



松花江牯牛哨滩河段航道整治方案比选*

周日顺¹, 黄振祥², 王涛³, 杨胜发¹

(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. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410203; 3. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

摘要: 牯牛哨滩是松花江中游主要的碍航浅滩, 该滩段河道水浅槽窄、滩口流急并伴随横流等碍航水流, 严重影响船舶通航以及生态旅游航道的建设。针对此问题, 采用二维水流数值模拟方法对牯牛哨滩河段的碍航水流特性进行研究, 对比分析 3 种航道整治方案的效果。结果表明, 采用复式断面航槽疏浚及生态闸坝建造的方案后, 该滩段通航水深大于 1.78 m, 枯水期平均比降仅为 0.29‰, 平均消滩水力指标远小于 2.06, 流态良好, 满足航道治理要求。研究成果可为该类滩险的航道整治方案选择提供科学依据。

关键词: 航道整治; 牯牛哨滩; 数学模型; 松花江; 方案比选

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0119-07

Comparison and selection of waterway regulation scheme for Mangniushao reach in Songhua River

ZHOU Rishun¹, HUANG Zhenxiang², WANG Tao³, YANG Shengfa¹

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

2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey&Design Institute Co., Ltd., Changsha 410203, China;

3. Changjiang Chongqing Harbor and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China)

Abstract: Mangniushao Beach is a major obstruction to navigation in the middle reaches of Songhua River. The shallow channel, narrow channel and rapid flow at the mouth of the beach, accompanied by cross-flow and other obstruction to navigation, have seriously affected the navigation of ships and the construction of eco-tourism channel. To solve this problem, two-dimensional numerical simulation is used to study the characteristics of the obstructing current in Mangniushao reach, and the effects of three channel regulation schemes are compared and analyzed. The results show that the navigable water depth of the beach section is greater than 1.78 m, the average slope in dry season is only 0.29‰, and the average hydraulic parameter of rapids abating is far less than 2.06. The flow pattern is good and meets the requirements of channel management. The research results can provide scientific basis for the selection of channel regulation scheme of this kind of beach.

Keywords: channel regulation; Mangniushao Beach; mathematical model; Songhua River; scheme comparison

松花江发源于长白山天池, 吉林省段流域面积 7.34 万 km², 河长 958 km^[1]。松花江作为吉林省重要的内河航运通道, 对省内社会经济发展、生态景观建设起到十分关键的作用。牯牛哨滩是

松花江中下游哈达湾—哨口拦江坝段的典型碍航浅滩(图 1), 航道里程 38~39 km。该滩段弯道处的江心滩面积较大, 其碍航特征主要表现为枯水期水深明显不足, 中洪水期仍存在局部水域水深

收稿日期: 2023-08-04

*基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX0490)

作者简介: 周日顺(1998—), 男, 硕士研究生, 从事航道整治研究。

通讯作者: 杨胜发(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事航道工程教学与科研工作。E-mail: ysf777@163.com

