



长江上游九龙滩航道整治方案及效果分析*

何艳军

(长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

摘要: 船舶吨位提高、大型港口作业区发展需要提升长江上游九龙坡—朝天门河段航道等级。为满足这一需求, 通过物理模型试验研究九龙滩航道整治方案, 使该河段航道尺度由Ⅲ级(2.7 m×50 m×560 m, 水深×航宽×弯曲半径)提升为Ⅰ级(3.5 m×150 m×1 000 m)。分析工程实施后的效果得出: 1) 九龙滩滩段整治后航道尺度满足设计要求, 航道条件趋近一般航道, 航宽足以正常会让船舶。2) 彻底解决了九龙滩滩段弯曲、狭窄、水流急的状况, 水流由以前的泡漩状态改善为现在的稳流状态。3) 船舶明显更易控制, 通过弯道更加安全。

关键词: 长江上游; 九龙滩; 物理模型试验; 整治方案; 效果分析

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0121-08

Waterway regulation scheme of Jiulongtan beach in upper reaches of the Yangtze River and effect analysis

HE Yan-jun

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

Abstract: The increase in ship tonnage and the development of large-scale port operation areas need to upgrade the level of the waterway from Jiulongpo to Chaotianmen in the upper reaches of the Yangtze River. In order to meet this demand, the Jiulongtan waterway regulation plan is studied through physical model tests, so that the waterway size of this section is upgraded from level III(2.7 m×50 m×560 m, water depth×navigation width×bending radius) to level I(3.5 m×150 m×1 000 m). Through analyzing the effects of the project implementation, it is concluded that: 1) After the regulation of the Jiulongtan beach section, the scale of the channel meets the design requirements, the channel conditions are close to the general channel, and the navigation width is sufficient to allow the ship to operate normally. 2) The situation of bending, narrowness and rapid water flow in the beach section of Jiulongtan is completely solved, and the water flow is improved from the previous swirling water to the current steady flow state. 3) The ship is significantly easier to control, and it is safer to go through bends.

Keywords: upper reaches of the Yangtze River; Jiulongtan beach; physical model test; waterway improvement; effect analysis

长江上游九龙坡—朝天门河段(以下简称九朝河段)航道整治工程前航道等级为Ⅲ级, 航道维护尺度仅为 2.7 m×50 m×560 m(航深×航宽×弯曲半径), 且每年需进行维护疏浚才能保证最小的航道尺度要求。按照交通运输部《长江干线航道总体规

划纲要》(交规划发〔2009〕35 号)要求, 至 2020 年, 九朝河段航道等级为Ⅰ级, 航道尺度达到 3.5 m×150 m×1 000 m。由此可见, 现行航道尺度与规划尺度有很大的差距, 必须通过工程措施拓宽航槽、加深航道水深才能满足规划尺度的要

收稿日期: 2022-02-14

*基金项目: 三峡后续工作科研项目(SXHXGZ-2021-1)

作者简介: 何艳军(1980—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道的设计和研究工作。

求。近年来船舶大型化趋势明显，3 000 吨级以上船舶已成主流船型，船型吃水都在 3 m 以上，此前的 2.7 m 水深已经无法满足大多数船舶的吃水要求。同时工程河段内及上游都建有多个大型港口作业区，设计靠泊船型均为 3 000 t 及以上船型，目前的Ⅲ级航道和船舶尺度都与港口码头设计标准不匹配。因此，尽快实施该河段的整治十分必要。

赵瑾琼等^[1] 计算分析了三峡水库蓄水方案变化对水库泥沙运动及变动回水区航运条件造成的影响。陈建等^[2] 通过数学模型计算分析，得到三峡变动回水区段泥沙淤积纵向分布主要集中在宽阔的浅滩段，横向分布主要集中在汛期的回流区或边滩部位。王涛等^[3] 通过实测资料，对三角碛河段泥沙冲淤变化特点进行研究，探讨疏浚设计方案，并分析疏浚效果。唐荣婕等^[4] 以三峡水库变动回水区三角碛浅滩段为例研究浅滩年际年内的冲淤及碍航特性的变化，得到三角碛浅滩段的碍航程度可能会有所上升。付旭辉等^[5] 研究表明，重庆主城河段蓄水期淤积的泥沙大部分都会在次年消落期冲刷，难以形成累积性淤积。目前大多研究集中在三峡变动回水区河段泥沙冲淤特性方面，针对九龙滩河段整治方案优化研究及效果分析方面的研究较少。

