



长江上游观音背滩航道整治方案

郭 琦，庹莜葭，张文江

(长江重庆航运工程勘察设计院，重庆 401147)

摘要：针对长江上游观音背河段暗礁浅区得不到有效冲刷而易出浅碍航的问题，提出了 2 种不同的整治方案，并采用数值模拟方法建立该河段的平面二维数学模型，对 2 种方案实施后的整治效果进行研究。结果表明，方案实施后浅区部位水深均在 3.5 m 以上，达到了预期整治目标。局部水流流态明显改善，设计流量下 2 种方案的最大流速增幅分别为 0.798、0.995 m/s。方案 2 较方案 1 对河道边界条件影响更大，局部消滩判数超过临界值 3.92，不利船舶通行，因此选择方案 1 作为推荐方案。研究结果可为该河段后续整治方案的确定提供支撑。

关键词：长江上游；碍航特性；航道整治；数值模拟

中图分类号：U617

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)03-0126-07

Regulation schemes of Guanyinbei beach in upper reaches of the Yangtze River

GUO Qi, TUO Youjia, ZHANG Wenjiang

(Changjiang Chongqing Harbour and Waterway Engineering Investigation and Design Institute,
Chongqing 401147, China)

Abstract: Aiming at the problem that the dark moraines in the Guanyinbei reach of the upper reaches of the Yangtze River can not be washed effectively and the shallow area is easy to become shallow and hinder navigation, this paper proposes two different regulation schemes, establishes two-dimensional mathematical model of the reach by numerical simulation method, and studies the regulation effect after implementation of the two schemes. The results show that after the implementation of the scheme, the water depth in the shallow area is above 3.5 m, which achieves the expected regulation goal. The local water flow pattern is significantly improved, and the maximum flow rate increase of the two schemes under the design flow rate is 0.798 m/s and 0.995 m/s respectively. Scheme 2 has a greater impact on the river boundary conditions than scheme 1, and the local beach elimination judgement is more than the critical value of 3.92, which is unfavorable to the passage of ships. Therefore, scheme 1 is selected as the recommended scheme for the beach. The results of the study can provide support for the determination of the subsequent regulation schemes in this section of the river.

Keywords: the upper reaches of the Yangtze River; obstructing characteristics; channel regulation; numerical simulation

长江上游宜宾合江门—石盘河段(上游航道里程 1 044~816 km)即长江合界段全长约 228 km。该河段航道具有“弯、浅、险、窄、急”的特征，河段内水流流速大，水面坡降陡；水流条件也极为复杂，“剪刀水”、“泡漩水”等不良流态丛生。

特别是部分急流滩段，枯水期过水断面面积极小，流速大部分在 3.5 m/s 以上，个别河段流速甚至高达 4.0 m/s，船舶航行十分困难；部分滩段甚至需其他船舶助拖才能上行过滩。加之该河段岸边石嘴、石梁众多，大小礁石随处可见，地形十分复

收稿日期：2023-07-10

作者简介：郭琦（1990—），男，工程师，从事港口与航道设计工作。

杂; 岸边或江心礁石枯水期出露时, 石梁凸嘴扰流和阻水作用明显; 江中多泡漩乱水, 横流强盛。而当水位上涨漫过石梁后, 又多滑梁水, 船舶操作稍有不慎, 易发生触礁划舱等海损事故^[1]。该段航道曾在兰叙段、泸渝段航道建设工程项目中进行过多次整治, 航道条件得到了较大改善, 目前航道等级为Ⅲ级, 维护标准尺度为 2.7 m×50 m×560 m (水深×宽度×弯曲半径)。根据《长江经济带发展规划纲要》, 拟将该河段航道等级提升为内河I级, 航道水深提升至 3.5 m。但目前该河段存在 32 个滩险不满足规划要求, 这些滩险大多具有险、急、浅、弯等多种碍航特征, 航道条件复杂, 通航安全隐患突出, 其中观音背滩即为其中一处典型碍航滩险。为实现该河段规划目标, 提高航运效益, 本文拟对观音背滩航道整治方案进行数学模型研究, 以期为该河段整治方案的确定提供支撑^[2-3]。

