

长江上游火焰碛滩航道整治工程方案

郭琦, 扈蓓蓓, 彭毕帅

(长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

摘要: 针对长江上游火焰碛滩易出浅碍航、航槽内水深不满足规划要求的问题, 提出两种不同的整治方案。采用非结构化网格, 建立工程河段的平面二维水流数学模型。使用原型实测水文资料验证模型的可靠性, 通过计算得出两种方案在不同工况下的水位、流场、消滩判数等主要参数。结果表明: 两种方案均能实现预期整治目标, 但通过后延火焰碛顺坝并新建3道刺坝的整治建筑物布置方案, 工程量较大, 且封堵了后续滩段航槽调整的可能; 通过延长顺坝坝头接岸的方案, 大幅降低了工程量, 也为后续滩段航道调整留有空间。

关键词: 长江上游; 碍航特性; 航道整治; 二维水流模型

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0108-07

Channel regulation project plan for Huoyanqi Beach in upper reach of Yangtze River

GUO Qi, TUO Youjia, PENG Bishuai

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

Abstract: In view of the problem that the Huoyanqi Beach in the upper reach of the Yangtze River is prone to being shallow and obstructs navigation, and the water depth in the navigation channel does not meet the planning requirements, we propose two different regulation plans. We use the unstructured grid to build a planar two-dimensional flow mathematical model of the engineering river section, apply the measured hydrological data of the prototype to verify the reliability of the model, and calculate the main parameters such as water level, flow field, and beach dissipation criterion of the two plans under different working conditions. The results show that the two plans can achieve the expected regulation goals. However, the regulation building layout plan of extending the Huoyanqi dam and building three new spur dams requires a large amount of work and blocks the possible of subsequent adjustment of the navigation channel in the beach section. By extending the plan of connecting the dam head to the shore, the amount of engineering work is greatly reduced, and it also leaves space for subsequent adjustments to the channel in the beach section.

Keywords: upper reach of the Yangtze River; obstructing characteristics; channel regulation; two-dimensional flow model

长江横贯我国东、中、西三大经济地带, 是连通西南、华中和华东地区的水路交通运输大动脉, 集“黄金水道”和“黄金岸线”于一身, 在我国实施区域发展战略中具有十分重要的地位。长江航运对沿江经济社会发展的支撑和保障作用显著增强, 在我国内河水运体系中起着极其重要的作

用, 在促进区域经济快速发展中扮演着重要角色。火焰碛滩位于长江上游火焰碛水道(航道里程921.00~925.00 km), 水道长约4.0 km, 形似上下游窄中间宽的大肚子河段, 属枯水浅险滩, 历史上曾多次对其进行治理。该滩近年受无序挖沙采石影响, 水中坝边滩和火焰碛边滩滩体完整性

收稿日期: 2024-01-30

作者简介: 郭琦(1990—)男, 工程师, 从事港口与航道工程设计。

受到破坏,造成原有的束水功能有所减弱,滩内浅区易出浅碍航。根据《长江经济带发展规划纲要》^[1],拟将长江上游宜宾合江门—界石盘河段(上游航道里程 1 044~816 km)航道等级提升至内河 I 级,通航水深提升至 3.5 m,而火焰碛滩是该河段内重要的碍航滩险之一^[2]。

采用水流数学模型开展研究,在航道整治工程中有着广泛的应用^[3-5]。为确保火焰碛滩整治后,滩段航道条件得到明显改善,航道尺度满足规划的内河 I 级标准要求,采用平面二维水流数学模型对不同工况下,工程实施前后的水流条件进行模拟,再对模拟结果进行分析,综合论证后提出最优的整治方案,旨在为后续工程设计提供依据^[6]。

