



长江上游日调节非恒定流 对拴疆碛浅滩航道要素的影响*

秦镭宁¹, 胡江², 薛飞龙³

- (1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 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;
3. 中铁长江交通设计集团有限公司, 重庆 401121)

摘要: 向家坝水电站日调节非恒定流与岷江日调节非恒定流在宜宾合江门汇合形成新的非恒定流过程, 波长超过 200 km, 对宜宾—泸州河段(叙泸段)航道滩险的通航要素产生明显影响。采用平面二维非恒定水流数学模型, 计算分析代表工况下日调节非恒定流传播规律及其对叙泸段拴疆碛航道要素的影响。结果表明: 1) 日调节非恒定流自合江门传递到拴疆碛约 1.5 h, 拴疆碛水位日变幅最大约 1.053 m, 相较于合江门衰减约 30%, 且波峰时期水面比降小于波谷时期, 拴疆碛卵石滩采砂对非恒定流运动产生明显影响; 2) 代表性日调节非恒定流过程中, 拴疆碛河段满足航道维护标准 2.9 m 水深的河宽在 204~585 m, 现有航标设置存在航道边界不满足最小维护水深情况, 须对现有航标设置方案进行优化。

关键词: 非恒定流; 二维数值模拟; 浅滩; 航道要素

中图分类号: TV 133.2; U 612.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0081-06

Daily regulated unsteady flow's influence on channel elements of Shuanjiangqi shoal in the upper Yangtze River

QIN Lei-ning¹, HU Jiang², XUE Fei-long³

- (1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. China Railway Changjiang Transportation Design Group Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: A new unsteady flow, with a wavelength of more than 200 km, has been formed at Yibin Hejiangmen by the convergence of daily regulated unsteady flow from Xiangjiaba Hydropower Station and Minjiang River, which has a significant impact on the navigation elements of the shoal channel of the Yibin-Luzhou river (Xulu section). A two-dimensional unsteady flow mathematical model is applied to analyze the propagation law of the daily regulated unsteady flow on the channel elements of Shuanjiangqi in Xulu section. The results show that: 1) It takes about 1.5 hours to transmit the regulated unsteady flow from Hejiangmen to Shuanjiangqi. And the maximum daily variation amplitude of Shuanjiangqi water level is about 1.053 m, which is about 30% lower than Hejiangmen. The water surface gradient in the peak period is lower than that in the trough period. Sand mining in the pebble beach of Shuanjiang has a significant impact on the unsteady flow. 2) In the process of representative daily regulated

收稿日期: 2021-01-20

*基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1600400)

作者简介: 秦镭宁(1996—), 男, 硕士研究生, 从事航道整治、河道治理研究。

通讯作者: 胡江(1977—), 男, 博士, 教授, 从事生态、智能航道研究。E-mail: 378922494@qq.com

unsteady flow, the river width of Shuanjianqi is 204~585 m that achieves the channel maintenance water depth standard of 2.9 m. Moreover, and the existing navigation mark setting at the channel boundary cannot satisfy the minimum maintenance water depth, so the existing navigation mark setting scheme needs to be optimized.

Keywords: unsteady flow; two-dimensional numerical simulation; shoal; channel elements

金沙江向家坝水电站距离宜宾市区 33 km, 枯水期电站运行下泄的日调节非恒定流最大日水位变幅超过 3.5 m, 其在宜宾合江门与岷江的非恒定流过程耦合后形成新的日调节非恒定流过程, 波长超过 200 km^[1]。向家坝日调节非恒定流改变了长江上游枯水期的来流条件, 对航道运行维护产生明显影响。

