

· 航道及通航建筑物 ·



长江上游东溪口水道新水沙条件下 航槽维护措施*

吕韵鹏^{1,2}, 胡江^{1,2}, 秦镭宁¹, 廖江花²

(1. 重庆交通大学, 水利水运教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 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)

摘要: 长江上游干支流大型枢纽群的运行导致水沙条件发生较大变化, 加之 2017 年以前的人为采砂活动, 使得长江上游东溪口滩群河段航道发生较大幅度的演变。左、右两汉分流、分沙比改变, 使得形态较为顺直的左槽初步满足枯水期通航的可能。采用斗笠子—东溪口水道物理模型研究新条件下左槽的航道维护措施, 通过枯水期至洪水期的 8 组流量作为控制条件, 测量分析方案前后左右槽分流比、沿程水位、流速、流向及流态的变化, 模拟船舶上下滩过程。结果表明, 推荐维护方案实施后, 对上游斗笠子急滩影响不大; 各时期航槽内流向平顺, 流速稳定在 3 m/s 以内, 船舶通航条件良好, 左槽通航水位可由现在的设计水位以上 5 m 降低至 2 m。

关键词: 水沙条件; 航道整治; 物理模型; 东溪口水道

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0080-07

Maintenance measures for navigation channel in new water and sediment conditions of Dongxikou waterway in the Yangtze River upstream

LYU Yun-peng^{1,2}, HU Jiang^{1,2}, QIN Lei-ning¹, LIAO Jiang-hua²

(1.Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2.National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The operation of large hub groups in the main and tributaries of the upper reaches of the Yangtze River led to the great changes in water and sand conditions. In addition, man-made sand mining activities before 2017 led to the large-scale evolution of the channel in the Dongxikou group of shoals in the Yangtze River upstream. The changes of splitting ratio and sand ratio in left and right branches, which can make the left channel with relatively straight shape meet the possibility of navigation during the dry season. We adopt the physical model of Dulizi-Dongxikou waterway to study the channel maintenance measures of the left channel under the new conditions, take 8 groups of flow rates from the dry period to the flood period as the control conditions, measure and analyze the changes of the diversion ratio, water level, velocity, direction and flow pattern of the left and right channel before and after the scheme and simulate the process of the ship going up and down the shoal. The results show that the recommended maintenance scheme has little effect on the upstream Doulizhi rapid. In each period, the flow direction in the channel is smooth, the flow velocity is stable within 3 m/s, the navigation condition of the ship is good, the navigable water level of the left channel can be reduced from 5 m above the current design water level to 2 m.

Keywords: water and sediment condition; channel regulation; physical model; Dongxikou waterway

收稿日期: 2020-11-11

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600400); 重庆市社会民生科技创新专项(cstc2016shmszx30012)

作者简介: 吕韵鹏(1995—), 男, 硕士研究生, 从事航道整治研究。

通讯作者: 胡江(1977—), 男, 博士, 教授, 从事航道整治及河道治理研究。E-mail: 378922494@qq.com。

1 滩险概况

东溪口水道是长江上游宜宾—重庆段船舶通航难度最大的卵石滩群之一, 目前航道维护尺度 2.9 m×50 m×560 m(航道水深×航宽×弯曲半径), 航道等级为Ⅲ级^[1]。上游斗笠子滩与下游东溪口滩共同构成急滩-险滩群, 上下游两滩间具有较强的联动性, 水流条件相互影响, 碍航特征十分复杂。其

中, 东溪口段以秤杆碛为中心, 分为左、右两槽。右槽(南槽)为目前主航道(当地水位 5 m 以下), 具有山区河流典型的“弯、窄、急、险、浅”等碍航特征, 航道弯曲半径小, 下行船舶航行难度大, 事故频发。而左槽(北槽)航道宽阔顺直, 水流较为平稳, 但通航条件苛刻, 目前仅在当地水位 5 m 以上时可以通航, 枯水期则无法通航^[2-3], 见图 1。