不足、流速过大、横流明显等问题,导致所在河段多年未通航。因此,为解决该河段船舶通航问

题、进一步促进吉林省航运与旅游融合发展,对牯牛哨滩进行航道整治十分必要。

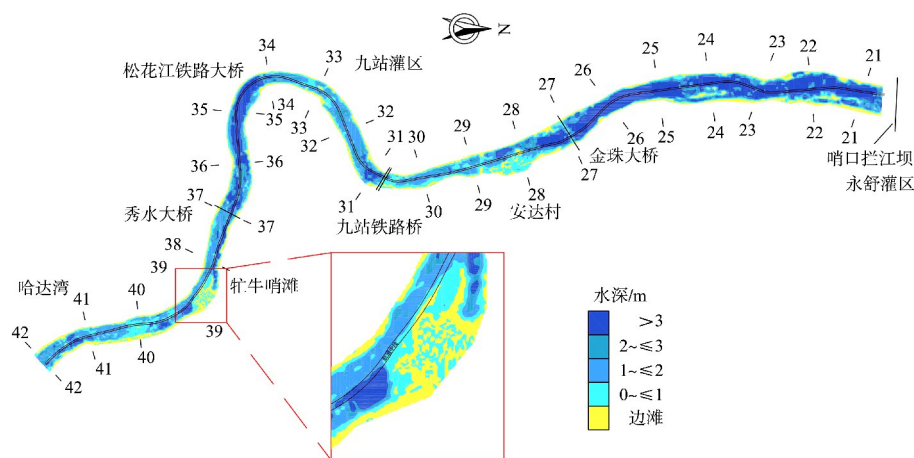


图1 牯牛哨滩地理位置

许多学者针对河流碍航浅滩的整治进行了大量的研究,何艳军等^[2-3]认为碍航程度较轻的一般过渡段卵石浅滩可以通过单纯疏浚技术进行治理,后通过物理模型试验研究了长江上游九龙滩航道整治优化方案;李顺超等^[4-5]先对岷江新开河滩段Ⅲ级航道工程开展河工定床模型研究,后又结合自航船模试验对岷江下游霸王滩滩群弯曲分汊型航道整治方案进行研究;钟亮等^[6]基于二维水流泥沙数学模型对长江上游胡家滩航道整治方案进行研究,结果说明采用筑坝、疏浚与炸礁相结合的方法较为有效。消滩水力指标是判别船舶能否自航上滩的临界水流条件,是分析浅急滩整治效果的重要参数,许光祥等^[7]给出消滩综合指标及其简化的基本判式,提出综合指标还存在一般抛物线、直线或折线型等精度更高的判式;杨胜发等^[8]利用概化水槽船模试验结果率定理论计算参数,得到叙渝段标准船队消滩水力指标;胡小庆^[9]采用航行阻力推算法和船模试验法对长江宜宾—重庆河段急滩消滩水力指标进行研究,确定该河段的消滩比降、流速组合。然而,对于松花江中游航道整治的研究相对较少,早期的研究主要集中在松花江下游,采取的整治措施以疏浚为主,再结合其它方案如爆破^[10-11]、修建整治建筑物^[12]等,均取得了显著效果。

综上所述,对浅急滩的航道整治需要因地制

宜,目前还没有针对牯牛哨滩的相关研究,且该河段水文资料有限,本文采用二维水流数学模型深入分析牯牛哨滩段的碍航特性,提出3种整治方案,最终比选出最优整治方案。

1 数学模型建立及验证

1.1 数学模型构建

根据2021年4月实测地形资料建立研究河段的二维水流数学模型,该数学模型范围从哈达湾—哨口拦江坝,全长20.61 km。计算区域采用三角形网格离散,网格总数为6.791万个,对河段中航槽以及桥墩工程部分进行局部加密处理,模型网格见图2。

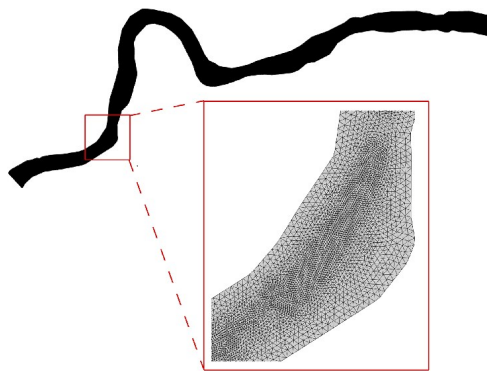


图2 研究河段网格

水流连续方程:

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

水流动量控制方程:

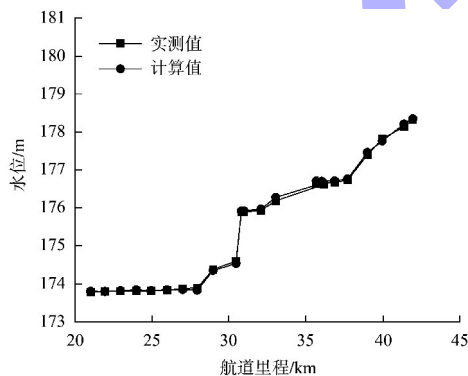
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - f v - \frac{\varepsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