向家坝运行前后, 不少单位和个人对其日调节非恒定流的通航影响进行过专题研究。西科所^[2]、南科院^[3]基于物模试验得出水位日变幅总体沿程减小; 中南院^[4]通过一维非恒定流模型得出切机对非恒定流影响距离总体不变; 蔡新永等^[5]通过小比尺船模试验研究, 得出向家坝日调节非恒定流对坝下游河段船舶自航上行存在明显影响; 杜思材等^[6]发现向家坝水电站日调节发电流量变幅较大, 非恒定流传递至宜宾需要 1.5 h 左右, 尽管岷江非恒定流过程显得无序, 但两江水流在宜宾汇合后形成的非恒定流波形、波幅更符合向家坝下泄过程, 尤其是当金沙江水位变幅较大时, 非恒定流特性与向家坝更接近; 黄小利等^[7]基于二维数学模型分析了非恒定流下叙泸河道主要受向家坝日调节过程影响; 张毅等^[8]基于二维数学模型分析, 提出距离合江门 63.5 km 的香炉滩受非恒定流影响下水位日调节变幅较大; 李秋圆^[9]分析了新的水沙条件下, 向家坝非恒定流对位于合江门下 132 km 的金钟碛河段通航影响不明显; 黄岱^[10]、古宇翔等^[11]基于一维多波长非恒定流模型, 研究认为向家坝日调节非恒定流向下游传递影响范围至重庆, 在宜宾至重庆间传递存在约 2 个波长, 传递时间约 40 h, 并提出叙泸河段在非恒定流条件下的水深资源优化利用方案。可见, 对于金沙江向家坝的非恒定流认识, 不同研究成果有较大的差异, 其对下游航道滩险通航的影响也还未完全认识清楚。

长江上游叙泸段目前航道维护尺度为 2.9 m × 50 m × 560 m (水深 × 航宽 × 弯曲半径)。拴疆碛 (图 1) 位于金沙江、岷江汇合口合江门下约 17 km, 系典型的山区河流枯水浅滩。滩段右岸算盘碛与左岸拴疆卵石边滩对峙形成一狭窄河道。近年来由于人为挖砂, 河道地貌条件发生较大变化, 左岸拴疆卵石边滩高程降低、范围缩小, 枯水期滩面过流, 导致航槽水深减小。由于距离合江门汇合口较近, 枯水期电站运行期水位日变幅较大, 日调节非恒定流对其通航水力要素及航标布置产生了明显的影响。

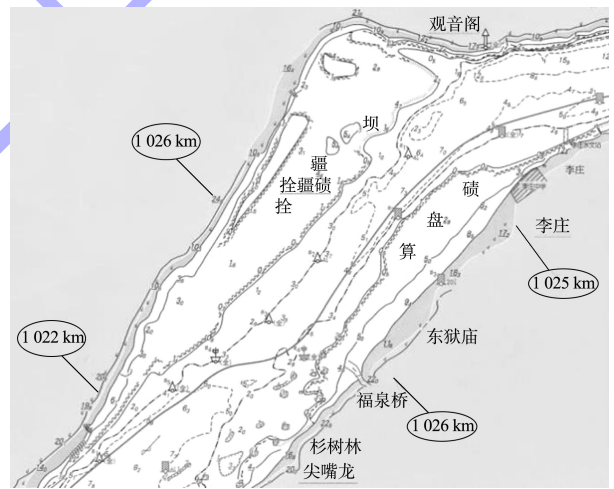


图 1 长江上游叙泸段拴疆碛浅滩航道

本文通过二维非恒定流数学模型研究该河段的日调节非恒定流特性, 分析其对拴疆碛浅滩航道要素的影响, 并为航标布设提供建议。

1 二维模型建立及验证

1.1 控制方程和方程离散

二维非恒定流数学模型控制方程包括: 连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h\partial p_a}{\rho_0\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial x} +$$

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hv_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h\partial p_a}{\rho_0\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial y} +$$

$$\frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

式中: \bar{u} 、 \bar{v} 为基于水深的平均流速; x 、 y 和 z 为笛卡尔坐标; t 为时间; h 为总水头; u 、 v 为 x 、 y 方向的速度分量; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yz} 、 s_{yy} 为辐射应力的分量; p_a 为大气压强; ρ_0 为水的相对密度; S 为点源流量大小; u_s 、 v_s 为源汇项水流的相对流速; T_{ij} 为侧向应力项, 包括黏滞摩擦、湍流摩擦、差异平流。