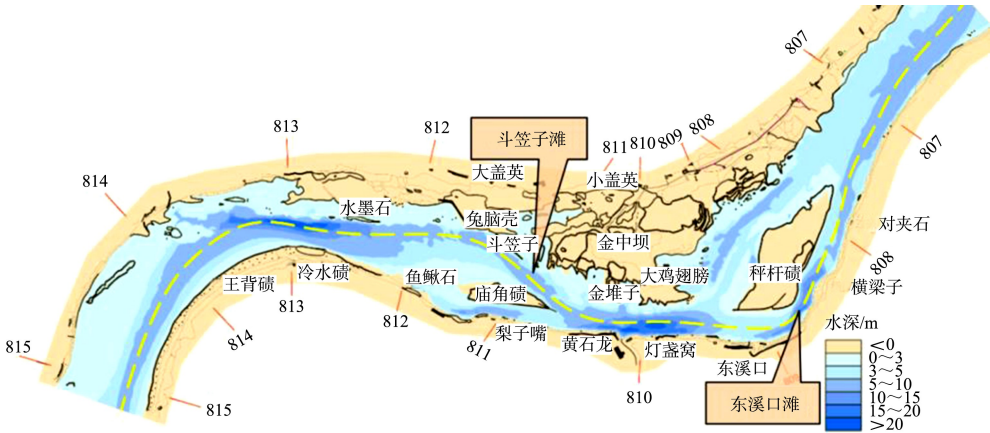


图 1 斗笠子—东溪口水道

2 东溪口水道水沙条件分析

2.1 上游枢纽群建设对来水来沙的影响

2000 年以来, 长江上游陆续兴建并投入使用了数座大型水利水电枢纽, 包括金沙江流域的溪洛渡、向家坝水电站, 岷江流域的紫坪铺、大渡河梯级水电站等。上游支流水利枢纽群的建设, 特别是 2013 年以后向家坝、溪洛渡水库开始蓄水

拦沙, 使金沙江输沙能力大幅下降, 导致下游叙渝段河道来沙持续减少。以朱沱站(东溪口水道下游出口, 航道里程 806.0 km)水文资料为例, 2013 年以后, 朱沱站在年径流量没有大幅降低的情况下来沙量大幅减少 80% 以上, 见图 2。来水来沙形势的巨大变化, 给长江上游河段的航道演变也带来深远影响^[4]。

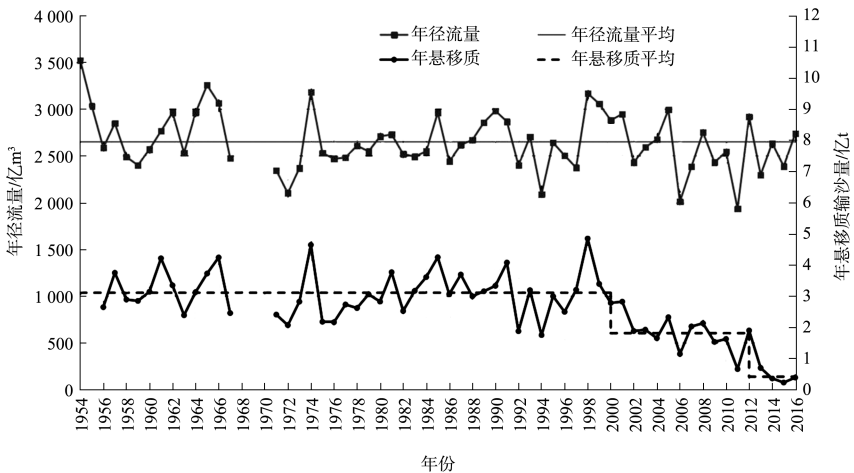


图 2 朱沱站年径流量与悬移质沙量变化

2.2 向家坝水库日调节非恒定流的影响

向家坝水电站建成蓄水后，其日调节引起的非恒定流使下游航道水文条件形成相应的变化。如金沙江、岷江汇合口的宜宾河段，天然情况下，枯季水位在数月时间内保持平稳，变幅仅有 1 m 左右；而上游向家坝的日调节非恒定流，导致枯

水期每日水位呈现 2~3 m 的变幅，见图 3。向家坝日调节非恒定流的波长可达 200 km，在向下游传递过程中发生变形，给下游的航道浅滩演变、航道通航水流条件都带来新的变化和不确定性，增大了航道维护难度。