1 滩险概况

观音背滩位于长江上游石棚水道(长江上游航道里程 925.00~933.00 km), 水道长约 8.0 km, 属枯水浅滩, 历史上曾对其进行过治理。该段河道弯曲, 石棚水道和纳溪水道下段一起组成一个 S 形弯道, 进入石棚水道后河道明显放宽, 右岸有巨大的石梁发育, 依次有头巨梁、二巨梁、猪圈门和三巨梁等多个石梁突出江中, 岸线极不规则。观音背滩上段由于受右岸猪圈门和三巨梁石盘深入江中挑流, 流态较差, 礁石外侧有金堆子边滩依乱石堆而生, 挤压航槽, 该部位水浅碍航。该滩近年滩槽基本稳定, 进口段右岸受多个石梁控制, 滩段局部河床受自然演变影响略有冲淤变化, 左岸鸽子碛边滩受无序挖砂采石影响有所破坏^[4], 但总体滩槽格局稳定, 未见明显改变, 见图 1。

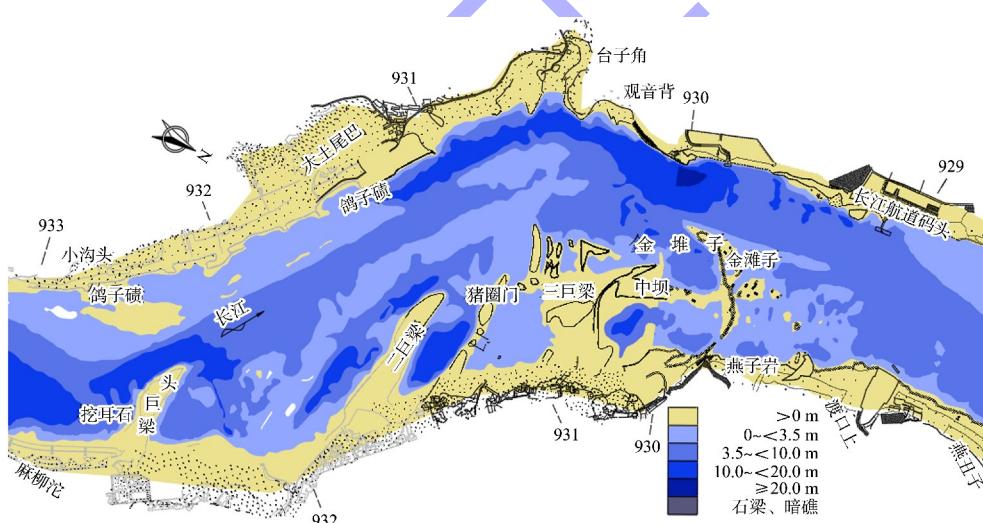


图 1 观音背滩河势

2 碍航特性分析

从观音背滩河势图来看, 该滩呈微弯形态, 右侧岸线极不规则, 有多个石梁突出江中, 左侧凹岸有深槽发育。水流进入滩段后, 受到石梁突嘴挑流影响, 使主流循着左岸深槽而下。近年受到无序挖砂采石影响, 左岸鸽子碛边滩滩型受到破坏导致过水断面扩大, 主流集中在左岸深槽, 航线所在的右岸水流更加分散, 滩段浅区得不到有效冲刷, 船舶目前沿河心偏左岸而上, 与参考航线大相径庭。目前观音背滩的碍航特性为滩段浅区

部位枯水期水深不满足规划的 3.5 m 建设尺度要求, 且由于右岸礁石、突嘴众多兼具险的特性。

3 二维水流数学模型

3.1 控制方程

采用沿水深平均的封闭浅水方程组如下二维水流数学模型控制方程。

水流连续方程:

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

x 方向动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial x} \right) - fv - \frac{\varepsilon_{xx} \partial^2 u}{\rho \partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy} \partial^2 u}{\rho \partial y^2} + \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^3} = 0 \quad (2)$$

y 方向动量方程:

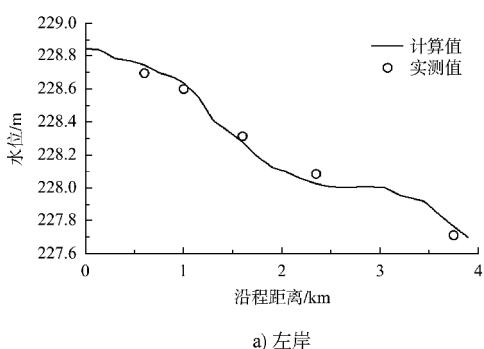
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a}{\partial y} \right) - \frac{\varepsilon_{xy} \partial^2 v}{\rho \partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy} \partial^2 v}{\rho \partial y^2} + \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^3} = 0 \quad (3)$$