1 滩险概况及近年演变

1.1 滩险概况

火焰碛滩位于上游航道里程 924.1 km,全长

1.8 km,为枯水浅滩。其浅区位于火焰碛脑的过渡段。滩段左岸为沙岩河岸,在地形上处于弯道河岸的凹岸,岸线极不规则,有多处突嘴,其中 1 处突嘴伸入江中 70 m 以上,与右岸火焰碛对峙。右岸为沙质河岸,洪水时被冲刷。右岸下边滩为火焰碛,碛脑伸向江中,形成鞍凹;碛坝为砂卵石组成,较为平坦,见图 1。在洪水期,水流漫过火焰碛,主流流向右岸。由于火焰碛被淹后河面放宽超过 1 200 m,加上火焰碛脑阻水,使得水流速度减缓,砂卵石在航槽内大量落淤。在枯水期,水流逐渐归槽,流速也较大,航槽中的淤积物得到冲刷,但因受上游弯道河段的影响,偏向右岸的主流将直冲火焰碛脑鞍凹,水流受阻后流向左岸的突嘴。由于火焰碛和左岸的突嘴相对,使江面突然缩窄,从而形成强烈的泡漩水和横流,流态非常紊乱,且水位越枯,流态越乱,船舶通航困难。

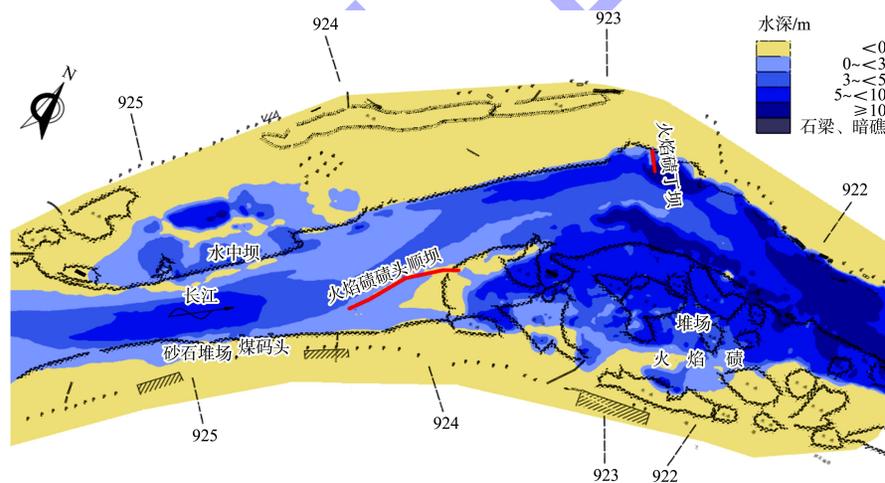


图 1 火焰碛滩河势

1978—1979 年实施的兰叙段一期航道建设工程在右岸火焰碛上游抛投 1 道碛头倒顺坝,在左岸弯顶部位抛筑 1 道丁坝,结合疏浚工程,整治后火焰碛滩流乱水浅的情况得到较好改善,航道维护尺度得以显著提高。目前浅区部位水深大部分在 2.8 m 左右。

1.2 近年河床演变

火焰碛滩段近年主航槽部位总体稳定,浅区部位近年冲淤变化稍明显,2016 年对火焰碛浅区

部位进行了疏浚挖槽施工,目前挖槽区域有小幅回淤;水中坝边滩和火焰碛边滩受无序挖沙采石影响,水中坝中部出现明显深坑,2016 年以后局部略有淤高,火焰碛滩体下段已经被完全破坏,近年总体变化不大。

从火焰碛河段近年变化情况来看,预计以后一段时间内主槽部位发生明显冲淤变化的可能性较小,浅区部位仍会遵循汛期淤积、枯水期冲刷的一般规律,但是受火焰碛滩体破坏束水能力减

弱的影响,枯水期冲刷力度可能会有明显减弱,后续航道维护难度和强度都可能增加。另外,火焰碛滩体受破坏严重,在异常洪水作用下,仍存在河道滩槽格局改变的可能。

2 滩险碍航特性

2.1 碍航特性

1) 滩段下部河床突然放宽,水流分散,流速减缓,中洪水期有部分卵石在过渡段落淤。而上、下边滩均较为低平,归槽水位低,水流冲刷力不足,形成过渡段浅滩碍航,浅区长达 650 m,最小水深仅 2.8 m。