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

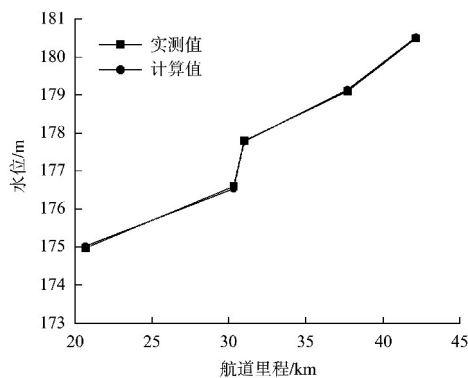
式中: t 为时间; u 、 v 分别为沿 x 、 y 方向的流速; h 为水深; η 为床面高程; g 为重力加速度; ε_{xx} 、 ε_{xy} 和 ε_{yy} 为紊动黏性系数, 取为 $\alpha h u_*$, 其中 α 取 3~5, u_* 为摩阻流速。

1.2 模型验证

根据 2021 年枯水 ($Q = 199 \text{ m}^3/\text{s}$)、洪水 ($Q = 1\,240 \text{ m}^3/\text{s}$) 实测水文资料, 对数学模型进行验证, 结果见图 3~5。枯、洪水 2 种工况的水位计算值与实测值误差均小于 $\pm 0.1 \text{ m}$, 流速差值均在 0.2 m/s 以内, 水位流速验证结果基本满足相关规范要求。本河段中枯水期糙率取为 0.028, 洪水期糙率取为 0.033。

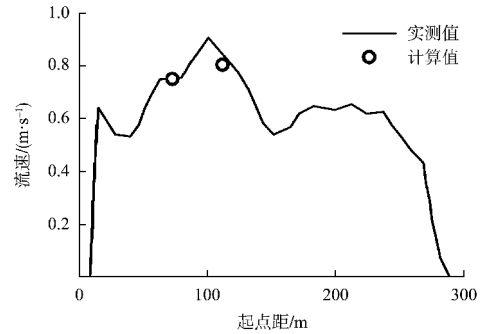


a) 枯水期($Q=199 \text{ m}^3/\text{s}$)

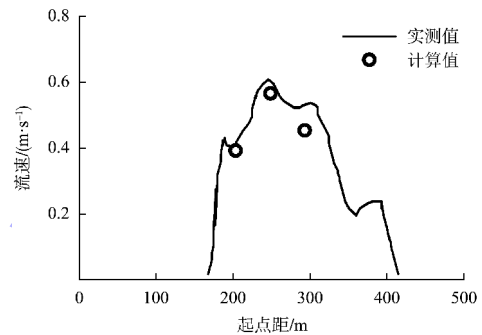


b) 洪水期($Q=1\,240 \text{ m}^3/\text{s}$)