式中: t 为时间; u 、 v 分别为沿 x 、 y 方向的流速; h 为水深; g 为重力加速度; ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{xy} 为紊动黏性系数, 用 $\alpha u_* h$ 表示, 其中 u_* 为摩阻流速, $\alpha=3\sim 5$; n 为糙率系数。

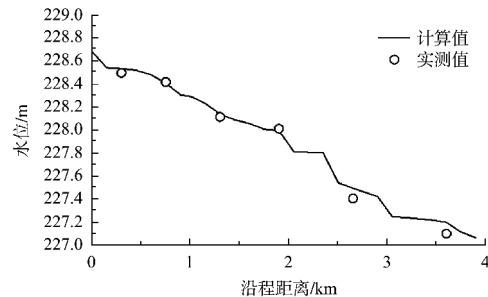
3.2 二维数学模型的建立与验证

考虑计算所需进出口长度, 观音背河段二维数学模型模拟范围上起麻柳沱, 下至燕丑子, 航道里程 928~933 km, 长约 5 km。计算网格采用无结构的三角网格, 共计 8.246 0 万个单元、30.001 8 万个节点。网格间距取 10~50, 并对工程区域采取局部加密处理, 加密区网格间距约为 5 m, 以便更准确模拟工程实施效果^[5]。

模型验证材料采用 2016 年实测地形和水文数据, 验证内容包括实测水面线和流速分布。验证结果见图 2、3。从图 2 可见, 计算水位与实测水位基本保持一致, 误差均在 ± 10 cm 以内, 满足 JTS/T 231-4—2018《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》要求。图 3 中断面流速分布计算值与实测值较为一致, 误差大多在 ± 0.1 m/s, 个别较大偏差值也不超过 ± 0.2 m/s, 总体偏差值控制在 $\pm 10\%$ 以内。



a) 左岸



b) 右岸

图 2 模型水位验证

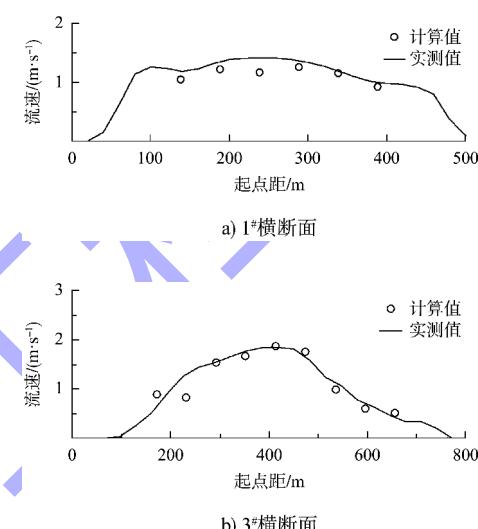


图 3 模型流速验证

4 观音背滩航道整治方案

4.1 整治思路

观音背河段右岸有多个石梁突嘴深入江中, 左岸有鸽子碛边滩, 石梁区流态较为紊乱, 鸽子碛近年受无序挖砂采石影响滩体明显破坏。本滩主要是观音背浅暗碛位出浅碍航, 且鸽子碛滩型破坏以后不利于浅区部位的冲刷。

观音背整治思路为: 疏浚鸽子碛暗碛浅区部位, 辅以整治建筑物恢复边滩、调整水流、束窄河道增大浅区部位的冲刷力度, 维持滩段的通航水深^[6-9]。

4.2 整治方案 1

观音背滩整治方案 1 中浅区附近航槽沿鸽子碛边缘布置, 与目前习惯枯水上行航线一致。航线沿左岸进入滩段, 金堆子附近河段沿右岸上行至三巨梁过河至对岸鸽子碛, 后沿右岸鸽子碛上行。同时对航槽范围内的浅区进行疏浚, 疏浚挖

深至设计水位下 3.8 m, 疏浚基线沿主航槽布置, 共有 2 个疏浚区。控制基线长度为 750.0 m, 疏浚区挖槽底宽约 80 m, 为保证下水船舶航行安全, 对上口进行适当放宽。为恢复边滩完整性, 归顺滩段水流, 维持疏浚挖槽区的稳定, 在鸽子碛上