2) 火焰碛经过修筑顺坝、丁坝使得通航条件有了根本性改善,目前不满足 3.5 m 的建设尺度要求,浅区段枯水期河面宽度在 340 ~ 407 m, 3.5 m 等深线在火焰碛脑处断开,累积断开距离约 258 m。

2.2 滩险成因

火焰碛滩浅区处于火焰碛脑的过渡段,滩段左岸为砂岩河岸,在地形上处于弯道河岸的凹岸,岸线极不规则,有多处突嘴,其中 1 处突嘴伸入江中 70 m 以上,与右岸火焰碛对峙。右岸为砂质河岸,洪水时被冲刷。右岸下边滩为火焰碛,碛脑伸向江中,形成鞍凹;碛坝为砂卵石组成,较为平坦。在洪水期,水流漫过火焰碛,主流流向

右岸。由于火焰碛被淹后河面放宽超过 1 200 m,加上火焰碛脑阻水,使得水流速度减缓,砂卵石在航槽内大量落淤。在枯水期,水流逐渐归槽,流速也较大,航槽中的淤积物得到冲刷,但因受上游弯道河段的影响,偏向右岸的主流将直冲火焰碛脑鞍凹,水流受阻后流向左岸的突嘴。由于火焰碛和左岸的突嘴相对,使江面突然缩窄,从而形成强烈的泡漩水和横流,流态非常紊乱,且水位越枯,流态越乱,船舶通航困难。

3 设计整治方案

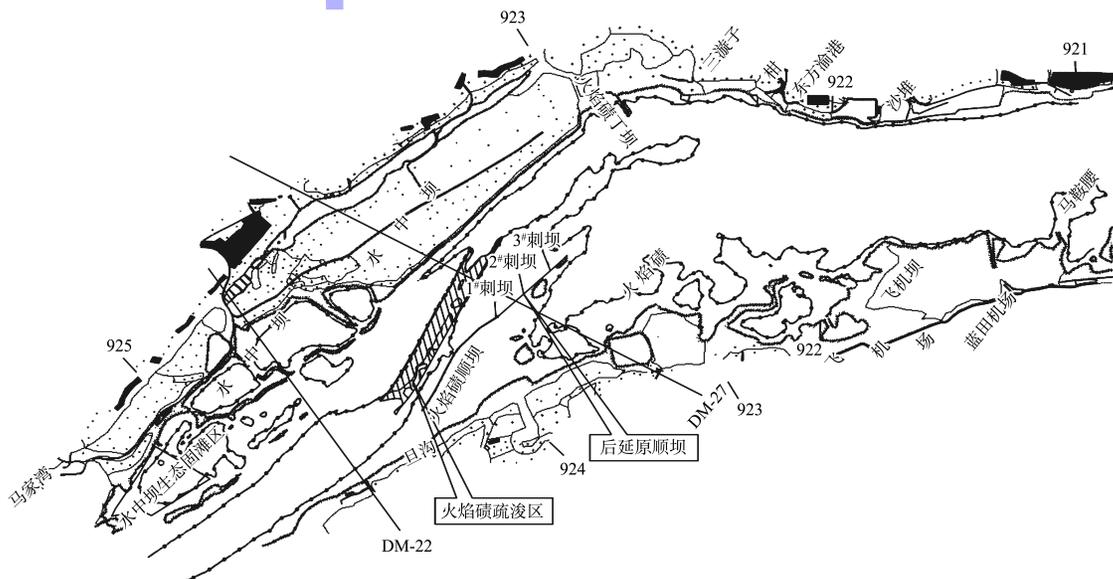
3.1 整治思路

火焰碛河段形似上下游窄中间宽的大肚子河段,滩段左岸为砂岩河岸,有巨大的水中坝边滩,与右岸火焰碛对峙,水道内主要为砂质河岸。近年受人为挖砂采石活动影响,部分滩体完整性受到破坏。滩段碍航问题主要是火焰碛浅区水深不足碍航。