通过疏通航道，增加航宽、水深和弯曲半径，

适度地改善现有航道弯曲的不利条件，再辅以一定的整治建筑物，维持航槽的稳定，航道条件将得到根本的改善，真正做到既通又畅。本文采用物理模型试验研究九龙滩河段航道整治方案，并通过实测资料分析方案实施后的整治效果，希望能为类似河段航道工程整治和航道维护等提供一些参考。

1 滩险概况

九龙滩河段滩险成因十分复杂，影响因素众多。主要原因是河道宽阔、九堆子边滩散乱不完整、串沟水流与主流碰撞掺混、碛尾横轴环流综合作用。中洪水河面宽阔是滩险的主要成因，水流分散，洪、中主流不一致，水流难以集中冲刷航槽。在舀鱼背以及九堆子中部，枯水河面宽约 210 m，三角碛枯水河宽不小于 450 m，展宽比达 2.14；千斤石洪水河宽约 590 m，至三角碛段超过了 1 100 m，展宽比 1.86。河道展宽后各级水流主流不一，难以形成集中冲刷，航槽易出浅碍航。成滩因素在受三峡蓄水影响以后没有改变，反而因冲刷时间缩短，泥沙淤积的条件增加，浅滩碍航程度也会增加，碍航时间由整个枯水期集中至消落期中后期 3—5 月^[6-7]。九龙滩河段河势见图 1。

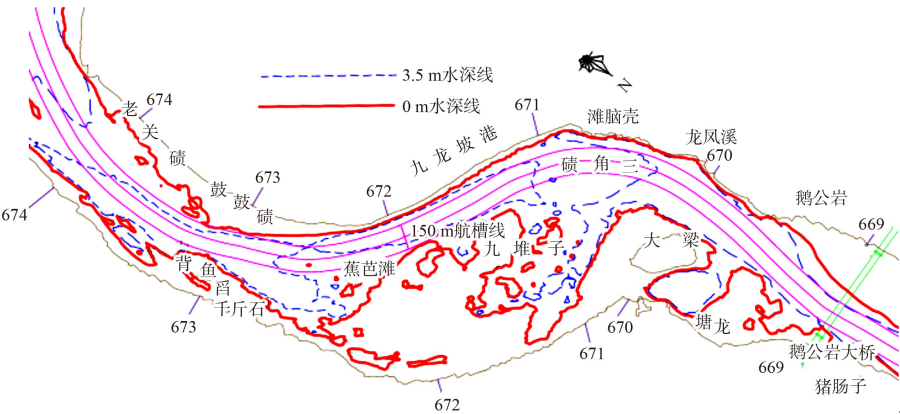


图 1 九龙滩河势

2 模型设计与验证

2.1 模型范围

物理模型长江上游起点为茄子溪(上游航道里

程 687 km)，嘉陵江上游起点为华村(距河口约 7 km)，下游终点为寸滩(上游航道里程 651.9 km)，模拟范围全长 42.1 km，其中嘉陵江 7 km、长江

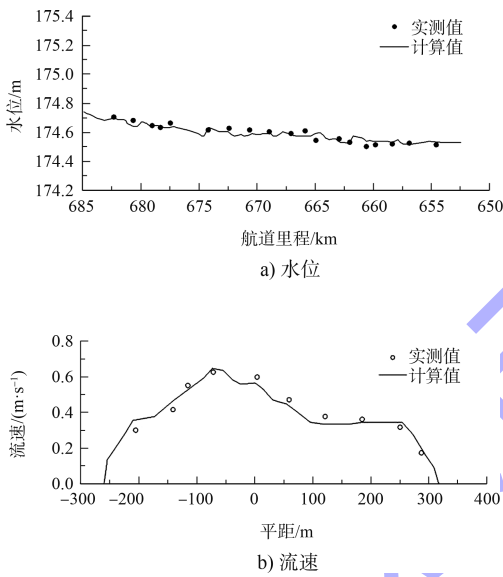
朝天门上段 28 km、汇流后长江段 7.1 km。

模型采用平面比尺 $\lambda_L = 100$ 、垂直比尺 $\lambda_H = 100$ 的正态模型。

2.2 模型验证

模型验证采用的资料如下：1) 2011 年 9 月实测的长江茄子溪一寸滩 1:2 000 地形图，同时参考 2007 年 3 月九龙滩等局部 1:500 河道地形图；2) 实测枯、中及洪水面线及流速、流向资料；3) 汛前和汛末 5 次地形资料 (2007—2012 年)。

