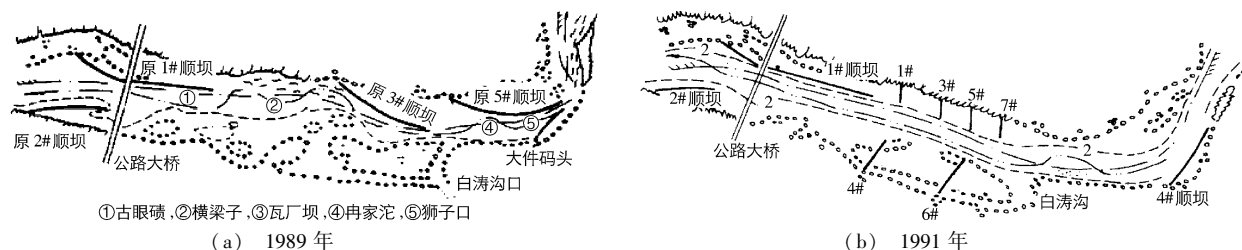


图2 狮子口滩段1989年和1991年河势

Fig. 2 River regime of the Shizikou reach in 1989 and 1991

2.2.2 近期演变 1991年整治后古眼碛至横梁子区段深泓线平面位置往江心方向外移约10~15 m.近年来冉家沱凸岸下边滩有所淤高,比1989年淤高约2.5 m;白涛沟口上游右岸边滩往江心外推出约30 m;其余位置地形变化不大.分析表明,近年来狮子口滩群河段河势总体稳定,冉家沱大件码头河段每年枯水期航槽因沙卵石淤积出浅碍航.

2.3 三峡成库后河床演变分析

根据变动回水区河道的淤积特点,泥沙淤滩落槽,河床将普遍抬高;泥沙主要淤积部位为河道左岸大边滩、古眼碛至白涛沟两岸边滩,以及郭母子分汊河段的支汊、冉家沱凹岸等区域;深槽部位淤积比较少.与2007年地形相比,2010年郭母子江心洲及左汊平均淤积厚度约0.4 m,右汊进出口略有淤积;冉家沱弯道处3 m等深线不再贯通,凹岸最大淤积厚度4 m.数模计算表明,三峡成库正常运行30 a后,郭母子滩左汊逐渐淤塞^[8].

3 物理模型设计

试验采取比尺 $\lambda_L = \lambda_H = 100$ 正态定床水流模型和推移质定床输沙相结合的方式.模型范围上起大溪河口下游(距河口里程32 km),下至网背沱(距河口里程22 km),长约10 km.

根据实测资料,该河段卵石粒径级配特征粒径 $d_{90} = 400$ mm, $d_{50} = 41$ mm, $d_{10} = 0.8$ mm,模型沙选用密度 $\gamma_s = 1.55$ t/m³的荣昌精煤.推移质起动流速公式选用沙莫夫起动公式,通过试验确定的粒径比尺 $\lambda_d = 16$.输沙试验加沙位置布置在模型进口顺直段.经验证模型相似性满足相关规程要求.

考虑天然情况下的流量特征、三峡水库消落期工程河段上游电站汛期下泄流量变化情况,选择了以下5级试验流量(表1),设计流量采用银盘水电站最小下泄流量345 m³/s.

表1 试验流量及控制参数

Tab. 1 Test discharge and control parameters

序号	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	尾门水位/m	备注
1	345	146.58	设计流量
2	755	147.70	枯水期平均流量
3	1 600	148.82	多年平均流量
4	3 560	154.12	接近汛期平均流量
5	10 000	164.39	接近2年一遇流量

4 天然情况下水流特性分析

天然情况各级流量下,研究河段香子滩至瓦背沱间水位差见图 3,中枯水流量时水位差较大,洪水流量下水位差明显减小.在流量小于 $1\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 中枯水流量下,水流动力轴线挫弯,随流量增大、各断面流速相应增大.流量为 $1\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 时郭母子右槽最大流速 3.23 m/s ;在滩尾断面流速分布呈双峰形状,两岸有回流;在凉水井至古眼碛过渡段、瓦厂坝至冉家沱过渡段流速均较大,最大流速为瓦厂坝处的 3.45 m/s .

流量为 $3\,560\text{ m}^3/\text{s}$ 时水流动力轴线趋直,郭母子江心洲上已经充分过流,主流位于郭母子江心偏左岸位置,穿乌江大桥江心右侧主孔进入冉家沱弯道段.各滩险均有足够水深,各断面流速分布比较均匀,最大流速在 2.0 m/s 左右.

