



日调节非恒定流对筲箕背河段航道 水流条件的影响*

张帅帅^{1,2}, 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. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

摘要:选取典型工况通过非恒定数学模型计算分析滩段水位、流量、流速、比降等因素变化特性, 得到日调节对筲箕背河段水流条件的影响。结果显示, 2种日调节工况下非恒定流传播至筲箕背河段水位变幅在1.01~1.37 m, 非恒定流对下游航道水流条件和对研究河段内的控制河段及航道维护设施等产生一定的影响, 并且日变幅4.5 m较日变幅3.0 m工况对航道水流条件等影响更大。分析结果为优化枢纽航运调度方案和航道维护措施提供支撑。

关键词: 向家坝; 日调节; 非恒定流; 筲箕背

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0109-06

Influence of unsteady flow on channel's flow conditions in Shaojibei reach

ZHANG Shuai-shuai^{1,2}, YANG Sheng-fa¹

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Changjiang Chongqing Harbor and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China)

Abstract: The typical working conditions are selected to calculate and analyze the various characteristics of water level, discharge, flow velocity, specific drop, etc. in the beach section through the unsteady mathematical model, and the influence of daily regulation on the flow conditions of Shaoqibei reach is obtained. The results show that under two kinds of daily regulation conditions, the unsteady flow from unsteady flow to Shaoqibei River has a certain influence on the flow conditions of the downstream channel and the control reach and maintenance facilities of the channel under the condition of unsteady flow from 1.01 m to 1.37 m. The influence on the channel's flow condition under 4.5 m daily variation is greater than 3.0 m. The analysis result provides support for further optimizing the hub shipping scheduling scheme and waterway maintenance measures.

Keywords: Xiangjiaba; daily regulation; unsteady flow; Shaoqibei reach

向家坝作为金沙江下游梯级开发中最后一级, 下游紧邻长江干线航道, 蓄水运行将直接影响叙渝段航道条件。张毅等^[1]研究分析了日调节非恒定流对航道维护的影响; 母德伟等^[2]认为向家坝日变幅和时变幅不宜过大; 黄小利等^[3]分析在金沙江和岷江非恒定流的影响下下游河道水流参数变化规律; 薛飞龙^[4]结合一维数学模型和实测资

料, 分析研究叙泸段河道内代表性非恒定流传播过程及其造成水力参数的变化情况; 杜思才^[5]通过实测资料和数学模型分析了金沙江和岷江的非恒定流耦合特征; 季荣耀^[6]建立了二维水沙数学模型, 对推荐方案实施后的效果与非恒定流对水深的影响进行计算分析; 曹民雄^[7]通过物理模型试验分析得到非恒定流引起的水流条件变化; 张

收稿日期: 2020-05-22

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402104)

作者简介: 张帅帅(1987—), 男, 博士研究生, 工程师, 从事河流动力学研究。

有林等^[8]通过数学模型计算得到日调节和泄洪工况下研究河段内水力指标。以上研究说明日调节引起的非恒定流对下游航道水流条件有一定的影响。笔者采用数学模型研究向家坝日调节非恒定流对筲箕背河段航道水流条件和航道维护的影响, 以期为航道工程整治和航道维护等提供参考。

1 滩险概况

筲箕背碛水道起于钉钉石(1 001.0 km), 止于烈女岩(1 012.0 km), 全长 11.0 km, 筲箕背滩主要位于航道里程 1 004.0~1 005.0 km。该水道上段弯曲, 下段顺直。筲箕背上段左岸买米石、槐子滩、鱼窝沱相连, 其岸线较为规则; 上段右岸有扯船漕和独猪儿等一连串卵石堆, 其分布较为散乱, 形如一个筲箕伏在江中(图 1)。