1.2 方程离散

本文采用有限体积法对计算域进行空间离散, 将连续的计算域划分成互不重叠的三角形。浅水方程^[12]转化为:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (4)$$

式中: \mathbf{U} 为守恒型物理矢量; \mathbf{F} 为通量矢量; \mathbf{S} 为源项。

1.3 模型建立验证

本模型模拟范围为合江门—朱沱河段, 全长 238 km, 采用 2016 年该河段 1:5 000 实测地形。模型出口边界为朱沱水文站实测小时水位, 进口入流边界为宜宾合江门实测小时流量过程。本模型共布置 75 072 个网格, 网格平均间距 50 m, 模型经验证后糙率分布在 0.014~0.044。

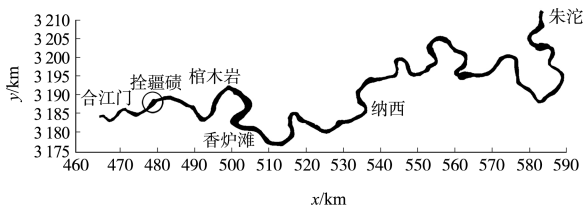
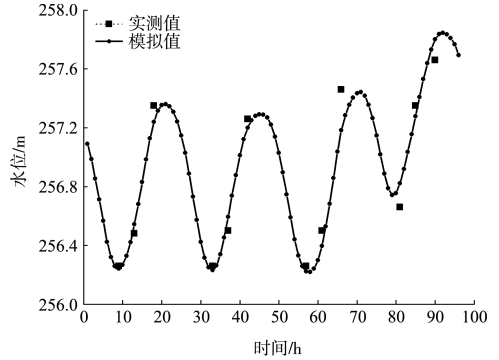


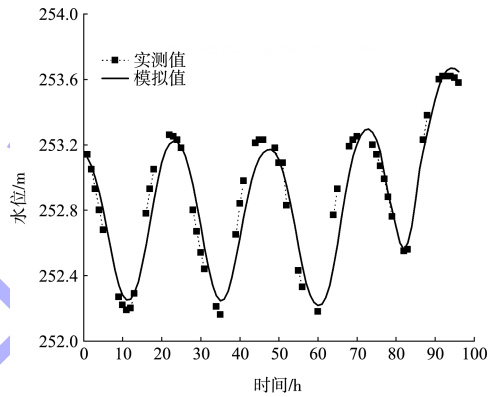
图 2 合江门至朱沱河段平面二维数学模型网格布置

模型采用 2016-01-05—2016-01-10 期间沿程自动水位计的实测小时水位和断面流速进行验证。结果见图 3、4。非恒定流水位波形及大小、典型滩段断面流速分布均与实测资料吻合较好, 水位

差值基本在±0.1 m 以内, 流速值偏差小于 15%, 数学模型计算结果满足相关规定^[13]的要求。

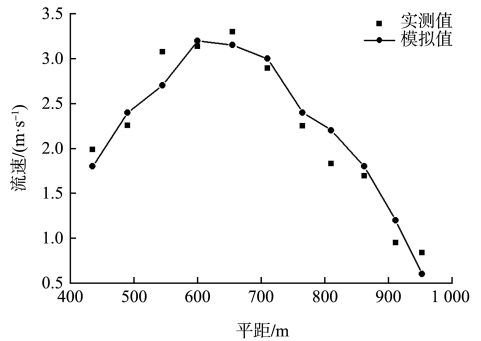


a) 拴疆滩段(里程1 024.5 km)

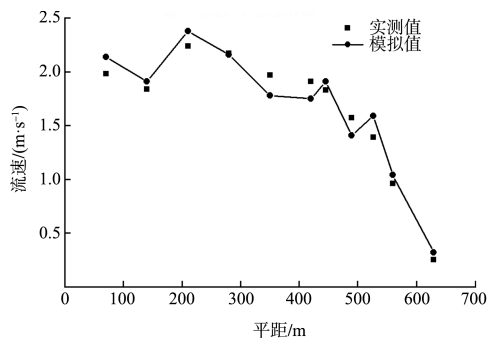


b) 棺木岩段(里程1 007.76 km)