冉家沱弯道上游顺直段洪水期纵向比降比较小、枯水流量时比降增大(图 4),呈现洪淤枯冲的演变规律.中枯水流量下郭母子右槽中上段纵向比降随着流量的增大而增大,而凉水井至古眼碛过渡段则相反.

冉家沱弯道段洪水、枯水纵向比降变化不大,凸岸上边滩洪冲枯淤、下边滩洪淤枯冲.由于凸岸为各级流量下推移质输移的通道,因此泥沙容易淤积.

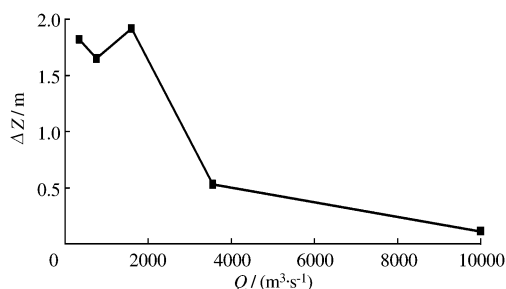


图 3 水位差与流量关系

Fig. 3 Relationship between water level difference and discharge

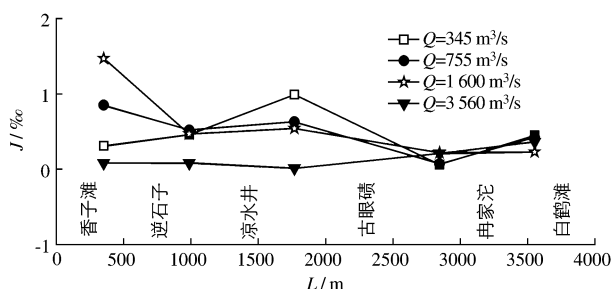


图 4 右岸纵向比降沿程分布

Fig. 4 Distribution of the vertical slope of the right bank

中枯水流量下,在郭母子滩进口横向比降相对较大,流量 $345\text{ m}^3/\text{s}$ 时最大(0.55‰)。洪水流量下冉家沱弯道横向比降较大,流量大于 $3\,560\text{ m}^3/\text{s}$ 时,冉家沱横向比降约 1.2‰ ,扫湾水增强。

5 碍航特征

狮子口滩群 1991 年整治后,原古眼碛、横梁子、瓦厂坝、冉家沱和狮子口等 5 个碍航滩点分布已不再明显,根据河床演变与碍航特点,可将该滩群河段分为以下 3 个滩段。

5.1 郭母子峡口放宽段航道浅险滩

(1)右槽进口、中上段与出口段航道水深不足.右槽进口的过渡段位置航宽仅约 30 m ,碛翅航道边缘水深不足.右槽出口逆石子至凉水井位置暗碛上水深仅 1.0 m .

(2)中枯水右汊进口有横流,出口有挑流,流态差.泥盖流碛右汊上口中枯水水流弯曲,弯曲半径仅 300 m .整治前进口最大横比降达 2.6‰ ,1989 年整治后有所减弱,但在 $345\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时仍达 0.55‰ .右槽出口逆石子突嘴挑流,低水位时该段水流稍显散乱。

5.2 凉水井至横梁子顺直微弯河段过渡段浅滩

(1)凉水井至乌江大桥上游段.主槽由右岸过渡至江心乌江大桥主通航孔,左岸边滩高程由 149.2 m 降低至 $148.4 \sim 148.8\text{ m}$,中枯水河宽由 270 m 放宽至 320 m ,航道水深约 $2.2 \sim 2.4\text{ m}$.

(2)古眼碛至横梁子下游段.古眼碛 1#顺坝头部至横梁子 1#丁坝头部间距较大,主槽偏向整治线左侧,槽底高程 $144.2 \sim 144.7\text{ m}$,航槽范围全部出浅.横梁子 1#~3#丁坝区段仅航槽右侧宽约 15 m ,航深不足。

5.3 瓦厂坝至狮子口弯曲河段浅险滩

(1)瓦厂坝至冉家沱弯道上下游深槽间的过渡段航道尺度不足.输沙试验表明此位置泥沙容易淤积,2007年9月测图表明航槽左侧浅梗高程144.4 m,导致航宽、水深不足.