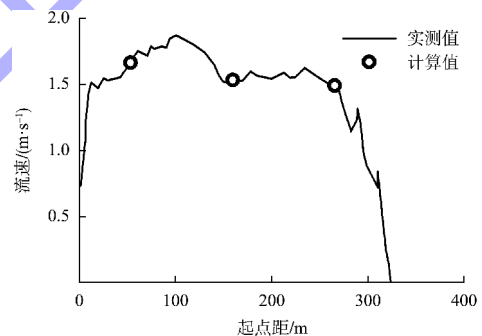
图3 水位验证



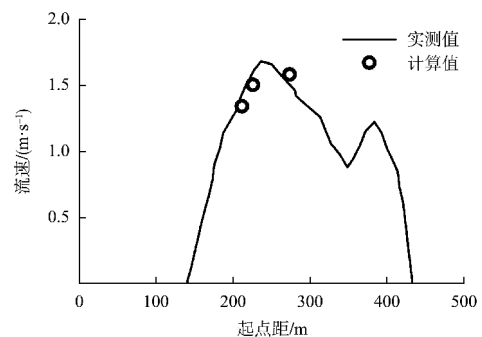
a) 枯水期, DM_3 断面



b) 枯水期, DM_4 断面



c) 洪水期, DM_3 断面



d) 洪水期, DM_4 断面

图4 流速验证

1.3 计算工况

计算工况为模型进口流量和出口水位的不同组合。由于缺乏资料, 相应的出口水位需要根据

进口流量推算得出。根据近几年已有的出口水位流量资料,拟合得到出口水位-流量关系:

$$y = -2.47 \times 10^{-7} x^2 + 0.0015x + 173.47 \quad (4)$$

式中: y 和 x 分别表示水位和流量,拟合关系式相关系数 $R^2 = 0.9996$,残差平方和为 0.00108,表明相关程度高。由式(4)得到的计算工况见表 1。

表 1 计算工况

特征流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	哨口尾水位/m	备注
161	173.71	设计最低通航流量
379	174.00	中水期平均流量
434	174.07	多年平均流量
573	174.25	洪水期平均流量
1 000	174.72	中间流量
1 500	175.16	
2 016	175.49	
		设计最高通航流量

2 碍航特性分析

2.1 航道尺度不足

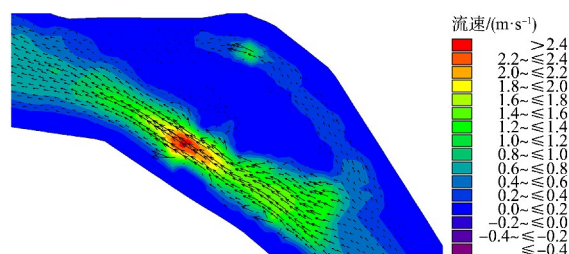
根据数模计算结果,在枯水流量 $161 \text{ m}^3/\text{s}$ 下,牯牛哨滩水深基本在 1.6 m (最小通航水深) 以下,枯水期有效航宽不足百米,最小水深约 0.1 m 。即使流量达到 $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,该滩段依然存在局部水深不足的问题。

2.2 局部比降大

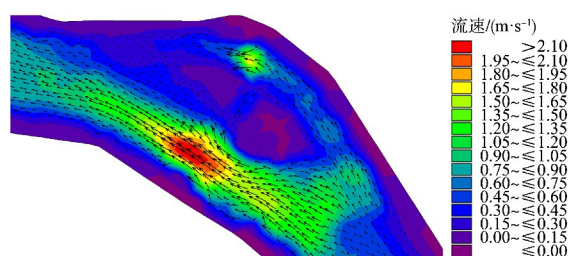
牯牛哨滩河道由窄变宽,导致水位跌落明显,枯水期 1 km 范围内进出口水位差达到 0.75 m ,局部最大比降达到 2.60‰ 。在中水流量 $379 \text{ m}^3/\text{s}$ 下,局部最大比降高达 4‰ ,极不利于船舶通航。

2.3 流态不良

牯牛哨滩整治前流场分布见图 5。该滩段枯水流量下的最大流速达到 1.92 m/s ,洪水期流速可达 2.8 m/s 。中洪水期左汊航道进口处局部水域水深不足、水流较急,且滩口处由于过水面积减小,横流较为明显,并随着水位上涨逐渐流过江心滩后,滩面串沟引起横流乱流,流态较差,对船舶航行不利。



a) 中水期, $Q=379 \text{ m}^3/\text{s}$



b) 洪水期, $Q=573 \text{ m}^3/\text{s}$

图 5 整治前流场分布

3 整治方案设计

3.1 整治思路

针对该滩险的碍航特性,主要采用扩大泄水断面法解决枯水期航道尺度不足的问题,保障在最小流量情况下船舶可正常安全通行;同时考虑消除局部不良流态影响以及生态景观维护,因地制宜提出不同的整治方案。