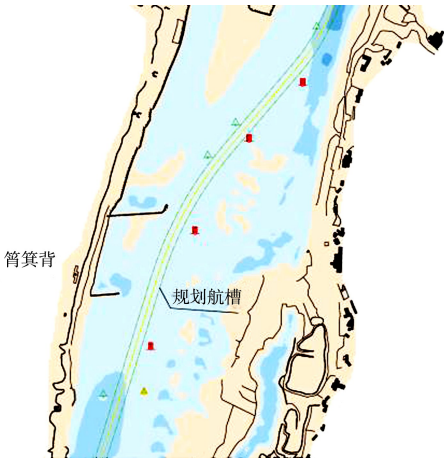


图 1 筲箕背滩段

2 数学模型的建立与验证

2.1 数学模型基本方程

二维数学模型主要控制方程如下:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot hu = 0 \tag{1}$$

$$\frac{d(hu)}{dt} = A_H h \nabla^2 u - gh \nabla \eta - \frac{gn^2 |u| u}{h^{1/3}} \tag{2}$$

式中: η 为水位; t 为时间; ∇ 为梯度; u 为垂线平均速度; h 为水深; g 为重力加速度; n 为糙率; A_H 为水平涡黏系数。

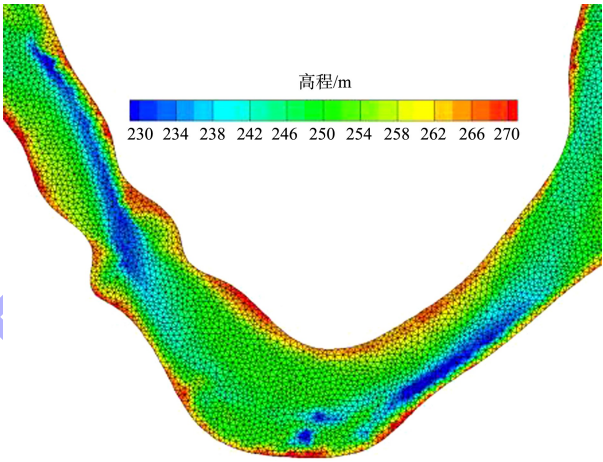
2.2 模型范围和验证

计算河段从向家坝水电站至长江朱沱水文站,

地形采用 2016 年枯水期地形资料, 网格间距 20~55 m, 网格数 623 502。计算河段与局部网格见图 2。



a) 计算河段范围



b) 局部(棺木岩)网格

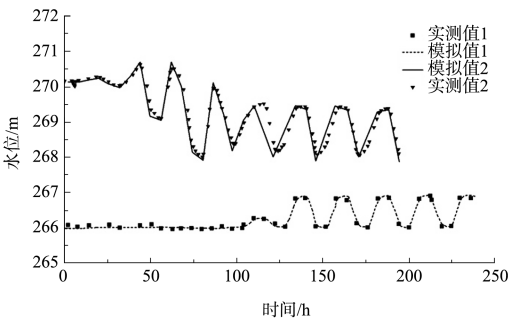
图 2 数学模型计算范围

1) 工况 1: 向家坝出流为 1 380~1 930 m³/s, 最大日变幅为 0.84 m; 高场流量为 765~1 590 m³/s, 最大日变幅为 0.99 m, 日调节较为明显。

2) 工况 2: 向家坝下泄流量为 2 900~5 860 m³/s, 最大日变幅约为 2.25 m; 高场流量为 1 700~3 180 m³/s, 最大日变幅为 1.05 m, 日调节较为明显。

3) 工况 3: 向家坝下泄流量为 1 690~3 450 m³/s, 最大日变幅为 1.30 m; 高场流量为 685~1 560 m³/s, 最大日变幅为 0.92 m, 日调节较为明显。