(2)冉家沱弯曲半径小、扫湾水较强.过渡段瓦厂坝横断面主泓位于中洪水江心,冉家沱枯水主槽开始逐渐贴近凹岸,枯水主槽弯曲半径仅180 m.在 $1\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时扫湾水相对较强,主流流速大于 3 m/s ,最大值为 3.45 m/s ,相应最大比降 0.55% ,船舶能自航上滩.

6 整治方案

6.1 整治原则

整治原则包含以下几点:①依据滩群河段不同滩点的碍航成因、碍航特征,有针对性地采取整治措施,并统筹兼顾各滩点间的相互影响^[9-10];②滩群河段滩点多、滩程长,分布有桥梁、码头等建筑物,应考虑整治方案对与桥区河段、码头水域通航环境的影响;③根据回水变动区的河床演变特点,采取疏浚与筑坝相结合的消落期低水整治措施^[1,11],以稳定航槽、改善通航条件;④充分利用以往修筑的整治建筑物,以减小滩群整治工程量.

6.2 整治措施

根据滩群天然情况下的水力特性与回水变动区的演变特点,选择 $1\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 流量为整治流量.根据上述整治原则,采取疏浚与整治相结合的整治措施,以设计方案作为基础方案1,考虑开挖航槽的稳定性与通航水流条件,对整治方案进行了优化,各方案主要工程措施及工程效果见表2,方案5为推荐方案.

表2 各方案主要工程措施与效果比较

Tab.2 Comparison between engineering measures and scheme effects

方 案	工程措施	主要整治效果
方 案 1	①郭母子右汊航槽疏浚;筑长320 m洲头坝.②凉水井至狮子口航槽疏浚,冉家沱处挖槽偏右岸布置;恢复加高右岸1,2号丁坝,左岸1~4号丁坝.	①郭母子右汊流速增加 $0.2\sim 0.9\text{ m/s}$,进口斜流强,流态紊乱.②中枯水流量下,凉水井至瓦厂坝段流速有所增大,但弯道段主流偏离挖槽、航槽内流速有所减小.
方 案 2	①郭母子洲头坝上段向右岸偏转 12° .②左岸1号坝加勾头;右岸1,2号丁坝加长约15 m,下方石溪沟口处增加1道丁坝;横梁子下游挖槽移至左岸边滩.	①郭母子右槽进口斜流仍强烈.②瓦厂坝挖槽流速大,最大流速接近 4 m/s ;冉家沱弯道设计流量下流速小于 1 m/s .
方 案 3	①将郭母子洲头坝上段加长39 m,调整分流比.②左岸丁坝群缩短约30 m;取消石溪沟口处丁坝.	①郭母子右汊进口斜流明显减弱,但坝头绕流明显.②整治流量下,横梁子、瓦厂坝河段挖槽流速降低至 3 m/s 左右.
方 案 4	①郭母子洲头坝改为鱼嘴;切除逆石子突嘴.②调整古眼碛顺坝与挖槽距离25 m左右,拆除冉家沱内2条丁坝	①郭母子槽内流速分布均匀,流态较好.②中下段航槽内水深、流速增加,滩段比降减小.
方 案 5	①郭母子洲尾新筑洲尾坝,右岸逆石子下游侧筑顺坝.②冉家沱内顺坝恢复加高.	①郭母子洲尾段水流归槽,流速增加,逆石子凸嘴挑流作用显著减弱.②冉家沱回流强度减弱.

推荐方案5的主要措施如下:

(1)郭母子汊道浅险滩.左槽宽浅、三峡成库后逐渐淤塞,航槽稳定性差,因此仍选择右槽作为通航整治航道.①对右槽进口与碛翅浅区、出口暗碛进行疏浚,考虑三峡与上游电站的影响,适当增加备淤富裕深度;②对洲头坝位置进行适当调整,加长郭母子洲头坝使分流点上移,调整右汊进口流态;③原有洲尾坝距离设计挖槽较远且毁损严重,新筑洲尾坝相对于原有坝体往右岸位移约13 m,坝顶高程为设计水位以上2.5 m,长247.5 m.④为防止低水期水流往右岸深槽扩散,在右岸逆石子凸嘴下游筑长约83 m的顺坝,坝顶高程取设计水位以上1 m.