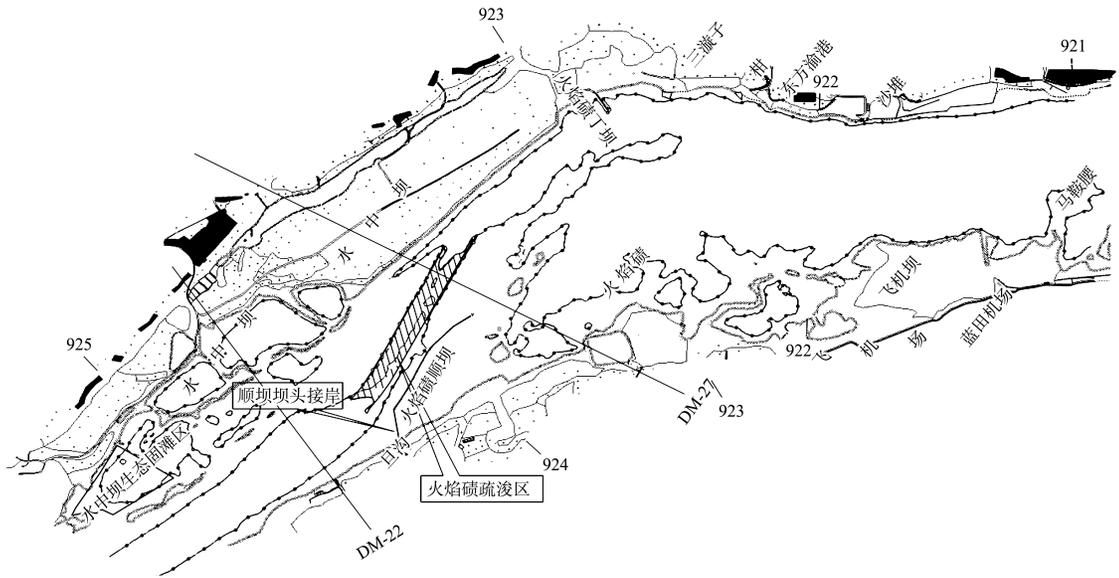
火焰碛滩段的治理思路为:疏浚浅区,对原顺坝进行改建和加高,以增大主槽部位的冲刷力度,维持碍航部位的通航水深^[7-8]。

3.2 整治方案

火焰碛滩的设计水位为 224.38 ~ 224.99 m,根据该滩的碍航特性,并基于滩段的治理思路,拟定了 2 种整治方案,其平面布置见图 2。



a) 方案1



b) 方案2

图 2 整治方案平面布置

方案 1 浅区部位附近航槽沿浅区最深位置布置, 与目前习惯上行航线一致。对航槽范围内的浅区进行疏浚, 疏浚基线沿主航槽布置。控制基线长度为 870.0 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, 疏浚边坡 1:3, 疏浚水深在航道标准水深 3.5 m 基础上, 加 0.2 m 的备淤水深取 3.7 m, 疏浚底高程 220.68~221.29 m。为归顺滩段水流, 维持疏浚挖槽区的稳定, 延长火焰碛顺坝, 并在延长段新建 3 道刺坝。向下游延长顺坝, 顺坝延长 390 m, 延长后顺坝总长 890 m, 新建 1#~3# 刺坝长度分别为 70、85、90 m; 并将原火焰碛丁坝坝头顶高程加高至设计水位以上 2.5 m。

