



嘉陵江草街—河口段航道通航条件 及补水需求分析^{*}

李忠勇¹, 马倩^{1,2,3}, 高桂景⁴, 何进朝^{1,2,3}, 谢灵运^{1,3}

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400016;

2. 重庆交通大学, 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016;

3. 重庆西科水运工程咨询中心, 重庆 400016; 4. 重庆市港航海事事务中心, 重庆 400016)

摘要: 嘉陵江草街—河口段航道枯水期存在多滩群出浅碍航问题, 尤其三峡库区建成后, 该河段水沙变化更为复杂。受逐年地形变化的影响, 航道整治效果不能达到规划航道维护尺度标准。为探讨电站下游长河段浅滩碍航问题的改善措施, 采用二维水动力学数值模拟方法, 分析三峡库区回水对该河段航道尺度的影响, 得到不同水位条件下嘉陵江河口航道碍航浅滩的分布特征, 提出各重点滩段达到维护尺度的最小流量要求及其保证率。结果表明, 嘉陵江草街—河口段不同滩段在相同流量下的水位差异明显; 现状条件下浅滩碍航问题突出; 在现有地形条件下满足Ⅲ级航道尺度要求的最小下泄流量约为 $1\,620\text{ m}^3/\text{s}$ 。

关键词: 嘉陵江; 通航条件; 浅滩; 航道补水; 数值模拟

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0132-08

Navigation conditions and flow regulation requirements of Jialing River channel from Caojie to estuary

LI Zhong-yong¹, MA Qian^{1,2,3}, GAO Gui-jing⁴, HE Jin-chao^{1,2,3}, XIE Ling-yun^{1,3}

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

2. Chongqing Southwest Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

3. Chongqing Xike Waterway Engineering Consulting Center, Chongqing 400016, China;

4. Chongqing Port Maritime Affairs Center, Chongqing 400016, China)

Abstract: A large number of shoal groups form and obstruct navigation in the Jialing River channel from Caojie to the estuary during the dry season. The construction of the Three Gorges Reservoir area further adds to the complexity of the flow and sediment variation of this reach. Under the influence of topographic changes year by year, the effect of channel regulation fails to meet the standards of the planned channel maintenance dimensions. To solve the shoal-induced navigation obstruction problem of the long reach below the hydropower station, this paper analyzes the influence of the backwater in the Three Gorges Reservoir area on the channel dimensions of this reach by two-dimensional hydrodynamic numerical simulation. Then, it obtains the distribution characteristics of the navigation-obstructing shoals in the Jialing River estuary channel under different water levels and proposes the minimum flow requirement of the maintenance dimensions and the corresponding guarantee rate for each key shoal.

收稿日期: 2021-11-18

*基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202000716)

作者简介: 李忠勇(1996—), 男, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。

通讯作者: 马倩(1988—), 女, 博士, 助理研究员, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: maggie@cqjtu.edu.cn

section. The results show that the water levels of different shoal sections of the Jialing River reach from Caojie to the estuary vary greatly under the same flow and that the problem of shoal-induced navigation obstruction is prominent at present. The minimum discharge that meets the requirement of the Class-III channel dimensions is about $1\,620\text{ m}^3/\text{s}$ under the current topographic conditions.

Keywords: Jialing River; navigation condition; shoal; flow regulation for channel; numerical simulation

嘉陵江是国家规划的水运主通道, 是国家综合运输大通道的重要组成部分。自三峡成库蓄水后, 重庆朝天门—湖北宜昌段成为库区航道, 蓄水位抬高, 通航水位得到保障, 基本满足通航标准要求。但嘉陵江草街—河口段位于三峡库区回水末端, 受上游水库调度和库区回水的影响, 枯水期部分航道泥沙淤积碍航等问题凸显^[1-2]。近年来, 该河段虽进行了大量浅滩整治(如土湾滩、二郎滩以及斑鸠背滩滩群等^[3-4]), 但由于上游来流量较小, 仅通过航道整治很难满足通航尺度^[5]需求, 发生搁浅碍航事件的概率较大, 如近两年重庆主城区九龙滩航道水深不足和九龙坡港区船舶突然搁浅等^[6]。因此, 分析研究该河段在现状地形边界条件下的通航水流条件, 提出重点滩段达到河段规划航道尺度的流量要求, 可为嘉陵江草街—河口段航道改善措施的提出和通航管理提供科学依据, 具有重要的理论价值和指导意义。