3.2 整治标准

按内河Ⅳ级航道通航标准,根据满足水上旅游的 100 客位代表船型,确定航道尺度为 $1.6 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 410 \text{ m}$ (航深×航宽×弯曲半径)。

3.3 整治方案

3.3.1 单一航槽疏浚(方案 1)

方案 1 为单一航槽疏浚与扩大过水断面法相结合,主要对航槽内不满足设计水深要求的浅区进行挖深以提高航道尺度。为避免水流归槽而导致航宽减小,航槽两侧扩挖 10 m ,即挖槽宽度调整为 50 m ,方案布置见图 6。

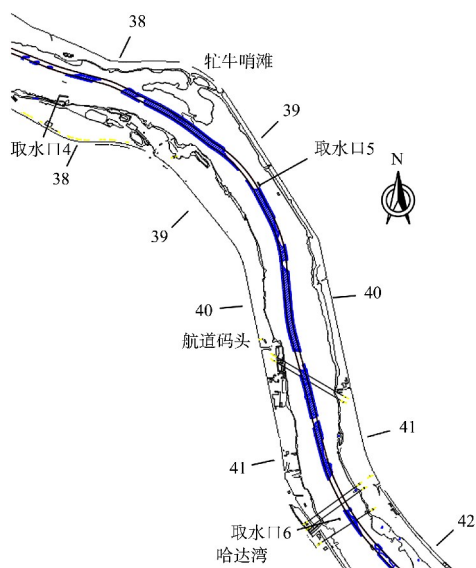


图6 哈达湾—牯牛哨滩整治方案1

3.3.2 复式断面航槽疏浚(方案2)

在方案1基础上,对牯牛哨滩段采用切滩整治,航道右侧扩挖70 m以增大过水断面面积。该方案一方面可消除因断面收缩而引起的斜流、减缓陡比降;另一方面可增加河槽平面面积,避免挖深造成水流归槽明显、滩地裸露而破坏原有河道景观。方案布置见图7。

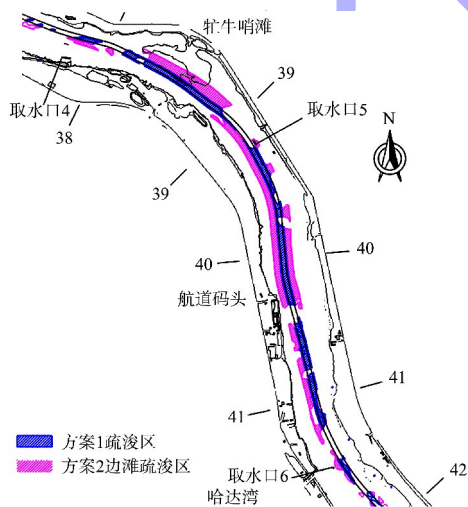


图7 哈达湾—牯牛哨滩整治方案2

3.3.3 复式断面航槽疏浚及生态闸坝建造(方案3)

由于方案2大范围疏浚可能引起水面线下降,导致桥址上游水深条件恶化,因此考虑采取一定的壅水措施。为了兼顾“生态优先”原则,方案3

将原有的哨口拦江坝拆除后,拟在其下游约500 m处新建生态闸坝,将坝前蓄水位抬高至176 m,同时采取方案2的整治措施,哨口拦江坝改造见图8。

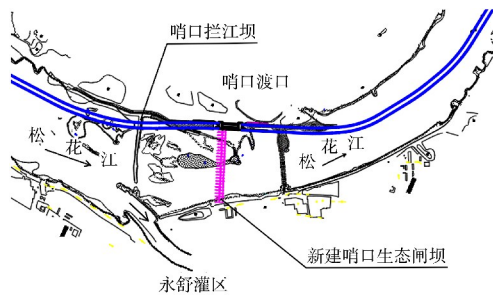


图8 哨口拦江坝改造

4 整治效果对比分析

4.1 水深变化

整治后水深变化见图9。枯水流量下($Q = 161 \text{ m}^3/\text{s}$),方案1、2最低水深接近最小通航水深,分别为1.67、1.65 m,而方案3将蓄水位调整至176 m后,航槽内水深可以达到1.78 m以上,满足IV级航道标准。