验证内容包括水位、流速、冲淤量等，部分验证成果见图 2、3。



注：2012 年 1 月 7 日施测，寸滩流量为 4 420 m³/s，水位为 174.57 m。

图 2 水位、流速验证

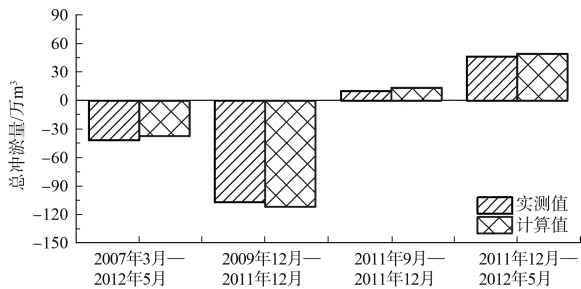


图 3 设计航槽内总冲淤量验证

通过对工程河段水位、流速、流向、河床变形等验证，计算结果与实测资料吻合较好，说明该模型能正确模拟实际河道的水流运动和冲淤变化，可进行航道整治方案优化试验研究。

3 滩险碍航原因分析

九龙滩包含鼓鼓碛、蕉芭滩、三角碛等滩段，在里程 673.5~670.4 km 的河段内，分布有且断且续的多处浅区(图 1)。鼓鼓碛浅段位于里程 673.5~672.7 km，673.2km 处航槽最窄。滩段左岸为老关碛、鼓鼓碛边滩，伸出较开；右岸为舀鱼背陡壁石盘，航槽弯曲；进口水流受右岸何家滩突嘴和左岸粗柄碛控制。蕉芭滩滩段紧接鼓鼓碛下游，位于里程 672.6~671.6 km，其中 672.5 km 处航槽水深最小；航槽微弯，进口水流主要受舀鱼背挑流和尖潭吸流控制。三角碛滩段位于里程 671.1~670.4 km，670.6 km 处最浅，该段左岸为九龙坡港区，岸壁较陡且稳定；右侧九堆子滩缘参差不齐，串沟杂乱；下游河槽为龙凤溪深沱。

鼓鼓碛滩段 3.5 m 等深线贯通，但局部宽度不足 150 m；蕉芭滩滩段 3.5m 等深线几乎不贯通，局部最小水深不足 1 m；蕉芭滩与三角碛之间 3.5 m 等深线贯通，但 150 m 航宽欠缺；三角碛滩段 3.5 m 等深线不贯通，水深不足 1 m 占有较大范围。鼓鼓碛、蕉芭滩、三角碛浅区且断且连，相互影响，均为卵石浅滩，故合称为九龙滩，其中鼓鼓碛、蕉芭滩至三角碛段航宽稍小，碍航程度较弱，三角碛碍航严重。

4 整治标准

九龙滩航道等级为内河 I 级，通航保证率为 98%，航道尺度为 3.5 m×150 m×1 000 m。

经资料拟合分析，船舶自航上滩水流指标 E (消滩指标)^[8] 为：

$$E=155J+\frac{v^2}{2g}$$

(1)