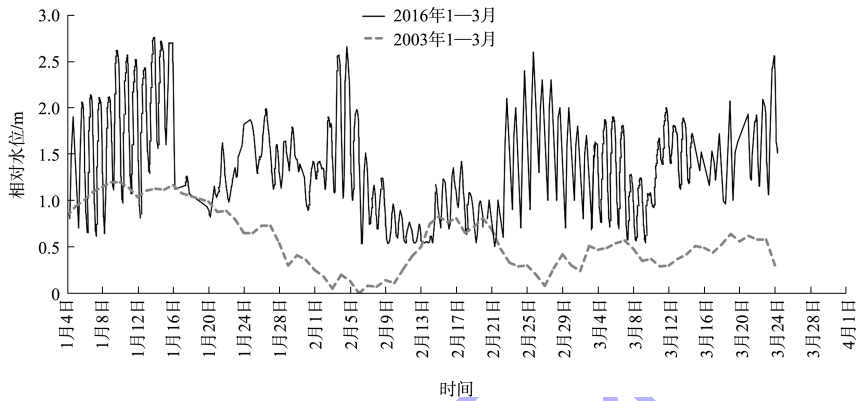


图 3 向家坝水库日调节前后宜宾水位变化

文献[5-8]均指出，当非恒定流到达朱沱时，耗时 18~40 h，其流量变幅衰减达到宜宾平均流量变幅的 34.7%。文献[5]进一步指出，U 形及 V 形的河道断面枯水期河槽狭窄、边滩较宽，而洪水期边滩淹没，河面展宽，因此其水位日变幅会不降反增；且对于反 S 形河道，随电站调度方式不同，主流区横向摆动明显，最大流速发生在涨水期，最高水位时流速反而减小。东溪口水道正好符合上述两个河道特征，这表明向家坝水库蓄水后日调节非恒定流使东溪口水道的水流条件时常变动，航道条件更加复杂。

3 滩险近期演变及影响

3.1 东溪口滩近期演变

上游水沙条件的变化加之人工采砂活动的共同作用，使东溪口主要滩险及航道地形发生了较大程度的演变。2015—2019 年间秤杆碛段河床滩面的地形冲淤变化见图 4。

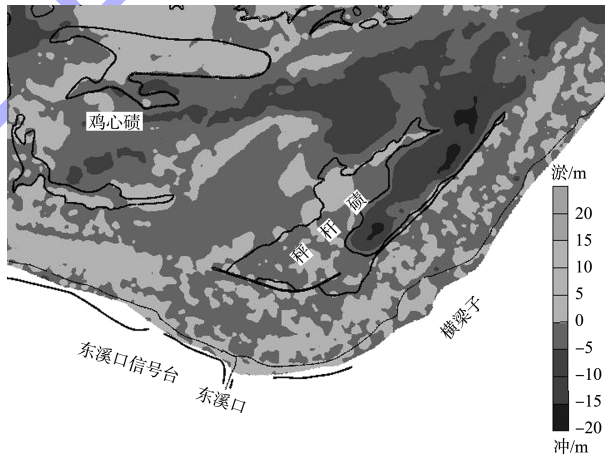


图 4 秤杆碛 2015—2019 年地形冲淤变化

3.1.1 滩险形态变化

人工采砂使鸡心碛已经完全消失；秤杆碛形态也发生较大程度的变化，见图 5，主体面积减小约 18.9 万 m²，占原总面积的 58.7%。在左侧碛翅尾部形成了长条状的深坑，坑内地形平均下切深度为 4~10 m，部分区域可达 15 m 以上。左碛翅边缘向中心推进，边滩走向逐渐演变为与水流方向一致；右碛翅则保留设计水