方案 2 航槽布置和走向与方案 1 基本一致。疏浚工程区平面布置及设计参数与方案 1 相同。整治建筑物布置采用延长火焰碛坝坝头顶部, 并与岸坡相接, 限制坝体后方过流, 以增大主航槽的过流量。加高原顺坝, 并向上游延长顺坝接岸, 延长段长度 150 m。顺坝改建后总长 650 m, 坝顶高程为设计水位以上 2.5 m。

4 数学模型的建立与验证

4.1 模型的建立

研究范围以火焰碛滩过渡段浅区为主, 并考

虑模型计算所需进出口长度, 上游起点为马家湾 (航道里程 926 km)、下游出口为马鞍腰 (航道里程 921 km), 全长约 5 km。

二维水流模型采用非结构化的网格建立, 控制方程基于不可压雷诺应力平均、Boussinesq 假设和静水压力分布建立, 并采用控制体积法对水流控制方程进行离散。由于河道边界较为不规则, 为与河道边线更为贴合, 采用非结构化的三角网格, 并对工程区域进行局部加密, 加密区网格间距约为 5 m, 以更准确模拟航道整治效果。计算域内共设置 10.568 5 万个网格、5.323 5 万个节点网格间距取 10~50 m, 见图 3。

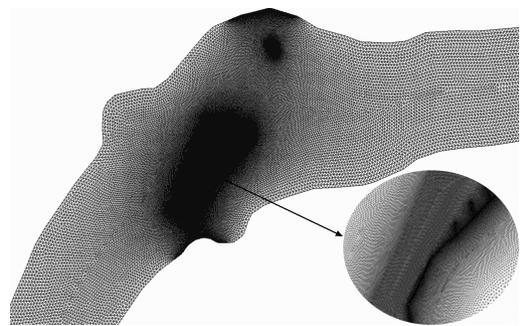


图 3 模型计算网格

4.2 模型验证

模型采用 2016 年实测地形和水文成果等数据进行验证, 验证内容包括实测水面线和流速分布。

5.2.2 航槽内水力参数

1) 水位变化。与工程前相比, 不同流量水位变化有所差异, 见图 7。 $Q=2\ 364\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 方案 1 与 2 航槽内水位变化基本一致, 主要受到挖槽疏浚的影响, 里程 923.8 km 以上河段水面降落, 最大跌落幅度约 0.1 m; 整治水位 ($Q=5\ 920\ \text{m}^3/\text{s}$) 时, 整治建筑物的束水导流作用开始发挥, 由于两种方案中建筑物布置存在差异, 航槽内水位变化也有所不同。方案 1 顺坝延长段以上 (里程 923.5 km 以上), 受到下游新建延长段和刺坝束窄河槽的影响, 水位略有抬升, 抬升幅度 0.005~0.128 m, 此后几乎不变; 方案 2 受坝体加高和坝后方过流减少的影响, 主槽内流量增加, 火焰碛坝头坝原坝根 (里程 924 km) 以上部位水位较工程前有所抬升, 增加幅度 0.001~0.132 m, 以下基本变化不大。而随着流量加大, 建筑物对水流的束缚作用减弱, 至洪水流量时, 航槽内水位总体变化不大。