本工程消滩临界指标 $E_0=0.80$ (称之为消滩判数)，即 $E>E_0$ 则成滩。

5 定床推荐方案及效果

5.1 推荐方案

九龙滩定床推荐方案设计航槽上段在鼓鼓

磧紧靠右侧舀鱼背布置,中段穿蕉芭滩而下,下段沿左岸穿三角磧中央而下,抛弃原枯水右侧弯曲航槽。对航槽内不满足规划尺度的鼓鼓

磺、蕉芭滩、三角磺实施疏浚；为维持航槽疏浚后的稳定，合理布置整治建筑物。平面布置见图4。

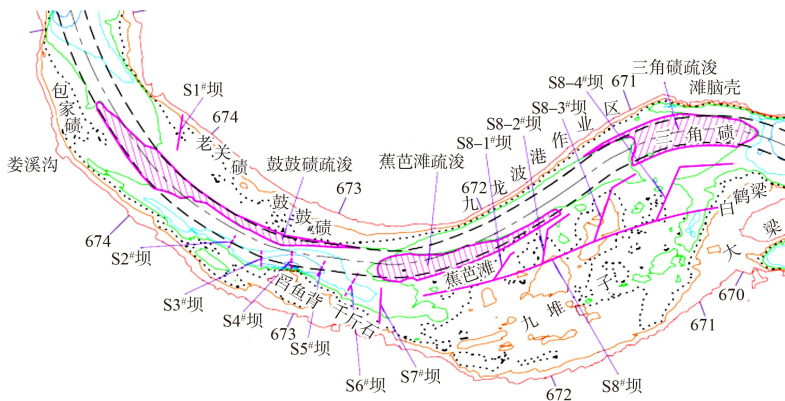


图 4 定床推荐方案平面布置

1) 疏浚。实施鼓鼓磳、蕉芭滩和三角磳 3 处疏浚, 鼓鼓磳疏浚挖深为设计水位下 4.0 m, 蕉芭滩疏浚挖深为设计水位下 4.1 m, 三角磳疏浚挖深为设计水位下 4.1 m。

2) 整治建筑物。在左岸布置 1 座丁坝 ($S1^\#$)，在右岸舀鱼背附近布置 5 座潜坝 ($S2^\# \sim S6^\#$)、1 座潜丁坝 ($S7^\#$) 改善流态和壅高水位，其中 $S1^\#$ 丁坝的坝头为设计水位上 3.0 m， $S2^\# \sim S6^\#$ 潜坝坝顶高分别为设计水位下 7.8、9.7、21.7、14.6、6.1 m， $S7^\#$ 潜丁坝潜坝段顶高为设计水位下 6.0 m，丁坝段顶高为设计水位 0 m；在九堆子边滩布置 1 套鱼骨坝，由 1 条主坝 ($S8^\#$ 坝) 和 4 条支坝 ($S8-1^\# \sim S8-4^\#$ 坝) 组成，将九堆子变为边界平顺、滩体稳定的洲滩，其中 $S8^\#$ 坝的顶部高程为设计水位上 -0.7~5.5 m， $S8-1^\# \sim S8-4^\#$ 坝的坝头高程分别为设计水位上 3.0 m。

5.2 效果

5.2.1 航道尺度

设计流量($Q_{\text{寸滩}}=2\,730\text{ m}^3/\text{s}$)情况下,九龙滩推荐方案3.5 m等深线已完全贯通,加之航槽按照航宽150 m、弯曲半径不小于1 000 m设计,因此推荐方案对应的航道尺度满足要求。

5.2.2 水流条件

整治流量($Q_{\text{寸滩}} = 7\,200\text{ m}^3/\text{s}$)情况下, 九龙滩定床推荐方案的航槽内平均流速沿程分布、航槽

内平均流速变化和航中线消滩判数的沿程分布数据表明, 整治区方案前、推荐方案的流速范围分别为 $1.04 \sim 3.32$ 和 $1.06 \sim 3.48$ m/s, 方案后流速变化范围为 $0 \sim 0.52$ m/s, 可见, 除极个别位置因疏浚开挖流速增值较小外, 整治区航槽内统计点的平均流速总体略有增加。

5.2.3 急滩消滩判数

由图 5 可知, 整治区方案前、推荐方案的消滩判数范围分别为 0.25~0.67、0.33~0.72, 消滩判数比方案前略有增加, 这主要是筑坝等措施起到了束水攻沙的作用, 局部位置流速、比降略有增加, 但方案后急滩消滩判数小于临界值 0.80, 说明整治后没有成为急滩。

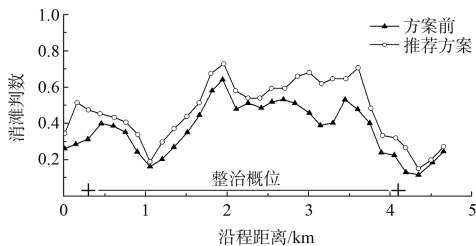


图 5 九龙滩定床方案航槽消滩判数变化

6 动床模型试验

6.1 系列年冲淤特性分析

选取 2002 年 5 月 1 日—2012 年 4 月 30 日作为计算序列年。汛期泥沙淤积的重点部位为舀鱼背深沱、龙凤溪深沱和三角碛主槽, 从冲淤结果

可以看出，系列年内的前 5 a 龙凤溪深沱和三角碛航槽汛期淤厚缓慢增加，此后基本保持稳定；三角碛航槽汛期淤沙在消落期可得到较为明显的冲刷，各年消落期航槽内淤沙残留量较少；舀鱼背深沱淤沙无明显累积，各年淤积形态较为接近。消落期鼓鼓碛和蕉芭滩处有最大冲深约 1.0 m 的冲刷，九堆子处有约长 800 m、宽 200 m、厚 1.0 m 的淤积体；其余区段序列年内冲淤变化较小，基本保持稳定状态。