图 3 水位验证



a) 香炉滩段(里程987 km)



b) 冰盘滩段(里程876 km)

图 4 断面流速分布验证

2 非恒定流传递特性分析

2016-01-05—2016-01-10 宜宾合江门流量变化为 2 680~4 610 m³/s, 流量变化幅度较大, 且航道初始水位较低, 非恒定流历时长、对航道影响较为显著, 可作为分析日调节非恒定流特性及影响的典型工况。

2.1 日调节非恒定流的波长和传递速度

如图 5 所示, 当合江门(1 044 km)处于波峰时, 泸州纳西(935 km)正好处于波谷, 半个波长为 108 km, 由此大致可以推算出典型工况下日调节非恒定流一个完整的波长为 216 km。非恒定流波峰从合江门传递到纳西经过了 13 h, 叙泸河段的日调节非恒定流传递速度约为 8.3 km/h。

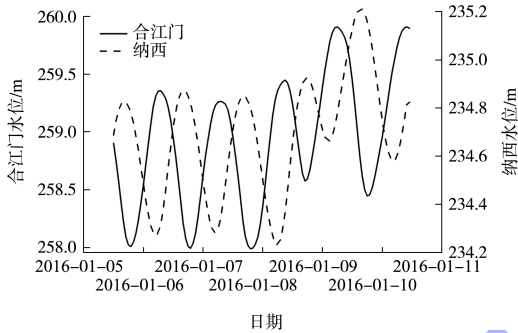


图 5 叙泸段典型非恒定流过程的波长变化

图 6 对比了合江门与控疆碛(1 027 km)水位波形变化。合江门的非恒定流波传递至控疆碛约需 1.5 h, 涨水段的时长约 12 h。非恒定流从合江门传递重点险滩控疆碛的波速为 10.7 km/h, 相较于叙泸段的平均速度快了约 20%。因此, 日调节非恒定流传递过程中存在速度的沿程衰减, 而且衰减幅度较大。

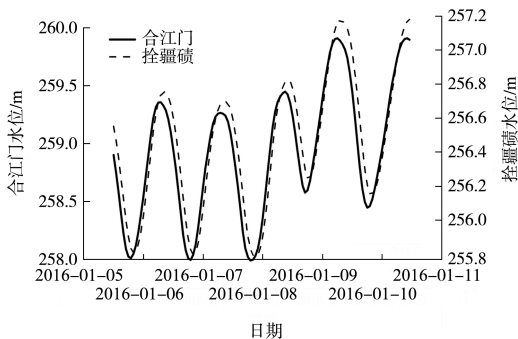


图 6 合江门与控疆碛非恒定流水位波形变化

2.2 波高变化

图 7 对比了合江门与控疆碛非恒定流波高变化。

由图 7 可知, 在非恒定流传递的过程中存在波的衰减现象。合江门最大波高 1.453 m, 最小波高 1.260 m; 控疆碛最大波高 1.053 m, 最小波高 0.933 m。波高最大衰减 0.420 m, 平均衰减幅度约为 30%。

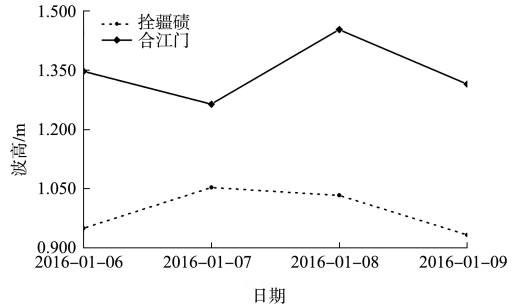


图 7 合江门与控疆碛波高变化

2.3 水位变化

选取 2016-01-06 的波峰时段、2016-01-07 的波谷时段以及一般时段分析不同时段的水位沿程变化(图 8、9), 水位沿程最大日变幅在 0.959~1.053 m, 从上至下里程 1 027.0~1 024.5 km 间日调节水位变幅整体呈增加的趋势。波峰期沿程水位降落小于波谷时期, 这与叙泸段整体的日调节非恒定流波峰时期比降最大的特性有所差异。