抛筑 3 道勾头丁坝, 鸽子碛 1# 丁坝长 195 m, 其中勾头段长 50 m; 鸽子碛 2# 丁坝长 210 m, 其中勾头段长 50 m; 鸽子碛 3# 丁坝长 140 m, 其中勾头段长 30 m。方案 1 平面布置见图 4。

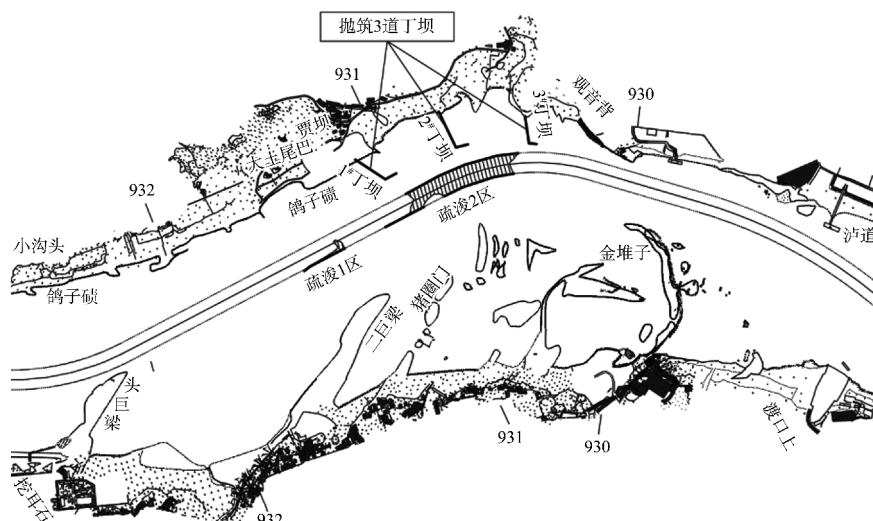


图 4 观音背滩整治方案 1

4.3 整治方案 2

方案 2 的航槽布置总体走向与方案 1 一致, 考虑到丁顺坝布置方案, 鸽子碛碛翅部位航槽略向右调整。同样对航槽范围内的浅区进行疏浚, 疏浚基线沿主航槽布置, 共有 2 个疏浚区。上游疏浚 1 区与方案 1 相同, 疏浚 2 区根据航槽调整

略向右偏移, 控制基线长 730.0 m, 疏浚区挖槽底宽约 80 m, 为保证下水船舶航行安全, 对上口进行适当放宽。采用在鸽子碛修建丁顺坝的方案来恢复边滩形状, 维持疏浚挖槽区的稳定, 归顺滩段水流, 丁顺坝长 875 m, 其中丁坝段 225 m, 顺坝段 650 m, 见图 5。

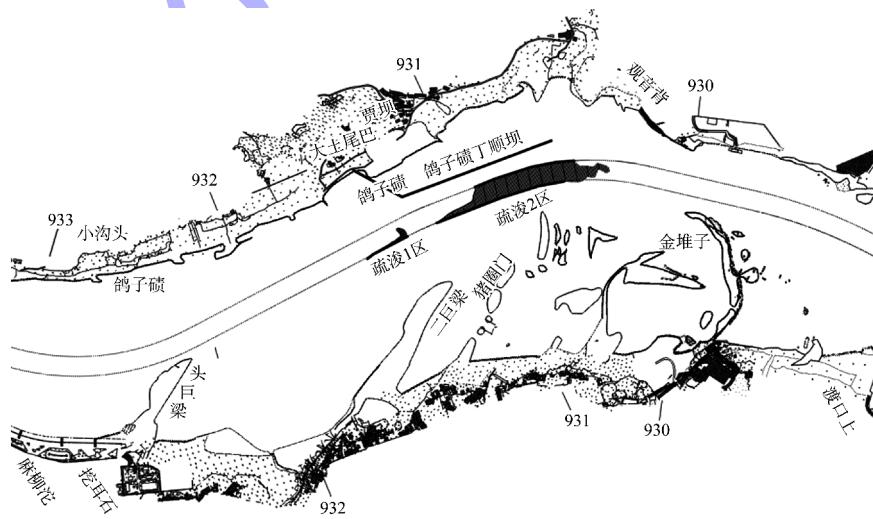


图 5 观音背滩整治方案 2

5 模型计算及整治效果分析

5.1 计算工况

为了研究工程实施后不同水位期航槽内的水流特性变化，拟定 6 种典型流量下的模拟工况，以分析最不利的工况组合，见表 1。

表 1 顺直水槽数学模型工况

工况	朱沱流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	朱沱 水位/m	数模尾 水位/m	备注
1	2 364	195.21	225.744	设计流量
2	5 920	197.67	228.275	整治流量
3	8 350	199.01	229.248	多年平均流量
4	11 500	200.57	230.982	中水流量
5	26 000	206.55	236.956	常见洪水流量
6	54 500	215.36	246.489	$P=5\%$ 洪水流量