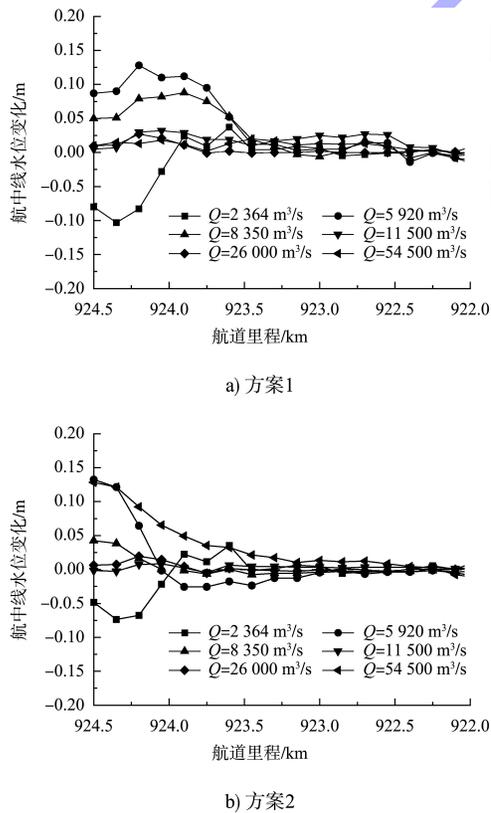


图 7 航槽内水位沿程变化

2) 流速变化。方案 1 实施后, 设计流量下浅区 (里程 923.5~924.3 km) 流速略有降低, 整治流

量至中水流量时, 浅区流速有所增加, 这正是整治方案希望的变化方向, 见图 8。 $Q=2\ 364\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 航槽内流速有小幅下降, 变化幅度在 0.05 m/s 以内; $Q=5\ 920\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q=8\ 350\ \text{m}^3/\text{s}$ 和 $Q=11\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 浅区流速增幅较大, 增加幅度 0.22~0.48 m/s, 达到了加大浅区冲刷力度和时间的目的。 $Q=26\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 和 $Q=54\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 水流漫过边滩, 整治工程的作用不明显, 航槽内水流流速基本变化不大。方案 2 实施后, $Q=2\ 364\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 浅区流速增幅为 0.061~0.112 m/s, 相比方案 1 流速有所增大, 主要与坝后方分流减小, 主槽流量增加有关; $Q=5\ 920\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 浅区流速增幅为 0.162~0.357 m/s, 达到了预期整治目标, 但与方案 1 相比流速增幅略有降低; $Q=8\ 350\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 浅区流速增幅仍能保持在 0.14 m/s, 为增加浅区冲刷, 减缓急区碍航程度均较为有利。

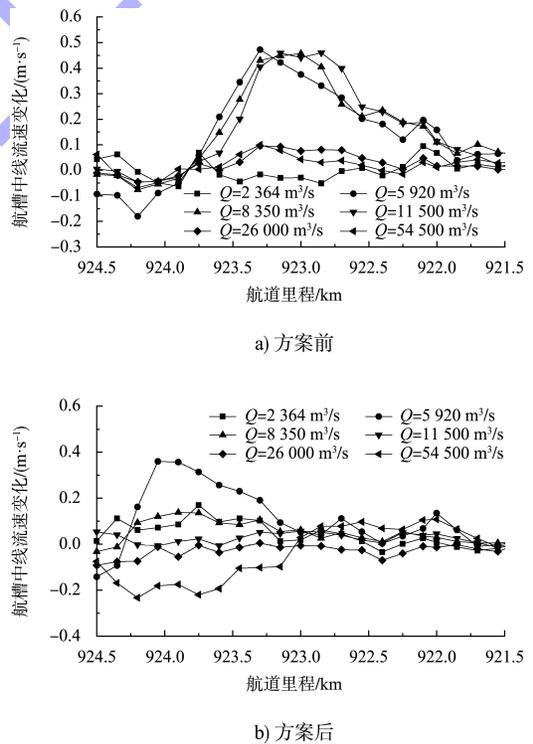


图 8 方案前后航槽内流速沿程变化

3) 消滩判数变化。消滩水力指标是反映是否成为急滩以及设计方案整治效果依据的重要指标。通常采用表面流速 v 与水面比降 J 表示, 为了便于分析, 将两参数合并为一个, 即消滩判数 E 。消滩判数取值目前研究也较多^[10-12], 根据船舶阻

力为坡降和水流阻力组成，经资料拟合分析，消滩临界指标 E_c 取 3.92 进行控制，即 $E > E_c$ 则成滩。

方案前后沿程消滩判数变化见图 9。根据模型计算结果，现状情况下，设计流量 $Q=2\ 364\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，火焰碛浅区消滩判数略超出临界指标 3.92，水流较急。两种方案实施后，浅区部位消滩判数均有所降低且基本在临界值 3.92 以下，水流流态变缓，滩段航道条件得到改善。整治流量 $Q=5\ 920\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，全线已经没有消滩判数大于 3.92 的急滩区，方案 1 实施后，消滩判数与工程前相比，变化较小；方案 2 的消滩判数虽较工程前有所增加，但未超过临界值 3.92 m/s，说明方案 2 实施后，未形成新的急滩。