6.1.1 第 1 a(2002-05-01—2003-04-30)

汛末：鼓鼓碛和蕉芭滩局部疏浚区呈现最大冲深约 1 m 的冲刷，三角碛疏浚区出现大量淤积，最大淤厚可达 4 m；舀鱼背深沱略有淤积，龙凤溪深沱淤积明显，平均淤厚约 5 m。

消落期：鼓鼓碛和蕉芭滩疏浚区仍表现为微冲，在 S8# 坝及其支坝的束水攻槽作用下，三角碛汛期淤沙在消落期基本冲完，龙凤溪淤积减弱。

6.1.2 第 5 a(2006-05-01—2007-04-30)

汛末：三角碛主槽、龙凤溪深沱等处淤沙稍有增加，除此之外，整个河段地形与第 1 a 汛末基本相同。

消落期：未见明显的冲淤过程，整个河段地形与第 1 a 消落期地形差异不大，主槽汛期绝大部分淤沙已被冲走。

6.1.3 第 10 a(2011-05-01—2012-04-30)

汛末：整个河段地形与第 5 a 总体较为接近，三角碛主航槽淤积稍有增加。

消落期：冲淤变化与第 5 a 消落期基本一致，主槽内基本不发生泥沙淤积。

综上所述，动床推荐方案序列年总体表现为主槽无累积性淤积，弯道凸岸边滩有微弱的累积性冲刷，弯道凹岸深沱存在微弱的累积性淤积。

6.2 小结

1) 方案后消落期泥沙冲刷加强，主槽泥沙残存量明显减少。这主要体现在九龙滩三角碛主槽。从方案前和模型推荐方案第 1、5、10 a 消落期的地形冲淤变化可见，九龙滩三角碛处汛末形成的淤积带消落期将得到冲刷，且推荐方案主槽汛期

淤沙的残存量要明显小于方案前，说明消落期泥沙冲刷强度明显增强。同时，方案后可使消落期航槽冲刷提前约 20 d，冲刷历时延长，有利于消落期航槽维护。

2) 定床推荐方案存在的主要问题是鼓鼓碛疏浚区出现一定回淤，150 m 航宽很难长期保持；设计航槽外的疏浚区出现局部推移质淤积，有必要分析其原因以利方案的改进和优化。

7 施工实施方案

7.1 方案优化

针对定床和动床试验结果给出了动床后优化方案。疏浚方案不变，主要进行坝体位置等的优化调整：

- 1) S1# 丁坝位置不变。
- 2) 修筑 S2#~S6# 潜坝群的目的是调整流速横向分布，增大挖槽区流速以增强输沙能力，减小或消除回淤。从试验过程得出，S2# 潜坝的影响较弱、范围较窄，因此拟将其上移至舀鱼背上游侧，优化为短丁坝，抬高坝体顶高程，坝头高程由原来的设计水位下 7.8 m 抬高至设计水位上 1.7 m，S2# 丁坝将明显增大对该段挖槽区流速的影响；为了更好地达到整治效果，调整舀鱼背河段流速分布，优化 S3#~S6# 4 座潜坝，将 S4# 潜坝从舀鱼背最深的深沱处移出，更靠近航槽水域，对水流调节作用更明显，并调整为 S3#~S5# 共 3 座潜坝，潜坝群布置的疏密度将更为合理、平面布置形态更为合适，且对顶部高程进行优化，对水流调节效果将更明显。