位以上 2 m 左右的沙埂。碛顶高程由 203.3 m 下降至 201.8 m。

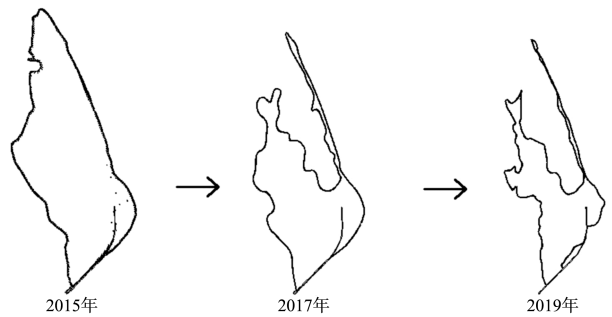


图 5 秤杆碛形态变化

3.1.2 航道内河床地形变化

由于上游枢纽群拦沙导致河道来沙量大幅减少, 加之向家坝日调节非恒定流引起的主流横向摆动, 左槽进口段基本呈冲刷态势, 冲刷幅度在 0~5 m。受人工采砂活动, 左槽中后段河床有 4~8 m 的较大下切变化, 全段航道水深大幅增加, 见图 6。进口段 2.9 m 等深线向后推进约 80 m, 同时向两侧拓宽约 60 m, 整体带宽保持在 60~90 m; 后段等深线向前推进约 230 m, 且边线展宽至左碛翅外延, 使得满足 2.9 m 水深的河面宽度大幅增加, 目前左槽 2.9 m 等深线仅剩约 215 m 未贯通, 见图 7; 右槽航槽受采砂活动及来水来沙变化影响较小, 地形变化幅度在 2 m 以内。

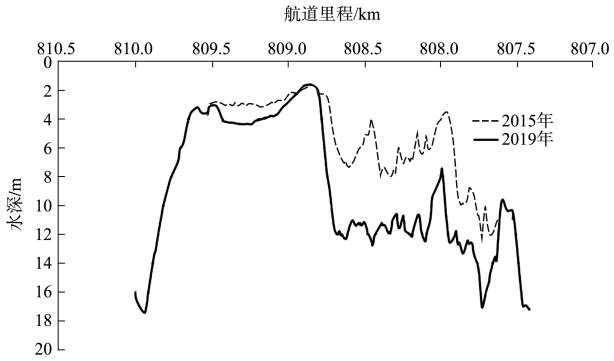


图 6 左槽航道纵断面深泓线变化

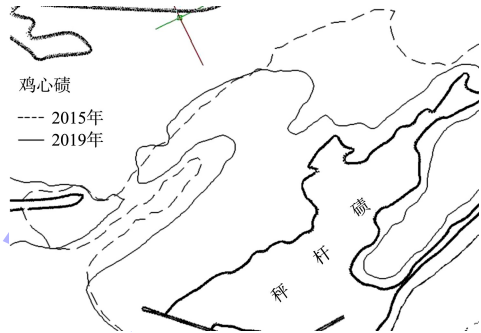


图 7 左槽 2.9 m 等深线变化

3.2 航道条件变化

3.2.1 左槽航道条件变化分析

地形大幅改变后, 左槽航道中枯水期分流比较 2015 年均有所增加, 见表 1, 其中 2 m 水位时 ($Q=4\,850\text{ m}^3/\text{s}$) 的分流比增加了 8.14%, 达到 51.55%。进口段水面展宽, 水深增加, 枯水期通航条件有所改善。

表 1 左槽分流比变化

年份	分流比/%			
	1 m 水位 ($Q=2\,315\text{ m}^3/\text{s}$)	2 m 水位 ($Q=3\,260\text{ m}^3/\text{s}$)	3 m 水位 ($Q=4\,850\text{ m}^3/\text{s}$)	4 m 水位 ($Q=6\,530\text{ m}^3/\text{s}$)
2019 年	48.28	54.88	51.55	56.09
2015 年	26.63	40.98	43.41	49.77

1 m 水位时, 2.9 m 等深线已贯通, 中段仅有不足 100 m 长河道, 2.9 m 水深河道的宽度低于 60 m; 2m 水位时, 左槽 2.9 m 水深的河道宽度最窄处超过 100 m, 满足航道维护的通航尺度基本要求。左槽主航道内流速放缓, 流向平顺, 最大流速达到 2.55 m/s, 仅略低于 2 000 吨级船舶自航上滩的标准。但由于进口段水深不足, 弯曲半径小,

流速较快, 存在斜流和滑梁水等碍航流态, 船舶航行偏角超过 30°, 不利于船舶通航, 中后段水流恢复顺直, 流态良好, 流速稳定在 1.5 m/s 左右, 适合通航。4 m 水位时, 左槽水流均匀分布, 进口段斜流、滑梁水现象基本消失, 水流与航线平行, 全段流速稳定在 3 m/s 以下, 通航条件比较好, 见图 8。