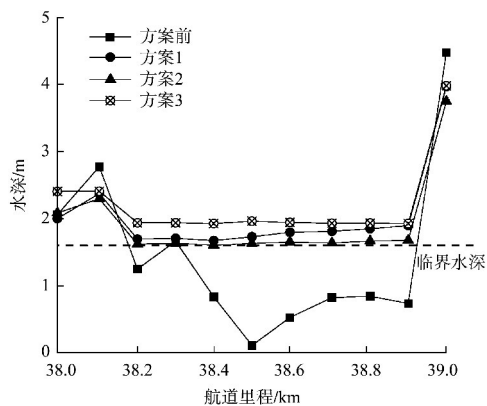


图9 整治后水深变化

4.2 河道比降

不同流量下各方案整治前后比降的沿程变化见图10。由图可知,3个方案对削减河道比降均有一定的作用,但采取方案1、2后,枯水期河道局部最大比降相对较大,分别为1.17‰、1.00‰。方案3采取渠化措施,使该滩段的水流变缓,枯水期局部最大比降仅为0.71‰,平均比降为0.29‰,中洪水期平均比降减小到0.36‰以内,改善明显。

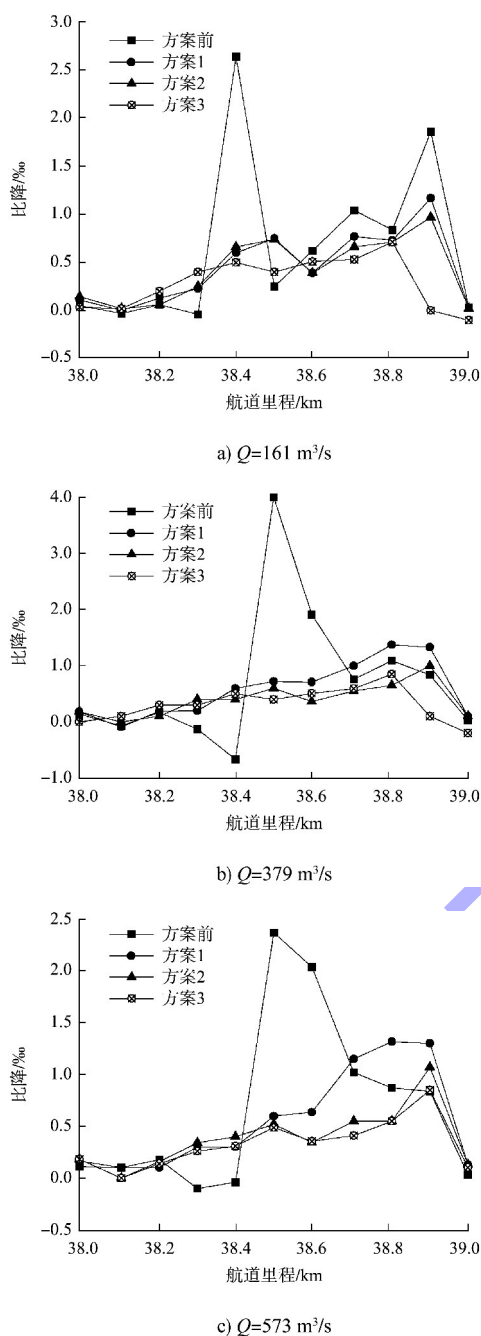


图 10 不同流量下各方案整治前后比降变化

4.3 消滩水力指标

急滩消滩水力指标主要考虑流速和比降，是判定船舶能否自航上滩的临界水流条件，也是航道整治中浅急滩整治效果的重要依据指标。综合消滩指标 E 公式：

$$E = 0.165J + v < (E_c = 2.06) \quad (5)$$

式中： J 为比降； v 为流速。

不同流量下各方案整治前后的消滩水力指标变化见图 11。可以看出，在中洪水流量下，方案 1 整