计算验证结果见图 3。



a) 向家坝

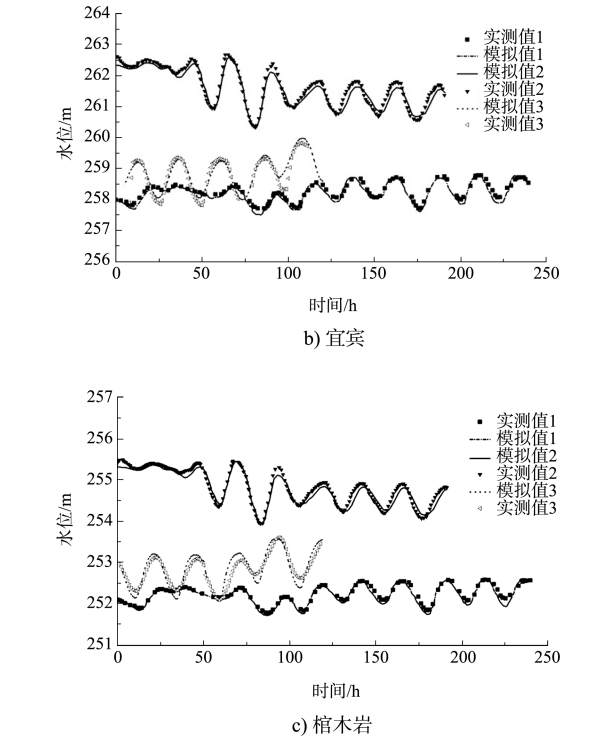


图 3 非恒定流水位验证

3 计算工况的选取

向家坝水电站枯水期典型日调节量见表 1。朱沱边界条件见图 4，各支流保证率为 $P=98\%$ 时流量见表 2。工况 1 最小下泄流量为 $1\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 、最大为 $4\,255\text{ m}^3/\text{s}$ ，最大流量是最小下泄流量的 3.55 倍，水位最大日变幅 4.5 m，最大小时变幅 1.0 m。

工况 2 最小下泄流量为 $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 、最大为 $4\,811\text{ m}^3/\text{s}$ ，最大下泄流量是最小下泄流量的 3.21 倍，水位最大日变幅 3.0 m，最大小时变幅 1.0 m。

表 1 电站典型日调节 24 h 下泄流量过程

时段	下泄流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	
	工况 1	工况 2
0:00—1:00	1 200	1 518
1:00—2:00	1 200	1 518
2:00—3:00	1 200	1 518
3:00—4:00	1 200	1 518
4:00—5:00	1 200	1 518
5:00—6:00	1 200	1 518
6:00—7:00	1 200	1 518
7:00—8:00	1 930	1 518

续表 1

时段	下泄流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	
	工况 1	工况 2
8:00—9:00	1 930	2 299
9:00—10:00	1 930	2 299
10:00—11:00	1 930	2 299
11:00—12:00	1 930	2 299
12:00—13:00	1 930	2 299
13:00—14:00	1 930	2 299
14:00—15:00	1 930	2 299
15:00—16:00	2 700	2 299
16:00—17:00	3 502	2 993
17:00—18:00	4 337	3 578
18:00—19:00	4 337	3 578
19:00—20:00	4 337	3 578
20:00—21:00	3 253	3 578
21:00—22:00	2 407	2 548
22:00—23:00	1 735	1 865
23:00—24:00	1 200	1 518

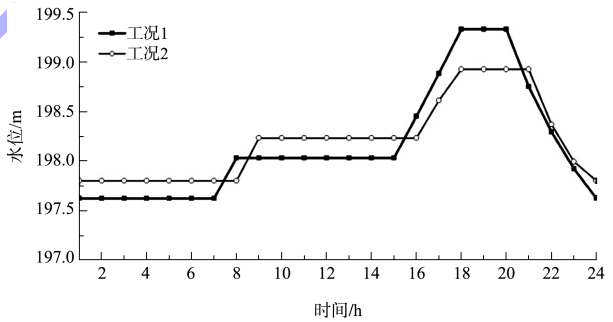


图 4 朱沱站边界条件

表 2 各支流保证率为 $P=98\%$ 时流量

支流	岷江	横江	沱江	赤水河
流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	605	70	60	100

河流糙率随水深变化，模型糙率率定按不同流量级进行，采用分区糙率自适应调整。在初始给定糙率的基础上，按权重调节过流区域内各网格结点糙率值自动逼近目标水位，实现区域化的糙率调整与率定。设定糙率合理取值范围(0.02~0.05)，对局部点糙率调整值达到合理取值区间后，不再进行调整。筲箕背河段糙率取值为 0.028~0.046。

4 计算结果分析

日调节工况下沿程水位变幅见图 5。从图 5 可以看出工况 1 电站日调节非恒定流沿程坦化较快, 水位最大日变幅及最大小时变幅沿程呈减小趋势。日调节工况 1 条件下, 枢纽下游引航道口水位日变幅为 4.47 m/d、最大小时变幅为 1.00 m/h, 至岷江口水位日变幅衰减为 2.38 m/d、最大小时变幅为 0.51 m/h, 至筲箕背河段水位日变幅衰减为 1.37 m/d, 至泸州水文站水位日变幅衰减为 1.20 m/d、最大小时变幅为 0.23 m/h, 至朱沱水文站水位日变幅衰减为 0.71 m/d、最大小时变幅为 0.11 m/h。