3) 将鱼骨支坝 S8-1# 坝的坝头上移到鱼骨主坝上游端，将丁顺坝改为顺坝，形成鱼嘴形态，优化后，鱼骨坝上游端挑流将减弱，坝头平面和分流形态会较好。

再结合整治工程对外部环境(码头、取水口等)的影响以及环保、行洪等，综合给出了动床后优化方案。

7.2 方案平面布置

方案平面布置见图 6^[9]。根据设计航槽布置，

对鼓鼓碛、蕉芭滩和三角碛共 3 处浅区实施疏浚。为改善浅碛航槽水流条件,维持航槽疏浚后的稳定,在鼓鼓碛布置 1 条丁坝(S1[#]),坝长 153 m,坝头顶高程为设计水位上 3.06 m;在舀鱼背礁石的上游侧尖潭入口布置 1 条下挑短丁坝(S2[#]),减弱扫弯水强度,并提前将深槽一侧主流向左侧归槽,S2[#]坝长为 130 m,坝头顶高程为设计水位上 1.7 m;与在舀鱼背深沱布置的 3 条潜坝(S3[#]~S5[#])共同配合,减弱深沱吸流,增大航槽分流量,加大鼓鼓碛边滩冲刷力度,3 条潜坝坝长分别为 89、129、101 m,坝头顶高程分别为设计水位下 10.7、10.7、6.1 m。为保持九堆子滩体的高大完整以及左侧航槽的稳定,修建鱼骨坝 1 条 S7[#],脊坝长 1 861 m,坝头为设计水位下 0.7 m,潜坝段长 175 m,斜坡过渡段为设计水位上 3.0 m、长 18.5 m,中段为设计水位上 5.5 m、长约 1 285.5 m,下段斜坡段长 135 m 从设计最低通航水位上 5.5 m 降低至设计最低通航水位上 3.0 m,坝根平坡段长 247 m 为设计最低通航水位(163.55 m)上 3.0 m,不同高程段之间平顺衔接。坝头用 1 条齿坝(S7-1[#])和 1 条格坝(S7-2[#])与鱼骨脊坝筑成鱼嘴形态,使得坝头水流形态更好,在后面增加 3 条齿坝(S7-3[#]、S7-4[#]、S7-5[#]),分别长 478、104、346、473、632 m,坝头顶高程均为设计水位上 3.0 m。

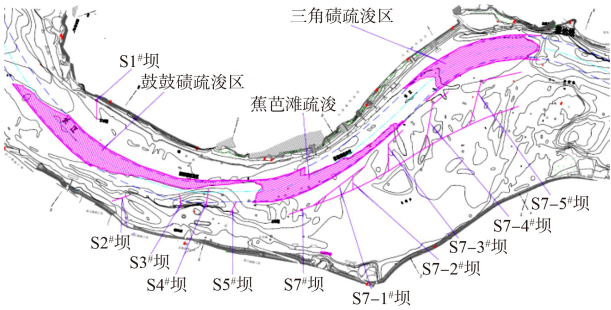


图 6 九龙滩滩段施工方案平面布置

7.3 实测整治效果分析^[10]

7.3.1 航道尺度

1) 整治前。从 2015 年 9 月 1:2 000 测图分析可以看出(图 7):设计航槽 150 m 范围内 3.5 m 等深线贯通,但在老关碛碛颈处,最小宽度仅 25 m,在蕉芭滩最小宽度 50~85 m,在三角碛老槽出口

处 3.5 m 水深最小宽度 100 m,鼓鼓碛、蕉芭滩至三角碛全长约 3 km 航槽不满足设计航宽 150 m 的要求。

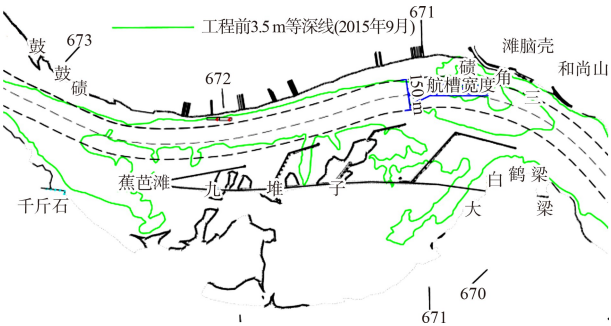


图 7 2015 年 9 月九龙滩滩段整治前航道尺度情况

2) 整治后。航道宽度重点分析消落期即低水位期情况,从 2021 年 4 月 1:2 000 测图可以看出(图 8),九龙滩滩段满足 3.5 m 水深最小宽度为 192 m,位置在老关碛附近,弯曲半径最小 1 000 m,位置在航道里程 670~672 km(三角碛疏浚区),航道尺度满足 3.5 m×150 m×1 000 m 的设计标准。