(2)凉水井至横梁子顺直微弯河段过渡段浅滩.①凉水井至乌江大桥上游段浅区疏浚;②古眼碛至横梁子下游段主槽偏向原整治线左侧,且坝头流态较差,因此将左岸顺坝下端适当左偏、4道丁坝长度缩短,右岸2道丁坝长度增加,使整治线位置左移约10 m,充分利用深槽通航;③1#顺坝头部至1#丁坝头部间距较大,

航槽范围全部出浅,因此将左 1#丁坝位置适当上移,坝头加勾头进一步调顺水流;④所有坝体恢复加高至原高程。

(3) 瓦厂坝至狮子口弯曲河道浅险滩。①浅区疏浚,加大弯曲半径;②冉家沱内原顺坝恢复加高,坝顶高程为设计水位以上 2.5 m,增加挖槽稳定性,调顺水流。

6.3 整治效果

郭母子汊道浅险滩,在设计流量下,挖槽内流速有所增加,航槽水深增加,满足设计航深要求。345 m³/s 流量下,右槽航槽流速由 1.38 m/s 增加至 1.70 m/s;出口暗碛流速 1.39 m/s 增加至 1.75 m/s(表 3)。在整治流量下,航槽流速分布均匀,无不良流态,航槽流速均在 2.0 m/s 以上,大于河床 d_{50} 泥沙的起动流速,航槽稳定。挖槽进口斜流强度减弱,在整治流量下,郭母子滩洲尾挖槽段水流归槽,逆石子凸嘴挑流作用明显减弱,凸嘴下游水流不再向右岸深槽扩散。

表 3 推荐方案航槽平均流速变化

Tab.3 Average velocity change in the channel of recommended scheme							m/s
流量/(m ³ ·s ⁻¹)	时 段	黄草背	凉水井	桥上游 250 m	瓦厂坝	冉家沱	狮子口
345	整治前	1.38	1.39	1.44	1.78	0.82	0.88
	整治后	1.70	1.75	1.74	1.73	0.92	0.85
1 600	整治前	2.86	2.52	3.14	2.94	1.51	2.07
	整治后	2.72	2.87	3.41	3.30	1.86	2.13

凉水井至横梁子顺直微弯河段过渡段浅滩,在中枯水流量下挖槽内流速有所增加,以上浅区为例,345 m³/s 流量下,航槽流速由 1.44 m/s 增加至 1.74 m/s;1 600 m³/s 流量时航槽流速由 3.14 m/s 增加至 3.41 m/s,航槽稳定性增加。

瓦厂坝至狮子口弯曲河道浅险滩,整治后航槽宽度、航深增加,冉家沱内回流强度也有所减弱,对船舶通行有利。整治流量时挖槽内流速约增加 0.1~0.3 m/s。枯水主槽弯曲半径由整治前的 180 m 增加至 560 m;整治流量时瓦厂坝最大流速仅增加 0.1 m/s,相应最大比降 0.51‰,航道条件有明显改善。

推移质定床输移试验表明,在 1 600 m³/s 整治流量时,除郭母子航道左侧滩唇开挖部分有少量泥沙落淤外,大部分泥沙都输移至下游,工程后航槽能够维持稳定。但考虑到该滩处于回水变动区位置,汛后冲刷能力减弱,因此应加强整治后观测,必要时采取维护疏浚措施。

整治后消落期桥区上游航道主流流速与航线方向基本一致,在流速相对较大的整治流量时,整治前后最大流速均为 3.15 m/s,整治后主流与桥轴线法向夹角比天然情况下略有增大,但主通航孔一跨过通航水域,对桥区的通航环境无明显影响。冉家沱港区前沿流速分布与天然情况基本一致,且回流减弱,对进出港区的船舶有利。

7 结 语

通过河势特征分析将乌江郭母子至狮子口滩群河段划分为峡谷出口放宽段汊道浅滩、顺直河段过渡段浅滩、弯道浅滩等 3 个滩点;依据不同滩点的碍航成因、碍航特征与回水变动区的河床演变特点,确定了合理的整治原则;采取疏浚与筑坝相结合的低水整治措施,优化得到的推荐方案较好地改善本滩群河段的通航条件。

参 考 文 献:

- [1] 长江航道局. 航道手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (Yangtze River Waterway Bureau. Navigation project handbook [M]. Beijing: The People Communication Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 张小勇, 赵世强, 赵志舟, 等. 乌江白马以下河段复杂滩群航道整治技术研究[R]. 重庆: 重庆市港航管理局, 2011. (ZHANG Xiao-yong, ZHAO Shi-qiang, ZHAO Zhi-zhou, et al. Investigation on regulation techniques of complex shoals group in the Baima downstream reach in the Wujiang River[R]. Chongqing: Chongqing Port Bureau, 2011. (in Chinese))