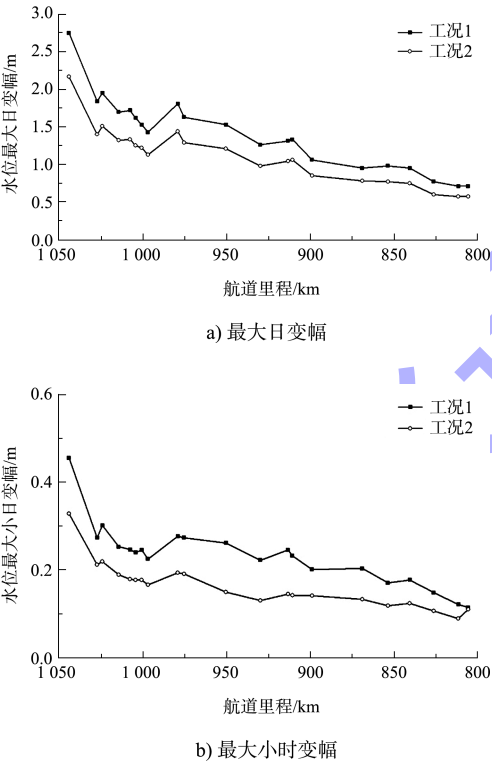


图 5 日调节工况下沿程水位变幅

日调节工况 2 条件下, 枢纽下游引航道口水位日变幅为 3.00 m/d、最大小时变幅为 0.98 m/h, 至岷江口水位日变幅衰减为 1.72 m/d、最大小时变幅为 0.3 m/h, 至筲箕背河段水位日变幅衰减为 1.15 m/d, 至泸州水文站水位日变幅衰减为 0.85 m/d、最大小时变幅为 0.13 m/h, 至朱沱水文站水位日变幅衰减为 0.57 m/d、最大小时变幅为 0.11 m/h。电站日调节非恒定流沿程坦化较快, 水位最大日变幅及最大小时变幅沿程呈减小趋势。

工况 1 最小下泄流量为 1 200 m³/s, 比工况 2 最小下泄流量 1 518 m³/s 小 318 m³/s, 坝址—泸州河段各断面最低水位有所降低, 其中小雪滩以上河段较为明显, 最低水位比工况 2 低 0.54~0.70 m; 由于非恒定流的坦化作用, 岷江口以下河段差值逐步减小, 最低水位比工况 2 低 0.16~0.33 m。

与工况 2 相比, 工况 1 下游各断面的水位日变幅更大, 但各断面日变幅的差值沿程整体呈减小趋势, 引航道口门区日变幅比工况 2 大 1.46 m/d, 至岷江口差值衰减为 0.66 m/d, 至泸州差值衰减为 0.35 m/d。水位日变幅超过 2 m/d 的河段, 工况 1 为距坝约 46 km, 工况 2 为距坝约 29 km, 工况 1 比工况 2 长 17 km。

从水位最大小时变幅的衰减速度分析, 工况 1 各断面的最大小时变幅均大于工况 2, 其中从烧瓦沱码头—李庄水文站河段差值较大。这说明工况 1 水位小时变幅的衰减速度慢于工况 2。

综合向家坝汛期 8 台机组满发, 满发泄流能力约为 6 800 m³/s, 泄洪起始流量取为 6 800 m³/s。根据屏山站洪水分析成果, 实测最小洪水涨率约为 200 m³/(s·h), 最大洪水涨率约为 1 200 m³/(s·h)。泄洪工况见表 3, 水位变化结果见表 4。

表 3 正常运行期泄洪非恒定流研究工况				
工况	洪水涨率/ (m ³ ·s ⁻¹ ·h ⁻¹)	起始流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	动门间隔 时间/h	每次动门增加 泄量/(m ³ ·s ⁻¹)
1	200	6 800	1	200
2	1 200	6 800	1	1 200