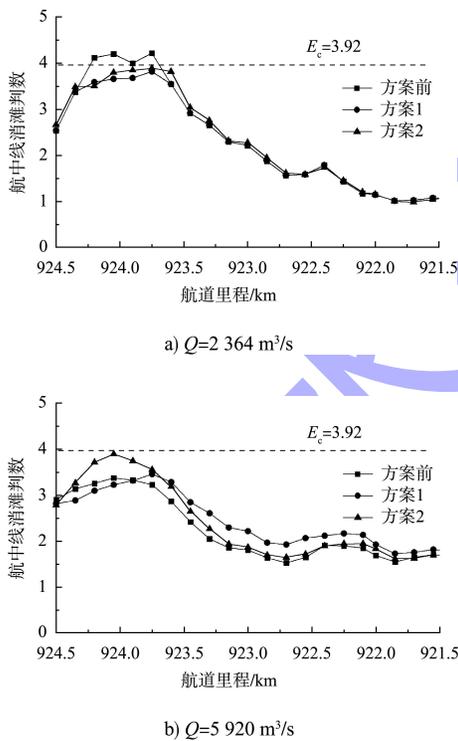


图 9 方案前后沿程消滩判数变化

综上所述，两种方案实施后，火焰碛浅滩问题得到了较好解决，航道尺度满足设计要求，浅区流速增值较为合理，急区水流条件得以较明显改善，基本达到了整治目标的要求。

5.3 方案比选

火焰碛浅区疏浚后航道水深增加，通航宽度扩大，方案 1 抬高顺坝，向下延长，并增加 3 道刺坝，可增大整治建筑物的水流控导能力，增大浅区冲刷力度，有效地预防浅区回淤和航道出浅；方案 2 抬高原顺坝，并对上游侧延长接岸，封堵顺坝右侧副汊分流，增大主槽流量，增加浅区冲刷力度，整治后均能达到预期的整治效果。方案 1 采用向下延长顺坝并抛筑刺坝，进一步约束左槽水流，方案 2 仅对原顺坝上游侧进行接岸处理。两方案相比，虽方案 1 对于恢复被挖沙采石破坏的火焰碛边滩中下段更为有利，但其筑坝工程量远大于方案 2，且不利于后续航线的调整；方案 2 通过延长坝头接岸，既能实现预期的整治目标，也能为航线调整留有更多的余地，因此综合考虑推荐方案 2 作为本滩的整治方案。

6 结语

- 1) 针对火焰碛滩易出浅碍航，航槽内水深不满足规划 3.5 m 要求的问题，通过适量疏浚并结合优化整治建筑物布置等措施，可以实现增加水深、改善滩段水流条件以及加强浅区冲刷的治理目标，从而满足规划的航道尺度要求。
- 2) 模型试验结果表明，工程提出的疏浚过渡段浅区，加高原顺坝，延长顺坝坝头使之接岸的工程措施，工程量较小，能够实现航道尺度 $3.5\ \text{m} \times 80\ \text{m} \times 800\ \text{m}$ （水深×宽度×弯曲半径）的建设目标，同时也能为后续的航槽调整预留空间。

参考文献：

[1] 中共中央政治局. 长江经济带发展规划纲要[A]. 北京: 中共中央政治局, 2016.

[2] 长江重庆航运工程勘察设计院. 长江上游合江门—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.

[3] 李求生, 漆炼勇. 汉江狗头湾滩段航道整治工程方案[J]. 水运工程, 2024(1): 178-183.

(下转第 122 页)