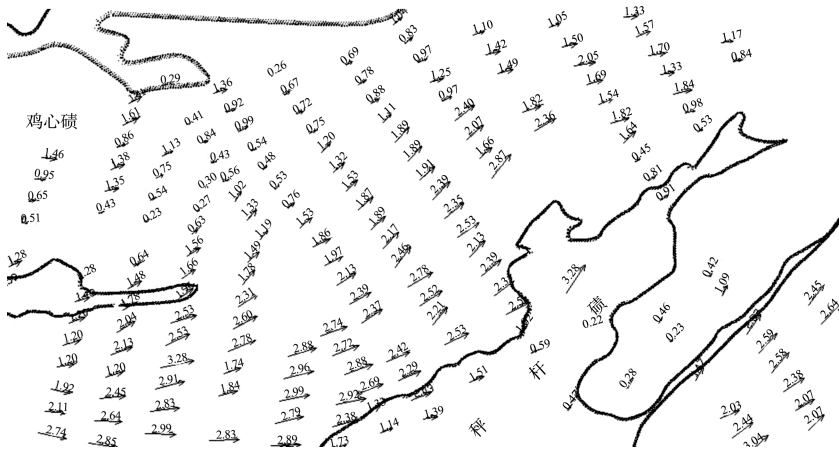


图 8 4 m 水位时左槽局部流场 (单位: m/s)

3.2.2 右槽航道条件变化分析

右槽航道演变程度小, 航道条件变化不大, 但本身通航条件较为恶劣。由于大鸡翅膀和秤杆碛头坝分流, 且进口处河底较高, 导致右槽枯水期流速较大, 在 2.5~3.5 m/s。且由于秤杆碛右侧碛翅伸展较开, 束窄了右槽枯水河槽宽度, 导致右槽平面形态极弯曲, 形成强烈的扫弯水, 下行航线与水流夹角最大可达 43°; 岸线极不规则, 船舶不能靠岸行驶, 只能环秤杆碛的碛翅行驶, 船舶操控性极差, 见图 9。

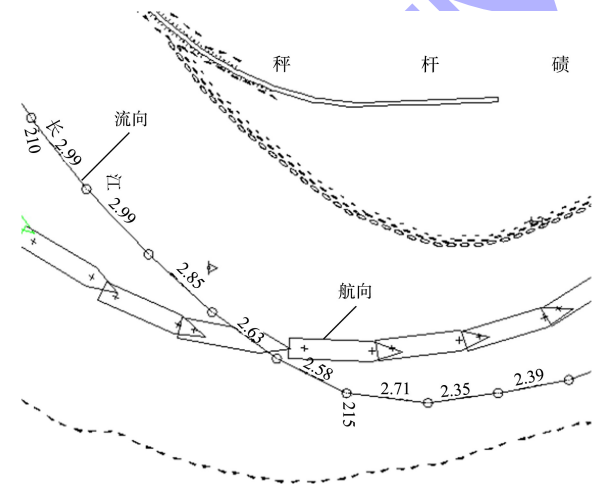


图 9 右槽实测航向与流向 (单位: m/s)

3.2.3 左槽航道维护临界水位

左槽枯水期分流比增加, 航道大幅拓宽、拓深使其初步具备了枯水期通航的基本条件。考虑

到右槽通航条件的恶劣, 为保证航行安全, 有必要开通左槽航道维护, 降低其枯水期通航水位。由于 1 m 水位时的航道水深不满足Ⅲ级航道要求, 2 m 水位时进口段的航道尺度及流态较差, 但基本满足维护尺度要求, 决定以 2 m 水位作为左槽航道维护临界水位, 并研究其航道维护措施。

4 维护措施方案研究及成果分析

试验采用比尺为 1:100 的斗笠子—东溪口水道正态物理模型, 以 2019 年实测地形资料为基础, 以枯水期—洪水期的 8 组代表流量(设计水位以上 0~7 m 所对应流量)作为水流控制条件, 朱沱站水位作为尾水控制来研究维护措施方案。

4.1 维护方案思路及布置

针对 2 m 水位时左槽进口段碍航问题, 维护方案布置的思路是加深和加宽进口段航道, 归顺水流, 削弱碍航流态, 使船舶能够安全上滩。同时考虑到应避免对与东溪口滩联动的斗笠子滩造成较大影响。因此决定沿大鸡翅膀一侧 2.9 m 等水深线布置长约 495 m、最宽约 75 m 的条状挖槽以改善进口段流速及不良流态。同时布置 U 形挖槽于左槽中后段 2.9 m 水深未贯通处, 其总长度约 406 m、宽约 130 m, 用以贯通 2.9 m 等深线, 稳定水流。两处挖槽疏浚水深均为 2.9 m, 总疏浚量约 6.4 万 m³, 见图 10。