表 4 泄洪工况水位小时变幅			
断面名称	距坝里程/ km	下游水位最大小时变幅/(m·h ⁻¹)	
		工况 1	工况 2
筲箕背	1 010.0	0.08	0.44
	1 005.0	0.07	0.38
	1 003.0	0.08	0.41

工况 1 洪水涨率为 200 m³/(s·h), 动门间隔时间 1 h, 每次动门增加的泄量从 200 m³/s 增加至 1 200 m³/s。各典型断面的最大小时变幅随着每次动门泄量的增加而增加, 但均未超过 1 m/h; 小时变幅为 0.07~0.08 m/h。

工况 2 下游河道各断面水位最大小时变幅有所

增大, 且水位变幅沿程衰减速度变慢, 到筲箕背的小时变幅为 0.38 ~ 0.44 m/h。该工况流量由 6 800 m³/s 增至 21 200 m³/s, 每间隔 1 h 增加 1 次流量, 每次流量增加幅度均为 1 min 之内增加 600 m³/s 或 1 200 m³/s, 平均洪水涨率 1 200 m³/(s·h)。10、15、30、60 min 水位最大变率亦发生在引航道口门区, 依次为 0.50、0.57、0.73、1.00 m; 岷江入汇口依次为 0.14、0.18、0.31、0.54 m; 筲箕背依次

为 0.07、0.08、0.19、0.38 m。

5 电站日调节对下游河道通航条件的影响分析

表 5 显示: 日调节工况 1 筲箕背滩段水位最大日变幅为 1.37 m, 最大小时变幅为 0.3 m, 流速变幅为 0.3 m/s; 日调节工况 2 筲箕背滩段水位最大日变幅为 1.15 m, 最大水位小时变幅为 0.17 m, 流速变幅为 0.28 m/s。

表 5 日调节工况下筲箕背滩段的水位和流速变化

工况	航道里程/km	水位日变幅/m			水位小时变幅/m	流速变幅/(m·s ⁻¹)
		最高	最低	变幅		
1	1 005.3	251.88	250.51	1.37	0.30	0.30
	1 005.0	251.79	250.46	1.33	0.27	0.22
	1 004.0	251.72	250.41	1.31	0.24	0.22
	1 003.8	251.62	250.35	1.27	0.25	0.14
2	1 005.3	251.90	250.75	1.15	0.17	0.28
	1 005.0	251.82	250.75	1.07	0.15	0.22
	1 004.0	251.74	250.65	1.09	0.14	0.22
	1 003.8	251.64	250.63	1.01	0.18	0.10

向家坝日调节工况下研究河段的比降流速和流态均处于不断变化中, 非恒定流将给河段带来一定的附加比降和附加流速, 对船舶航行有一定影响。河段水力参数组合见表 6, 船舶上滩水力指标见表 7。2 种日调节工况下设计船舶均能顺利上行。

维护受日调节的影响较大。航道尺度变化见表 8。

表 8 不同工况下筲箕背河段航道尺度变化

航道里程/km	航道尺度(水深×宽度×弯曲半径)/ (m×m×m)	
	工况 1	工况 2
1 001.0~1 005.1	2.7×50×560	3.0×50×560

工况 1 当向家坝最小下泄流量为 1 200 m³/s 时, 筲箕背滩险维护尺度只能达到 2.7 m×50 m×560 m; 工况 2 当向家坝最小下泄流量 1 500 m³/s 时, 筲箕背滩险的维护水深可以保证目前的最小维护水深尺度要求 2.9 m×50 m×560 m。

表 9 统计了筲箕背河段的过河情况, 工况 1、2 条件下最高水位位于桐子溪过河水位以下, 对船舶过河影响不大; 钉钉石河段处工况 1、2 条件下最高水位均位于过河水位 4 m 以下, 对过河航标维护影响较大。

表 9 筲箕背河段过河水位

河段	过河范围(里程)/km	过河水位/m
钉钉石	1 001.0	<4
桐子溪	1 003.5	4~8

筲箕背控制河段情况见表 10。

表 6 筲箕背滩滩段各工况下比降流速组合

工况 1		工况 2	
比降 J/%	v/(m·s ⁻¹)	比降 J/%	v/(m·s ⁻¹)
1.3	2.85	1.29	2.80
1.1	3.03	1.03	3.00
1.9	2.84	1.82	2.82
-	2.96	-	2.95