5.2 整治效果分析

表 2 统计了 2 个整治方案实施后不同流量下航槽中线的水位变化。与工程前相比，各级流量下航中线水位普遍有明显提升。整治流量 $Q=5 920 m^3/s$ 时，航中线水位抬升最为明显，2 种方案的变化幅度分别为 $0.314 \sim 0.685 m$ 、 $0.343 \sim 0.816 m$ 。可见方案实施后，水流受到整治建筑物的约束，开始向河道中部集中，显著提升了航槽内的通航水深。同时方案实施后，航槽内 $3.5 m$ 等深线全线贯通，达到了规划尺度要求（图 6）。而随着流量的增加，整治建筑物的束水作用有所减弱，航槽内水深增幅也随之降低。

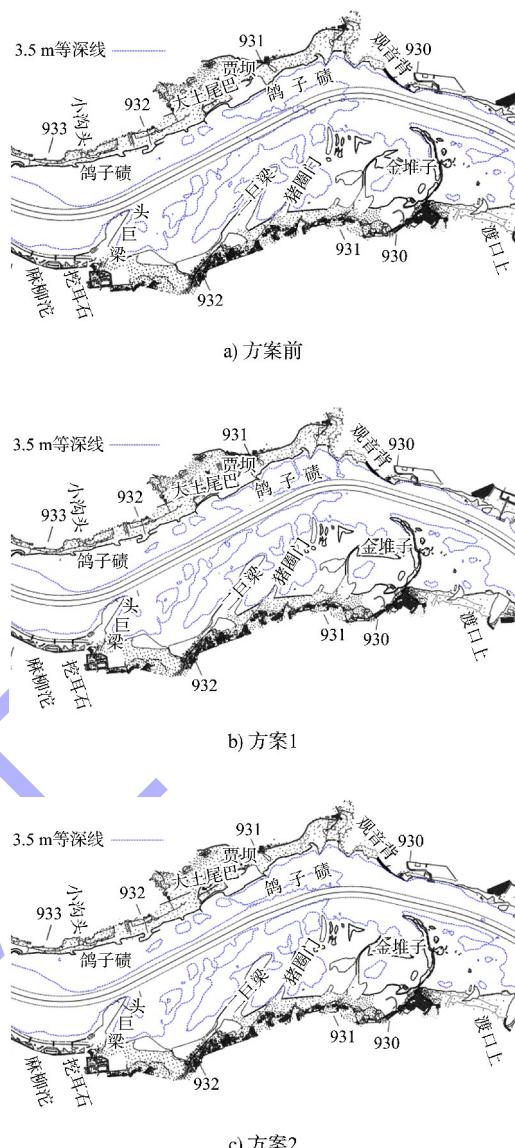


图 6 方案实施前后 $3.5 m$ 等深线变化

表 2 方案实施后航中线水位变化

方案	水位变幅/m					
	$Q=2 364 m^3/s$	$Q=5 920 m^3/s$	$Q=8 350 m^3/s$	$Q=11 500 m^3/s$	$Q=26 000 m^3/s$	$Q=54 500 m^3/s$
1	-0.033~0.523	0.314~0.685	0.322~0.560	0.262~0.440	0.033~0.068	0.021~0.037
2	-0.063~0.658	0.343~0.816	0.371~0.590	0.292~0.440	0.031~0.051	0~0.012

表 3 方案实施后航槽内平均流速变化

方案	水位变幅/m					
	$Q=2 364 m^3/s$	$Q=5 920 m^3/s$	$Q=8 350 m^3/s$	$Q=11 500 m^3/s$	$Q=26 000 m^3/s$	$Q=54 500 m^3/s$
方案前	0.226~2.044	0.875~2.332	1.131~2.585	1.313~2.926	1.660~3.199	1.250~3.538
1	-0.444~1.455	-0.34~0.798	-0.273~0.250	-0.262~0.082	-0.061~0.032	-0.055~0.025
2	-0.590~1.818	-0.419~0.995	-0.302~0.449	-0.247~0.212	-0.111~0.038	-0.051~0.028