治后，多处位置消滩水力指标大于 2.06，最大达到 2.45，船舶不能自航上滩。方案 2、3 整治后的平均消滩水力指标分别不大于 1.89、1.49，但方案 2 整治后局部消滩水力指标接近临界值。相比之下，方案 3 整治后船舶自航上滩的水流条件比较稳定。

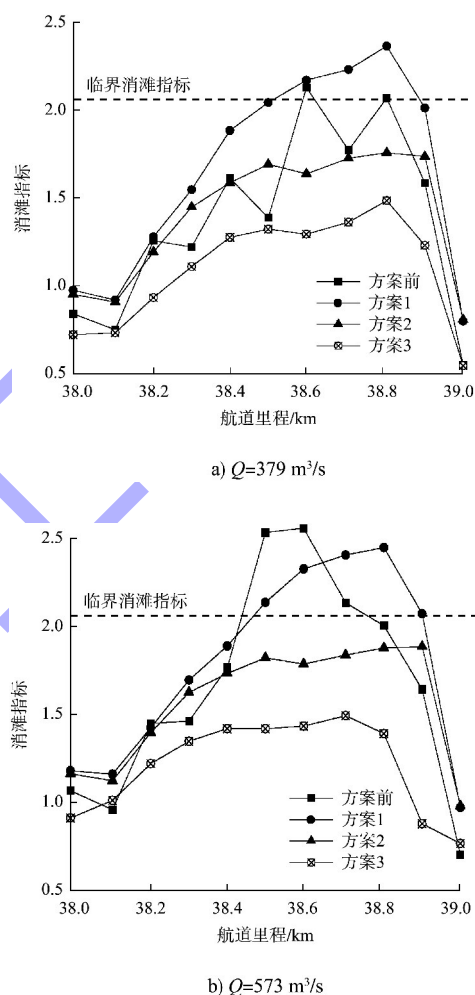


图 11 不同流量下各方案整治前后消滩指标变化

4.4 流速变化

整治后的流场分布见图 12。方案 1 整治后在中洪水流量下 ($Q = 573 \text{ m}^3/\text{s}$) 的最大流速反而增加，分别为 2.14、2.23 m/s，且仍存在明显的斜流。方案 2、3 对减缓流速都有一定的效果，但方案 2 取水口 5 处的流速仍达到 1.00 m/s，同时存在一定的斜流干扰船舶通行。方案 3 整治后整体流速变化稳定，取水口 5 处的流速约 0.50 m/s，无不良流态产生，进口段的水流流向顺直，左汊流速最大为 1.12 m/s。