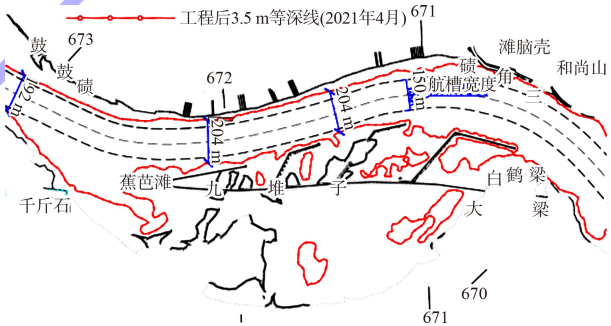


图 8 2015 年 4 月九龙滩滩段整治后航道尺度情况

7.3.2 水流条件

对比整治前后实测水文资料(表 1),由于整治前后测时水位和流量不同,所以测出的流速大小及流向也不同,但可从流速的分布等方面对整治效果进行分析。

表 1 九龙滩滩段整治前后水文测时水位与流量

测时	寸滩水位/m	寸滩流量/(m ³ ·s ⁻¹)	坝前水位/m
2014-07-02	168.42	18 600	146.76
2020-09-03	174.40	29 700	160.41
2021-04-08	164.42	5 200	163.65

1) 整治前。枯水期,鼓鼓碛主流靠右顶冲舀鱼背,受舀鱼背石梁挑流和九堆子大边滩的阻挡,至蕉芭滩后主流进入左侧航槽,到三角碛后主流

分入右槽，再受白鹤梁的挑流作用，流速突然增大，过后主流进入龙凤溪深沱左岸，航线集中，航槽狭窄。流速横向分布不均匀，鼓鼓碛滩段同一个断面流速左侧比右侧高出 1.2 m/s。

2) 整治后。无论是消落期还是中洪水期，航槽内过流增加，流线相对集中，即水流归槽，且流速分布趋于均匀化；枯水期，整治前千斤石深沱吸流，整治后分流减小，沿蕉芭滩主流进入航槽一直顺直进入三角碛，2021 年 4 月测时水位较低，流量较枯，实测流向集中、较顺直，且与航槽相对平行，平均流速在 1.5~2.5 m/s，最大流速为 2.77 m/s，最大比降不到 1‰，水流条件较好。2020 年 9 月洪水期，流线流向分布均匀，中洪水期，大梁翻水过流，主流迅速右移，左侧航槽处于缓流或回流区。航槽内流速比降组合均不构成急滩，满足设计要求。

7.3.3 实船适航

1) 整治前。该河段在龙凤溪水位 8 m 以上时，有大梁上行横驶区，在水位 6~8 m 时，有九堆子上行横驶区，在水位 6 m 以下时，有鸡心碛上行横驶区，上行船舶需在上述水域过河；在龙凤溪水位 4 m 以下时，航道里程 669.9~671.3 km 河段受航道、通视条件限制及水流影响，会船困难，为控制河段，该水域由信号台指挥船舶通行；在龙凤溪水位 3 m 以下时，航道里程 672~672.9 km 河段受航道、通视条件限制及水流影响，会船困难，为通航条件受限制河段，上行船在黄家碛以上等让，且大梁(航道里程 670 km)、三角碛(航道里程 670.5~670.8 km)、九堆子(航道里程 671.3 km)、九堆子(航道里程 672.4 km)、舀鱼背(航道里程 673 km)等 5 处为严禁会船水域。整治前，九堆子中低水位期有斜流，滩上水势内泄，大梁尾下水势内托，航道弯曲，三角碛江心洲在中、低水位期将河道分为左右两槽，右槽为主航道。该区域航道弯、急、窄，水流快、上下水船舶通过时均需满舵通行，船舶的操作难度较高，经常发生安全事故。

2) 整治后。从 2021 年 5 月 11 日实船适航情

况来看，龙凤溪水位约 3 m，达到该河段限制水位。上水船舶沿右岸抱大梁尾上行至白鹤梁过河至左岸三角碛，过九龙坡码头后，过河至右岸九堆子，在鸡心碛-蕉芭滩过河标至左岸，后抱老关碛上行。下水沿航道中心线行驶。上水历时 47 min，平均航速 6.4 km/h，下水历时 13 min，平均航速 23.1 km/h，主机工况良好。试验情况表明：整治后开通三角碛左侧新槽，航道加宽，水深加大，弯曲半径也大幅增加，航道得到了良好改善，航道条件趋近一般航道，彻底解决了九龙滩滩段弯曲、狭窄、水流急的状况。船舶在控制河段航行较为顺畅，且明显感觉到行驶过程中比整治前更加轻松，船舶更易控制，上水行驶时水流明显变缓，船舶行驶更经济，不用信号台指挥也能安全通过该河段，现场实船试验有望将该河段从控制河段提升为受限通行河段，船舶轻松上滩。整治后航道条件得以较大改善，且整个过程航速保持平稳，舵角等都在正常合理范围内，船舶在设计航道内具有良好的操纵性能。