表3统计了方案实施后航槽内平均流速的变化。与工程前相比,两种方案实施后航槽内的流速总体以增加为主,最大增幅分别为0.798、0.995 m/s,主要发生在整治流量 $Q=5\,920\text{ m}^3/\text{s}$ 时。同时也可看出,方案2对于水流的调节作用更强烈,流速增幅普遍大于方案1。而从航槽内流速沿程变化来看(图7),主要表现为整治区上游流速降低,下游流速大幅增加,这正是整治方案希望的变化方向。工程后,原本循左岸深槽而下的水流,在鸽子碛丁坝束缚下,被推向了河道中部,随着河道变窄,整治区航槽内水流流速也随之增加,改变了该区域的水沙平衡条件,原本堆积于河床的泥沙被冲走,从而维持疏浚挖槽的稳定,而整治区上游主要是受到下游坝体壅水影响,流速有所降低。

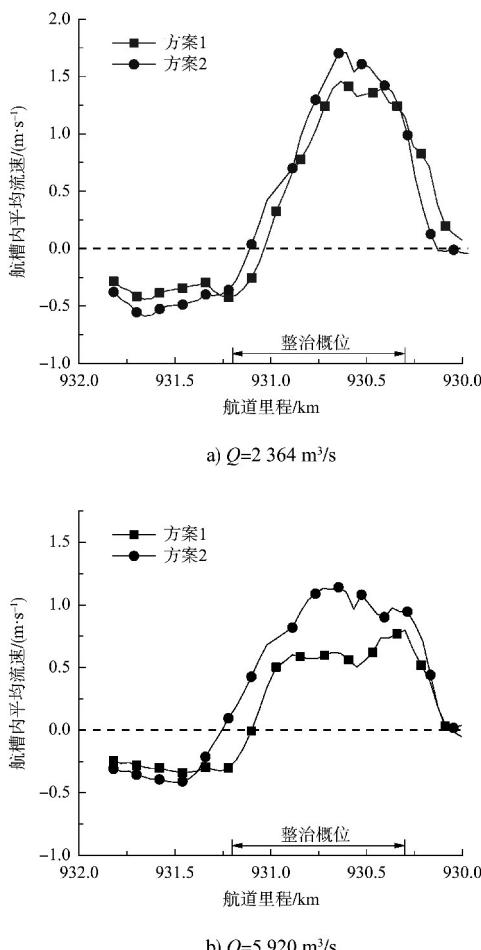


图7 航槽内流速沿程变化

消滩判数是判断船舶能否自航上滩的重要指标,根据许光祥等^[10-11]、杨胜发等^[12]国内学者的研究,并结合观音背河段船舶特性,采用 $E=0.628J+\nu$ 作为判别指标,其中 J 为水面比降, ν 为表面流速。当 $E<3.92$ 时,表明滩段水流能够满足代表船舶自航上滩的条件,反之,表明船舶在该滩需要借助外力上滩。如图8所示,方案实施后,整治区急滩消滩判数均有较大幅度增加。比较而言,方案1整治区的急滩消滩判数总体略小于方案2。前者整治区消滩判数虽有所增加,但由于方案前本滩消滩判数总体较小,方案实施后虽然流速大幅增加,滩段全线消滩判数仍均在临界值3.92,水流条件没有发生恶化。方案2实施后局部消滩判数超过临界值3.92,水流条件有所恶化,不利于船舶自行上行。