表 7 Ⅲ级航道船舶上滩水流指标

水面比降/%	3.0	2.0	1.0	0.5
相应流速/(m·s ⁻¹)	2.6	3.0	3.5	4.0

6 对航道维护的影响

根据 2 种日调节工况的计算分析成果得知, 非恒定流引起宜宾—朱沱段水位日变幅工况 1 较工况 2 大, 水位变化引起航标配布的调整。根据日调节工况分析成果可知, 宜宾合江门—朱沱段航标

表 10 筲箕背段控制河段水位

控制河段范围 (长度)/km	开班时间或 水位/m	收班时间或 水位/m
1 003.7~1 005.3	<2.5	>2.5

根据非恒定流数模计算成果，2 种日调节工况对筲箕背控制河段影响较大，控制河段水位见表 11。

表 11 典型日调节工况筲箕背河段水位变幅
(相对航行基面水位) m

控制 河段	相关 水尺	工况 2		工况 1		控制 水位
		最高	最低	最高	最低	
筲箕背	独猪窝	2.83	1.08	2.16	0.5	<2.5

天然情况下，5、6 月基本达到中洪水期水位，筲箕背信号台可以关闭，而受上游日调节影响可能产生较大变幅，大部分信号台均需延期，开、收班时间也要做相应调整。

电站泄洪工况 2 引起的下游水位变幅最大，下游引航道口为 0.91 m，至长江合江门处最大水位日变幅为 0.48 m/d，到筲箕背为 0.38 m/d。泄洪各工况对水富—宜宾段航标影响较大，在一定程度上会增加个别滩段的维护工作量。长江干线宜宾—朱沱全线水位日变幅最大(0.48 m/d)，泄洪产生的非恒定流造成坝下长河段水位的一定范围内的升降，部分滩险航道可能会因淤积体得不到有效冲刷而出浅。根据以往向家坝泄洪测量结果，宜宾航道管理处辖区杨柳碛滩航槽上口、下口分别出现了 3 m 等深线不能贯通的淤积体，桧疆碛滩航槽变窄的情况说明泄洪后辖区各滩险有一定的变化，向家坝泄洪可能造成各滩险演变，并相应增加演变剧烈河段航道维护工作量。

7 结论

- 1) 非恒定流流量变化幅度沿程逐渐坦化，水位变化幅度沿程逐渐减小。
- 2) 日调节 2 种工况下的水位变幅至筲箕背河段 2 种工况的水位日变幅分别为 1.37 m/d 和

- 1.15 m/d，小时变幅分别为 0.3 m/h 和 0.17 m/h。
- 3) 日调节工况 1 当向家坝最小下泄流量为 1 200 m³/s 时，筲箕背滩险维护尺度只能达到 2.7 m×50 m×560 m；日调节工况 2 当向家坝最小下泄流量 1 500 m³/s 时，筲箕背滩险的维护水深可以保证目前的最小维护水深尺度要求 2.9 m×50 m×560 m。

4) 日调节工况 1、2 条件下最高水位位于桐子溪过河水位以下，对船舶过河影响不大；钉钉石河段处工况 1、2 条件下最高水位均位于过河水位 4 m 以下，对过河航标维护和控制河段影响较大，并会对信号台开收班时间有一定的影响。

5) 电站泄洪工况会引起筲箕背河段水位变幅为 0.38 m/d。向家坝泄洪可能造成滩险演变变化，并增加演变变化河段航道维护工作量。

参考文献：

[1] 张毅,刘勇,张帅帅.向家坝日调节运行对长江叙渝段航道维护影响研究[J].水运工程,2017(1):108-114.

[2] 母德伟,王永强,李学明,等.向家坝日调节非恒定流对下游航运条件影响研究[J].四川大学学报(工程科学版),2014,46(6):71-77.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 季荣耀,陆永军,左利钦.水电枢纽下泄非恒定流作用下的航道整治研究[J].水利学报,2007(S1):318-323.

[7] 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.

[8] 张有林,李文杰,张谧,等.向家坝枢纽非恒定泄流对落锅滩河段航道通航条件的影响[J].水运工程,2018(11):91-96.

(本文编辑 郭雪珍)