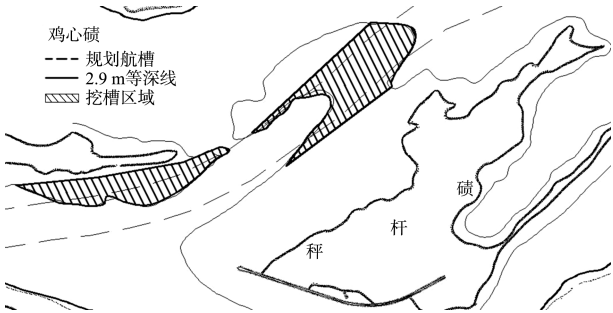
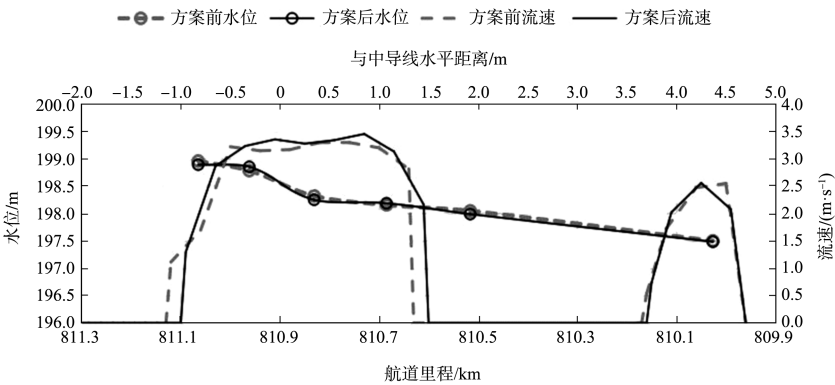


图 10 维护方案及航槽布置



注: 水位对应航道里程, 流速对应与中导线水平距离。

图 11 斗笠子段方案前后流速和水位变化

4.2.2 东溪口滩段

1) 分流比变化。方案后, 设计水位时左槽分流比由方案前的 48.28% 增加至 54.69%, 枯水期分流明显增加。随着流量增加, 左槽分流比逐渐减小, 右槽相应增加。至 2 m 水位时两槽分流基本平均, 左槽约为 50.02%。

2) 水位变化。2 m 水位下, 由于水面大幅展宽, 东溪口段左槽边滩水位略微降低, 最大降低约 0.15 m, 变化幅度很小, 见图 12。

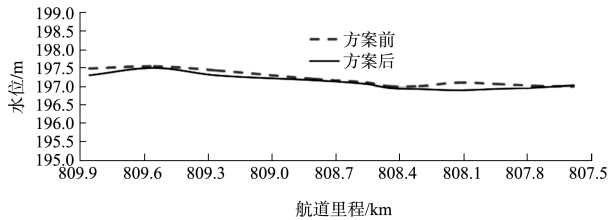


图 12 东溪口段左槽方案前后水位变化

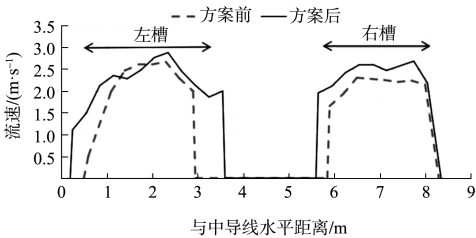
3) 流速变化。2 m 水位下, 左槽流速虽总体呈增大趋势, 但整体保持在 3.0 m/s 以内。进口段水面过

4.2 试验成果分析

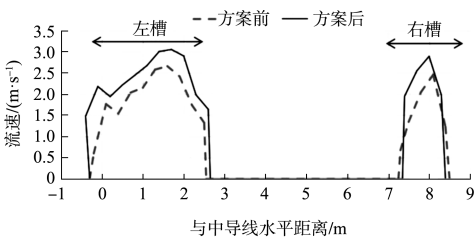
4.2.1 斗笠子滩段

方案实施后, 2 m 水位下, 斗笠子滩庙角碛顺坝位置水位仅降低 0.07 m, 河道流速也仅在 0.2 m/s 以内增加, 见图 11。可以看出, 斗笠子滩段通航及水流条件受维护推荐方案的影响较小, 基本保持稳定。