- [3] 李荣辉, 万建蓉. 乌江白马航电枢纽库区泥沙淤积研究[J]. 人民长江, 2009(22): 30-31. (LI Rong-hui, WAN Jian-rong. Research on Baima navigation-power junction reservoir sediment deposition in the Wujiang River[J]. Yangtze River, 2009(22): 30-31. (in Chinese))
- [4] 文岑. 三峡水库调度及银盘电站下泄非恒定流对白马以下河段复杂滩群航道条件的影响数学模型研究[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2011. (WEN Cen. Mathematical model research on influence of operation of Three Gorges Reservoir and unsteady flow of Yingpan power station on the complex shoals group in the Baima downstream reach in the Wujiang River [R]. Chongqing: Chongqing Southwest Water Transportation Engineering Institute, 2011. (in Chinese))
- [5] 许光祥. 乌江彭水电站的大件运输航道条件可行性研究[R]. 重庆: 重庆交通学院, 2002. (XU Guang-xiang. Study on feasibility of channel condition for heavy-cargo of Pengshui power station in the Wujiang River [R]. Chongqing: Chongqing Jiaotong Institute, 2002. (in Chinese))
- [6] 童思陈, 许光祥, 邓明文. 内河船舶航行阻力及通航水力指标计算[J]. 水利水运工程学报, 2010(2): 100-106. (TONG Si-chen, XU Guang-xiang, DENG Ming-wen. Calculation of sailing resistance and navigable hydraulic parameters for inland ships [J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(2): 100-106. (in Chinese))
- [7] 熊锡林. 狮子口滩群的治理[J]. 水运工程, 1994(7): 24-28. (XIONG Xi-Lin. Regulations scheme of Shizikou rapids[J]. Port & Waterway Engineering, 1994(7): 24-28. (in Chinese))
- [8] 赵健, 张晓明. 乌江白马以下河段复杂滩群航道整治方案优化研究模型试验研究[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2009. (ZHAO Jian, ZHANG Xiao-ming. Model test research on waterway regulation scheme optimization of complex shoals group in the Baima downstream reach in the Wujiang River [R]. Chongqing: Chongqing Southwest Water Transportation Engineering Institute, 2009. (in Chinese))
- [9] 曹民雄, 蔡国正, 王秀红. 长江上游和尚岩滩群航道整治研究[J]. 水利水运工程学报, 2010(3): 1-8. (CAO Min-xiong, CAI Guo-zheng, WANG Xiu-hong. Waterway regulation of Monk Rock rapids group in the upper reaches of the Yangtze River [J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(3): 1-8. (in Chinese))
- [10] 胡小庆. 金沙江大雪滩群河床演变与滩险碍航特性[J]. 水利水运工程学报, 2010(3): 39-46. (HU Xiao-qing. River channel process and navigation hindering property of the Daxuetan shoals in Jinsha River [J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(3): 39-46. (in Chinese))
- [11] 胡旭跃. 航道整治[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008. (HU Xu-yue. Waterway regulation [M]. Beijing: The People Communication Press, 2008. (in Chinese))

Navigation hindering characteristics of Guomuzi-Shizikou group of shoals and its regulation

ZHAO Zhi-zhou¹, JING Xiao-ju¹, ZHAO Shi-qiang², ZHANG Xiao-ming², ZHAO Jian²

- (1. River and Ocean Engineering Department of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Chongqing Southwest Water Transportation Engineering Institute, Chongqing 400016, China)

Abstract: The serial shoals consist of many navigation-obstructing shoal sections in the reach between Guomuzi and Shizikou in the Wujiang River, influenced by the operation of Three Gorges Reservoir and the upstream power plant, and the local traffic environment is complex due to this shoal group reach, which is difficult to be regulated. Based on the analysis of the evolution of river bed, the characteristics and mechanism of navigation-obstructing, the composition of this group of shoals reclassified as the shoals in the braided channel in the upper reach, the shallow shoals in the slightly curved middle reach and the sharp bend rapids in the downstream reach are studied. The regulation schemes are compared and selected considering channel dimensions, navigation flow conditions and the stability of the dredged area. The regulation principle and measures are advanced. Research results show that the recommended regulation scheme can meet the requirements of channel dimensions and navigation conditions.

Key words: group of shoals; fluctuating backwater zone; waterway regulation