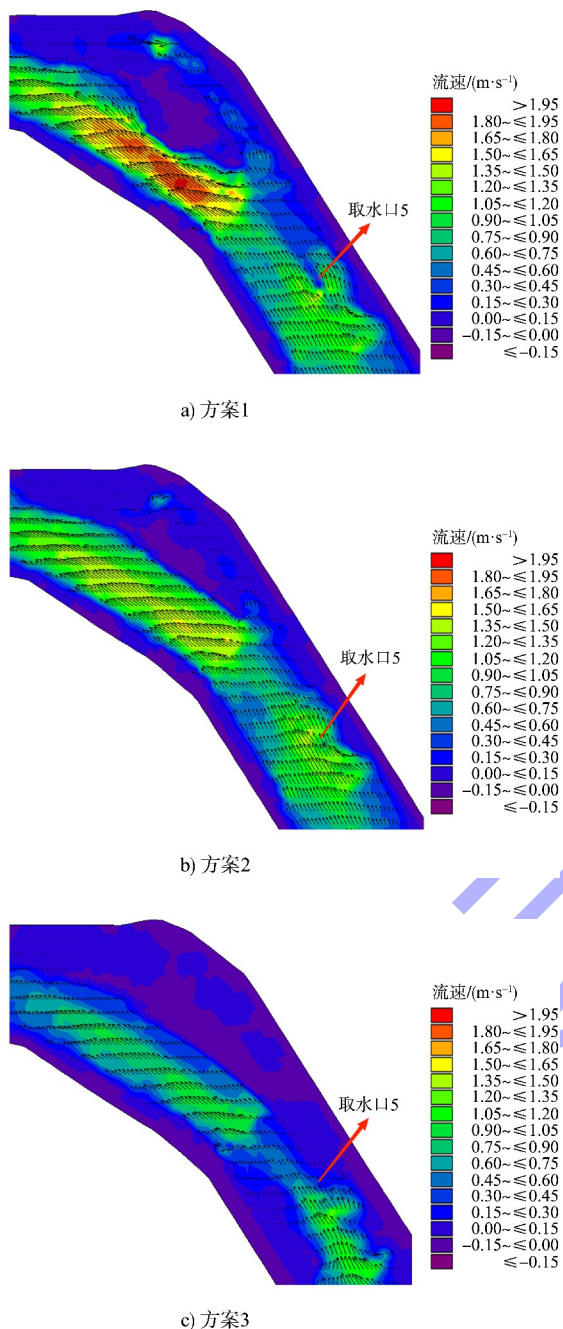


图12 牯牛哨滩段整治后流场分布

4.5 对河道景观的影响

建设生态旅游航道需要考虑枯水期边滩出露的问题。结合数模计算成果,方案1整治后,航道内水深增加,水流归槽明显,导致进口处有边滩出露,右岸边滩面积增加0.75万 m^2 ;方案2整治后,航道右侧边滩水深增加至0.4 m左右,右岸边滩面积减小1.90万 m^2 ;方案3整治后,边滩面积较整治前减小2.30万 m^2 。

4.6 方案比选

由以上分析可知,方案1整治后,河段水深不足、流速快、局部比降大等问题并没有得到有效解决;方案2采用复式断面整治后,研究河段的流速变缓,流态得到改善,取得了一定的效果,但局部大比降、局部流态紊乱等问题仍然存在;方案3整治后,河段水深达到1.78 m以上,有足够的通航尺度,且流速明显减缓,无不良流态;由于采取了渠化措施,局部大比降问题也得到解决,同时大幅度减少了边滩出露面积,有利于生态旅游航道的建设。故推荐方案3为最优方案。

5 结论

1) 牯牛哨滩位于吉林市区雾淞岛河段,是松花江中游的典型碍航浅滩,在枯水流量下,牯牛哨滩水深基本在1.6 m以下,有效航宽不足百米,在中水流量下,局部最大比降高达4‰,且随着水面漫过江心滩后,滩面串沟引起横流乱流,流态较差,通航条件恶劣。

2) 建立了牯牛哨滩所在河段的二维水流数学模型,并从多个方面对3种方案的整治效果进行对比分析。结果表明,采用复式断面航槽疏浚及生态闸坝建造的方案后,该滩段通航水深在1.78 m以上,枯水期平均比降仅为0.29‰,平均消滩水力指标远小于2.06,同时无不良流态产生,边滩出露面积减小2.30万 m^2 ,满足航道治理要求,故推荐方案3为最优方案。

参考文献:

- [1] 宫晓艳,卞建民,王宇,等.松花江吉林段傍河地带地下水化学特征及成因[J].人民长江,2018,49(11):19-23,28.
- [2] 何艳军,马李伟,何旭,等.单纯疏浚技术在长江上游卵石浅滩整治中的应用[J].水道港口,2013,34(3):239-242.
- [3] 何艳军.长江上游九龙滩航道整治方案及效果分析[J].水运工程,2022(8):121-128.

(下转第182页)