8 结论

1) 定床推荐方案模型试验结果显示方案后航槽内的 3.5 m 等深线已完全贯通，定床方案对应的航道尺度满足设计要求。整治区航槽内统计点的平均流速总体略有增加。消滩判数与方案前相比有所增加，但方案后急滩消滩判数小于临界值 0.80，说明整治后没有成为急滩。

2) 动床试验结果显示：定床推荐方案存在的主要问题是鼓鼓碛疏浚区出现一定回淤，150 m 航宽很难长期保持，设计航槽外的疏浚区出现局部推移质淤积。

3) 优化方案实施后，九龙滩滩段整治后航道尺度满足设计要求，航道条件趋近一般航道，航宽足以正常会让船舶；且彻底解决了九龙滩滩段弯曲、狭窄、水流急的状况，水流由以前的泡漩状态改善为现在的稳流状态，船舶明显更易控制，通过弯道更加安全。九龙滩滩段的整治解决了该区域航道的通行瓶颈。

参考文献：

[1] 赵瑾琼,李义天,邓金运.蓄水方案变化对三峡水库泥沙淤积及通航条件的影响[J].武汉大学学报(工学版),2009,42(4):422-426.

[2] 陈建,李义天,张为,等.三峡水库新蓄水方案对重庆河段航道的影响[J].武汉大学学报(工学版),2007(1):6-12.

[3] 王涛,张璠,刘天云,等.三峡水库变动回水区三角碛河段消落期维护疏浚方案[J].水运工程,2015(1):120-125.

[4] 唐荣婕,陈立,杨阳,等.三峡水库变动回水区三角碛浅滩冲淤与碍航特性分析[J].水运工程,2015(1):110-114.

[5] 付旭辉,杨胜发,伍文俊.三峡水库蓄水 175m 后重庆九龙坡河段冲淤变化[J].人民长江,2012,43(20):21-24.

[6] 重庆交通大学.长江上游九龙坡至朝天门河段航道建

设工程工可阶段物理模型试验研究报告[R].重庆:重庆交通大学,2014.

[7] 长江重庆航运工程勘察设计院,重庆交通大学.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试验研究报告[R].重庆:长江重庆航运工程勘察设计院,2014.

[8] 许光祥,曾锋.急滩消滩水力指标的合理表达式[J].水运工程,2010(11):103-106.

[9] 长江重庆航运工程勘察设计院.长江上游九龙坡至朝天门河段航道建设工程施工图设计[R].重庆:长江重庆航运工程勘察设计院,2016.

[10] 长江重庆航运工程勘察设计院.长江上游九龙坡至朝天门河段航道建设工程航道整治效果分析报告[R].重庆:长江重庆航运工程勘察设计院,2021.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 63 页)

4)不同断面形式越浪量试验表明,相同顶高程条件下,反曲面挡墙结构堤顶单宽平均越浪量小于直立式挡墙结构,可作为优选结构形式。

参考文献：

[1] BP Amoco. Statistical review of world energy[R].London:BP Amoco,2020.

[2] 王武,张军贤,朱兴珊,等.国外天然气储采比及对我国的启示[J].天然气工业,2010,30(5):113-115,122.

[3] 莫建新,吴黎红等.广西北海 LNG 接收站陆域形成防浪墙顶高程设计[J].中国水运(下半月),2013,13(4):186-188.

[4] 张静.天津港 LNG 码头前沿顶高程研究[J].港工技术,2021,58(4):7-10.

[5] 李绍武,张志明,杨国平,等.码头面高程计算方法探

讨[J].水运工程,2015(2):25-28.

[6] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司.液化天然气码头设计规范:JTS 165-5—2021 [S].北京:人民交通出版社,2021.

[7] 中交水运规划设计院有限公司.海港总体设计规范:JTS 165—2013 [S].北京:人民交通出版社,2013.

[8] 中交上海航道勘察设计院研究院有限公司.疏浚与吹填工程设计规范:JTS 181-5—2012 [S].北京:人民交通出版社,2013.

[9] 交通运输部天津水运工程科学研究所.广东阳江海陵湾液化天然气有限责任公司 LNG 调峰储气库配套码头项目水工断面模型试验研究报告[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2016.

(本文编辑 武亚庆)