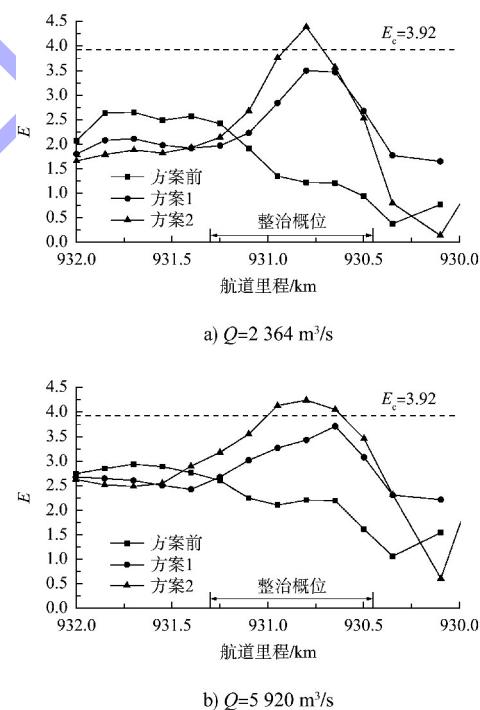


图8 方案前后沿程消滩判数变化

从计算的流态来看,方案实施以前,受左岸深槽吸流影响,主流偏左下行,与现有航线夹角较大,船舶上行只能循左岸而上,存在较大的安全风险。方案实施后,水流向河心集中,流线更加顺直,与主航槽方向基本一致。

观音背滩整治的主要目的是解决左岸鸽子碛边滩受人为活动影响边滩完整性遭到破坏，造成过水面积增大、水流分散，浅区得不到有效冲刷而出浅的问题。总体而言，由于该滩既有筑坝工程也有疏浚工程，对河道边界影响较大，因此水流条件变化也较大。在设计流量和整治流量下，工程实施后航槽内水深及流速均有明显增加，达到了规划尺度要求，实现了整治目标。而随着流量的增加，整治建筑物被水流淹没，工程对水流条件的影响也随之减弱。

5.3 方案比选

观音背滩鸽子碛暗礁浅区部位经开挖后航道水深增加，通航尺度增大，江心部位船舶可通航水域增大，避免船舶紧抱鸽子碛航行、上水易擦浅的问题。同时辅以 3 道丁坝或者 1 道丁顺坝恢复鸽子碛边滩形态，约束水流冲刷暗礁浅区部位，预防暗礁再次淤积，维持主槽通航水深。2 种观音背整治方案均能达到改善通航环境的目的。方案 1 采用丁坝方案，航槽与原习惯航线一致，方案 2 采用丁顺坝方案，在浅区部位航线路略有右移，航线更加顺直。通过比较可知，方案 2 疏浚工程量略大于方案 1；从 2 个方案对鸽子碛边滩恢复的功能来看，丁顺坝对碛坝的掩护作用更强，更有利于滩体的恢复，但丁顺坝方案较丁坝方案坝体深入江中范围较大，一方面会造成局部流态较差，船舶自航上行困难，另一方面对防洪影响略大。因此，本文确定方案 1 为推荐方案。

6 结语

1) 通过对观音背滩碍航特性进行分析，认为该滩主要问题为左岸鸽子碛边滩遭到破坏后，主流偏向左岸，与参考航线相差甚远，船舶上行时距岸线较近，易发生安全事故；同时随着鸽子碛

边滩的破坏，导致河道过水面积增加、水流分散，浅区得不到有效冲刷而出浅碍航。

2) 整治方案实施后，显著增加了航槽内的水深及流速，浅区部位得到有效冲刷，水流流向与航槽走向基本一致，航槽内无明显横流与斜流，通航水流条件较好。

参考文献：

- [1] 长江重庆航运工程勘察设计院. 长江上游合江门至界石盘河段生态航道建设工程工可报告[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2016.
- [2] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [3] 吴持恭. 水力学(下册)[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 1984: 65-70.
- [4] 肖毅, 张帅帅, 杨胜发, 等. 长江上游采砂分布及破坏滩群恢复能力模拟研究[J]. 水运工程, 2020(11): 127-131, 154.
- [5] 陆永军, 张华庆. 平面二维河床变形的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 1993(3): 273-284.
- [6] 邓明月. 长江上游三眼灶潜碛汊流浅滩整治研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- [7] 李家世, 何熙, 谢玉杰. 山区河流弯曲分汊型浅滩整治技术[J]. 珠江水运, 2021(17): 79-80.
- [8] 张小龙. 长江上游叙渝段枯水浅急型卵石滩的整治技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [9] 陈凯. 长江上游典型浅险滩整治措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [10] 许光祥, 曾峰. 急滩消滩水力指标的合理表达式[J]. 水运工程, 2010(11): 103-106.
- [11] 许光祥, 邓明文, 童思陈, 等. 急滩通航水力工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [12] 杨胜发, 赵晓马, 王涵. 长江上游卵石急滩消滩水力指标研究[J]. 水运工程, 2007(8): 78-81, 92.

(本文编辑 王传瑜)