流区域增大, 航道内流速有幅度不大的增减变化, 边滩流速明显增大; 中段流速均有 0.5 m/s 以内的增大, 最大达 2.88 m/s; 后段 2.9 m 等深线贯通, 流速增大较为明显, 最大变化值约为 0.8 m/s。右槽流速变化值总体趋于稳定在 0.5 m/s 以内, 见图 13。



a) 秤杆碛进口段



b) 秤杆碛中段

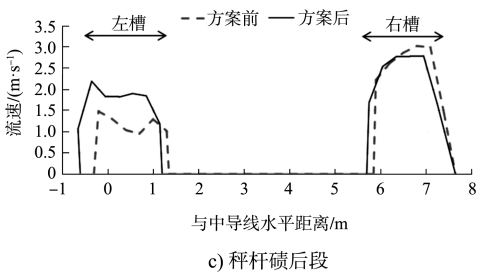


图 13 东溪口段方案前后的断面流速变化

4) 流向、流态变化。2 m 水位下，由于进口段水深增加，水面拓宽，左槽进口段斜流及滑梁水基本消失，水流归束效果明显，流向更加符合主航槽走向。秤杆碛边滩流速明显减小，航道内流向良好，流速稳定，通航条件大为改善，见图 14。



图 14 左槽进口段方案后流态 (单位: m/s)

5) 船模操纵性试验：使用 2 000 吨级船模分别上下行通过东溪口水道来试验其通航状况。结果显示，在 2 m 水位时，船舶在下行时速度较快，航行条件较好，但上行时左槽中段靠近秤杆碛一侧水深略浅，上行船舶仍须注意。

4.2.3 维护方案挖槽稳定性分析

采用列亚尼兹的最佳挖槽断面计算公式^[9-10]确定挖槽区稳定性：

$$k_m = \frac{a^{2/3}}{1-b+ba^{5/3}} \tag{1}$$

$$a = \frac{h_n}{h_0} \tag{2}$$

$$b = \frac{B_n}{B_0} \tag{3}$$

式中： k_m 为挖槽最佳尺度无量纲计算值； h_n 为挖

槽内水深； h_0 为挖槽前浅滩水深； B_n 为挖槽宽度； B_0 为原河宽。经计算，维护推荐方案的上、下挖槽 k_m 值分别为： $k_{m1} = 1.06$ 、 $k_{m2} = 1.03$ ，均大于 1，表明方案挖槽较为稳定，仅有轻微回淤。考虑到上游枢纽群拦沙的影响，来沙量将持续降低，未来回淤量可能会进一步减少。

5 结论

- 1) 长江上游枢纽群拦沙及向家坝日调节非恒定流的变化导致下游河道来沙量大幅减少，冲刷态势加剧。加之人工采砂的影响，共同使左槽航道大幅拓宽、拓深，分流比及流速均增加。枯水期开通左槽航道维护，降低左槽通航水位已成为可能。
- 2) 通过物理模型试验分析，航道维护推荐方案工程量小，挖槽稳定，对联动斗笠子急滩影响较小，且成功改善了枯水期左槽存在的斜流，滑梁水等流态，可使左槽满足 2.9 m 水深通航标准的维护水深由现状条件下 (5 m) 降低至 2 m 水位，开通时间可由平均每年 116 d 提升至 233 d，大幅改善了航行条件。
- 3) 后续研究中，除了对新水沙条件下的航道演变进行持续跟踪分析以外，也须跟踪监测该河段的珍稀鱼类生境，探索适宜更大吨位船舶的生态航道工程建设方案，迎接长江黄金水道的进一步发展。

参考文献：

[1] 长江重庆航运勘察设计院.长江上游东溪口水道航道整治工程工程可行性研究报告[R].重庆:长江重庆航运勘察设计院,2016.

[2] 李林,胡江,廖江花.长江上游东溪口新开卵石航槽挖槽尺寸探讨[J].水运工程,2018(9):101-105.

[3] 陈建.长江上游东溪口水道航道尺度提升可能性分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(3):61-65,172.

[4] 王延贵,胡春宏,刘茜,等.长江上游水沙特性变化与人类活动的影响[J].泥沙研究,2016(1):1-8.