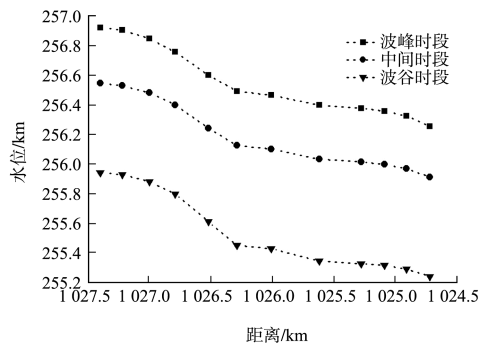


图 8 不同时段沿程水位变化

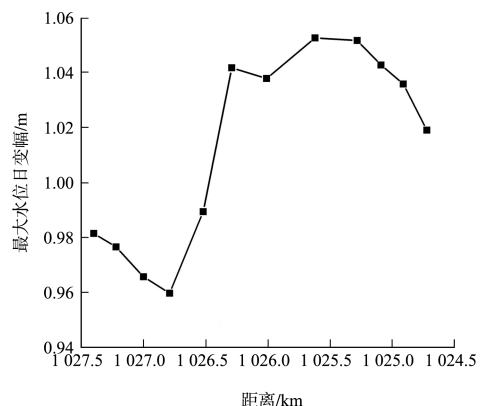


图 9 沿程水位最大日变幅

分析具体原因, 在控疆碛首, 由于左岸控疆碛采砂活动影响, 导致滩面降低, 在日调节波峰时段, 滩面过流、分流比加大, 主航槽流量减小, 因此头部水位较天然情况下有所降低; 而在日调节波谷时段, 水流归槽, 控疆碛采砂对水位跌落的影响减弱, 因此, 在非恒定流调节下表现为波峰时期整体比降小而波谷时段整体比降大。

3 航道要素影响

对于航道要素, 重点关注波峰、波谷两个最不利时刻的变化情况。在典型工况下, 采用控疆碛枯水期航道左右岸侧面标的连线分别代表左右岸的航道边界, 在此基础上取 12 断面讨论航道要素的变化情况。控疆碛枯水航道边界及典型断面布置见图 10。

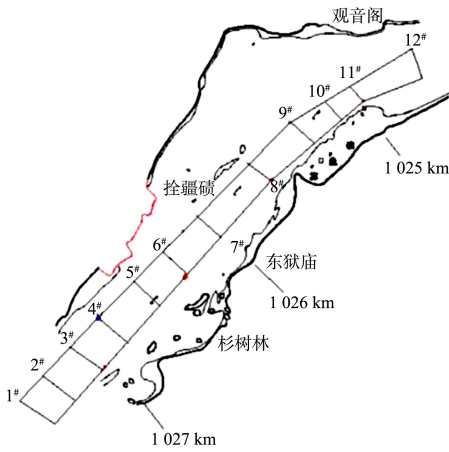


图 10 控疆碛典型断面布置

3.1 有效航宽变化

日调节非恒定流条件下, 控疆碛波峰相比于合江门延迟 1.5 h; 以计算典型过程看, 合江门水深的波谷出现在 7:00, 控疆碛波谷出现在 8:30 左右; 合江门波峰出现在 19:00, 控疆碛波峰出现在 20:30。

该河段波峰、波谷时满足 2.9 m 水深航道宽度变化见图 11。波峰时, 控疆碛河段满足 2.9 m 水深的航宽在 248 ~ 585 m; 最宽处在航道里程 1 025.09 km 处, 最窄处在航道里程 1 026.29 km 处。波谷时, 控疆碛河段满足 2.9 m 水深的航宽在 204 ~ 508 m; 最宽处在航道里程 1 027.22 km 处, 最窄处在航道里程 1 025.62 km 处。