河道的渠化工程可以增加回水区航道水深, 降低河道流速, 有效改善回水区的航道条件。但与此同时, 也会带来诸如库区泥沙淤积和下游清水冲刷等一些不利的影响, 尤其对于水深本就不满足航道尺度的变动回水区河段。川江长寿水道和洛碛水道消落期航道条件远远不能满足通航的要求。向家坝建成后4年内(2008—2012年), 坝址下游14 km河床平均下降0.56 m, 最深下切达5 m, 在中小流量($3\,000\sim10\,000\text{ m}^3/\text{s}$)下, 2012年下游水文站实测水位比2008年低了0.2~0.4 m, 通航条件变得更加不利^[7]。可见, 通过传统的航道整治工程可改善航道通航条件, 但复杂的水沙条件和河床冲淤情况使得这类工程措施的效果往往不能达到预期。通过合理的水库调度可以增加

枯期下泄流量, 改善航道通航条件。根据三峡水库蓄水期(2008—2014年)观测资料, 与建库前相比, 下泄流量增加 $1\,000\sim2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、航道水深增加1 m^[8]。

嘉陵江广元—合川段为645 km的Ⅳ级航道, 合川—河口段为95 km的Ⅲ级航道。受草街枢纽泄流^[9]和三峡水库变动回水的影响^[10], 草街—河口部分河段的滩险情况、水流条件及泥沙冲淤变化情况极其复杂^[11], 尤其在中、枯水期航道水位受限, 河段碍航浅滩出露, 船舶航行风险大, 通航条件较差^[12]。

嘉陵江草街—河口段68 km航道在2008—2012年期间按Ⅲ级航道开展整治工作^[13], 其中治理滩险24个, 航道尺度扩为 $60\times2.0\times480\text{ m}$ (航宽×水深×弯曲半径), 可通行1 000吨级自航机驳。但近年来由于水沙条件变化引起的河床冲淤演变^[14]和河道水流条件变化的影响, 部分滩段通航条件未达到预期整治效果^[15]。根据现场调查发现, 该河段在设计流量($327\text{ m}^3/\text{s}$)下仅油榨碛—蛮子滩段水深、航宽和弯曲半径满足Ⅲ级航道尺度要求, 其余滩群河段均存在设计流量下航道水深不足的问题。

本文采用深度平均平面二维数学模型^[16], 模拟分析嘉陵江草街—河口段重点滩险河道碍航情况, 研究不同河口水位下各滩段航道通航尺度, 提出各重点滩段达到Ⅲ级航道尺度要求的补水需求及对应保证率, 可为类似工程设计提供参考。

1 二维水动力数学模型

二维水动力数学模型的基本方程包括连续性方程和运动方程。

连续性方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

运动方程：

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} + \\ \frac{h}{\rho} \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \varepsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + fp \quad (2)$$

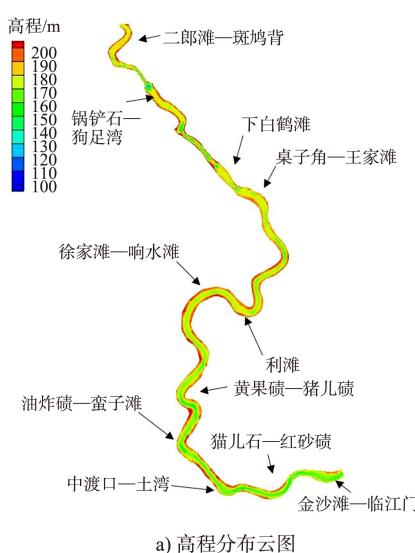
$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} + \\ \frac{h}{\rho} \left(\varepsilon_{yx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \varepsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\tau_{sy} - \tau_{by}) + fq \quad (3)$$

式中： h 为水深； t 为时间； u 、 v 分别为 x 、 y 方向流速； g 为重力加速度； z_b 为床面高程； ρ 为水密度； τ_{sx} 、 τ_{sy} 为表面切应力的 x 、 y 方向分量； τ_{bx} 、 τ_{by} 为底部切应力的 x 、 y 方向分量； ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{yx} 为涡黏系数； f 为科氏力系数； p 、 q 为 x 、 y 方向上的流量。