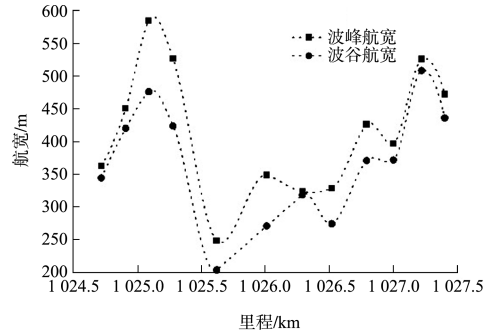
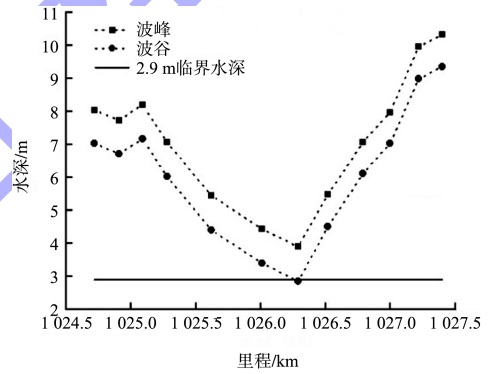


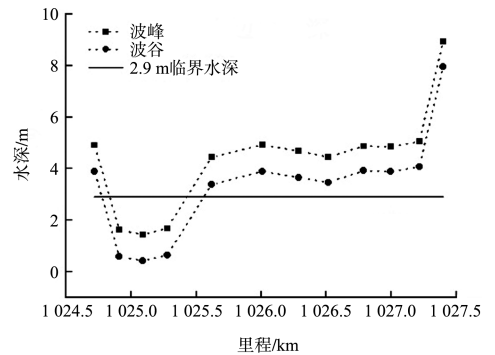
图 11 波峰、波谷满足 2.9 m 水深河道宽度

3.2 航道边界水深分析与航标设置优化

该河段波峰、波谷时航道边界水深变化见图 12。由图 12 可知, 波峰时, 控疆碛河段左边界水深在 3.89 ~ 10.32 m、右边界水深在 1.43 ~ 8.93 m; 波谷时, 航道左边界水深在 2.84 ~ 9.35 m、右边界水深在 0.41 ~ 7.95 m。



a) 左边界水深



b) 右边界水深

图 12 左右边界沿程水深

由图 12 可知, 在航道里程 1 025.28 km 处, 航道右边界波峰、波谷时均不满足 2.9 m 航道维护水深的要求, 现有的航标设置不能正确揭示航道边界信息。因此, 建议对 11# 断面右航标(图 13)进行调整, 由现有的位置 B 点 (479 644.706 8, 3 188 187.305 0, 北京坐标) 向西北方位调整约 46.02 m

至图 14 中 A 点(479 621.314 6, 3 188 239.167 1, 北京坐标), 从而使航道水深满足 2.9 m 水深要求。调整后的航道宽度在 113~508 m。

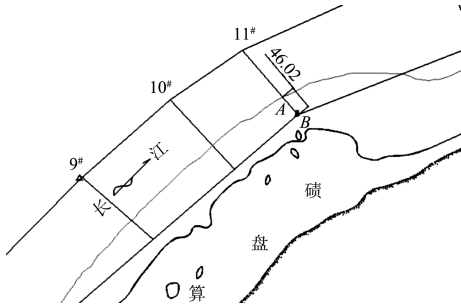


图 13 旧航标局部

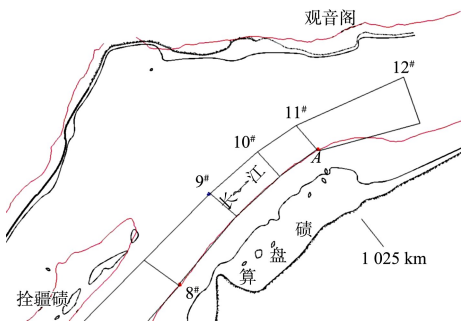


图 14 新规划航槽布置

3.3 代表船舶消滩能力分析

长江上游 1 000 吨级船舶自航消滩综合指标计算需满足如下经验公式^[14]:

$$E = U - 0.05J^2 + 0.65J < E_0 \quad (5)$$

式中: E 为消滩综合指标; U 为水流速度(m/s); J 为水面比降(‰); $E_0 = 4.1$ 为消滩临界综合指标。

根据式(5)可获得控疆碛河段典型工况下波峰、波谷时航道消滩综合指标的沿程分布, 见图 15。由图 15 可知, 控疆碛河段在典型工况下航道均满足代表船型临界上滩条件。

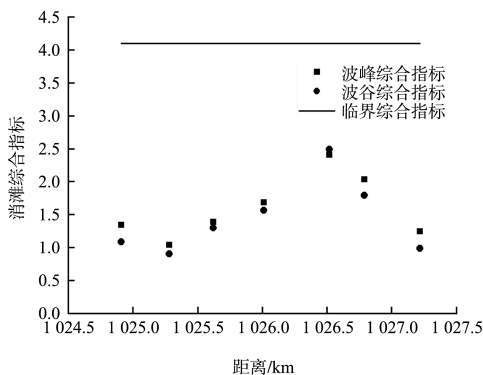


图 15 控疆碛河段沿程消滩综合指标分布

4 结语

1) 长江上游叙泸段典型的日调节非恒定流工况下, 一个完整的非恒定流波长约为 216 km、传递时间为 26 h; 合江门的非恒定流传递至控疆碛大约需要 1.5 h, 且非恒定流的传递速度存在沿程的衰减。

2) 日调节非恒定流从合江门传递至控疆碛后存在波幅的快速衰减; 合江门最大水位变幅约 1.453 m, 至控疆碛最大变幅为 1.053 m, 平均衰减约 30%。

3) 控疆碛的左岸卵石边滩采砂对控疆碛非恒定流特性有显著的影响, 改变了波峰时期流量的横向分布, 降低了波峰水位, 从而形成波峰比降小于波谷的现象, 同时减小了控疆碛的水位变幅。

4) 在日调节非恒定流下, 控疆碛满足 2.9 m 水深的河宽在 204~585 m 变化; 根据现有航标设置, 航道里程 1 025.28 km 处航道右边界在波峰波谷时刻均不满足 2.9 m 航道维护水深的要求, 须对现有航标进行调整, 建议由现有的位置 B 点(479 644.706 8, 3 188 187.305 0, 北京坐标)向西北方位调整 46.02 m 至 A 点(479 621.314 6, 3 188 239.167 1, 北京坐标), 以满足水深要求。

参考文献:

- [1] 薛飞龙, 胡江, 杜思材, 等. 叙泸段河道非恒定流作用下水力参数的变化[J]. 水运工程, 2017(10): 142-148.
- [2] 张绪进, 胡真真, 刘亚辉, 等. 向家坝水电站日调节非恒定流的传播特征研究[J]. 水道港口, 2015, 36(5): 414-418.
- [3] 曹民雄, 庞雪松, 王秀红, 等. 向家坝水电站下游非恒定水沙特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2011(1): 28-34.
- [4] 顾莉, 王立杰, 周小飞, 等. 向家坝水电站切机非恒定流对干流航运影响研究[J]. 水力发电, 2021, 47(1): 107-110.
- [5] 蔡新永, 蔡汝哲, 李晓飏, 等. 向家坝非恒定流对航道通航条件影响的试验研究[J]. 水运工程, 2017(2): 77-82.
- [6] 杜思材, 胡江, 薛飞龙, 等. 金沙江宜宾段非恒定流过程及传播特性[J]. 水运工程, 2017(10): 166-170.
- [7] 黄小利, 郭志学, 陈日东. 基于日调节非恒定流影响的长江叙渝段最不利通航水位数值模拟[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 78-82.