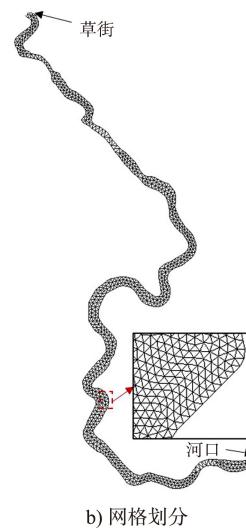
2 模型建立与验证

2.1 网格划分

控制河段数值模拟计算区域采用非结构化三角形网格进行离散，根据河道地形变化情况调整局部网格疏密程度。本次计算的总网格数量为 6.1 万个，网格最大边长 30 m。河道地形高程分布云图及网格划分见图 1。



a) 高程分布云图



b) 网格划分

图 1 研究河段高程分布云图及网格划分

2.2 边界条件

本文以实测的水面线资料率定参数。由于河道断面地形多变、地质复杂，故河段内分段验证糙率，主槽内糙率取值范围在 0.022~0.035，浅滩、丁坝区糙率取值在 0.035~0.050。

2.3 计算结果验证

由于研究河段较长，水位原型观测于不同时间分段开展，故使用 2018 年嘉陵江草街—河口段原型观测资料对模型进行验证。水面线验证采用 2018-03-09—2018-04-08、2018-07-04 流量分别为 395、534、871 和 20 200 m³/s 实测水面线。计算水面线与实测水面线验证结果见图 2。可以看出，水位误差控制在 0.10 m 以内，计算结果满足《水运工程模拟试验技术规范》^[17] 所规定山区河道水位允许偏差值，因此可采用本模型进行进一步分析和计算。

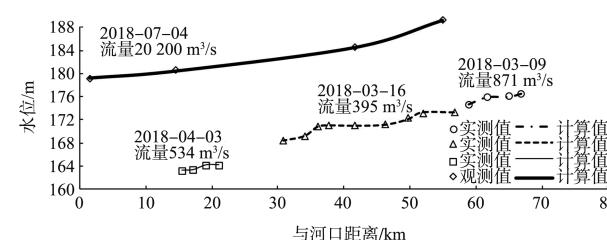


图 2 研究河段不同时段不同流量下水面线验证结果

3 枯水期航道通航条件及船舶通行情况分析

3.1 三峡回水影响

根据嘉陵江草街—河口段水流特性和梯级渠

化规划方案, 研究河段可分为草街—北碚段、北碚—井口段(三峡水库 175 m 蓄水最上端)和井口—朝天门河口河段。其中草街—北碚段主要受草街枢纽下泄水流的影响, 中、下两个河段还受到三峡水库回水和长江洪水顶托影响, 具有库区河道和天然河道的双重特性。

因研究河段中枯水期碍航主要表征为浅滩出露, 航道水深或航宽不足, 因此本文主要针对河道水深分布进行分析, 其计算结果见图 3。可以看出, 设计流量($327 \text{ m}^3/\text{s}$)下, 河口水位为 158.35 m(设计水位)时, 研究河段基本不受三峡库区回水和长江水位顶托影响, 呈天然河流的特性; 当河口水位为 163 m 时, 三峡库区回水和长江水位顶托影响河口以上约 23 km; 河口水位升至 166 m 时, 回水影响范围增至河口以上约 29 km; 河口水位升至 169 m 时, 回水影响范围增至河口以上约 35 km; 河口水位升至 173.3 m 时, 回水影响范围增至河口以上约 52 km。回水变动段内水深增加, 水面变宽。

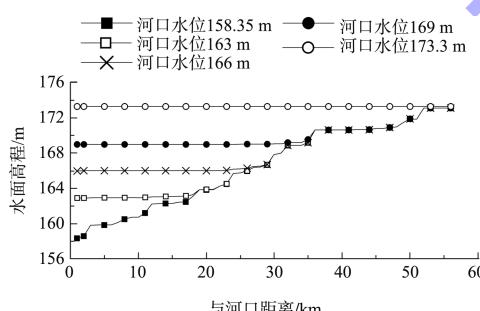


图 3 $Q=327 \text{ m}^3/\text{s}$ 不同河口水位下河段沿程水位计算结果

3.2 中枯水期航道水深分布

通过本文所建水力学计算模型得到河口不同水位下、设计流量为 $327 \text{ m}^3/\text{s}$ 时研究河段沿程水深分布, 研究河段典型滩段徐家滩—响水滩沿程

水深分布见图 4。可以看出, 河段浅滩出露, 碍航表征显著。流量 $327 \text{ m}^3/\text{s}$ 河口不同水位下各滩险段在设计 60 m 航宽范围内水深小于 2.0 m 河段长度见表 1。可以看出, 在嘉陵江来流流量较小且河口水位较低的情况下, 研究河段各滩险除油榨碛—蛮子滩段外, 其余河段航道尺度均不能满足 III 级航道尺度要求, 受三峡库区回水的影响, 随着河口水位的升高, 各影响区域范围内出露浅滩的长度明显减小, 但草街—北碚段仍存在一定范围的浅滩碍航段。

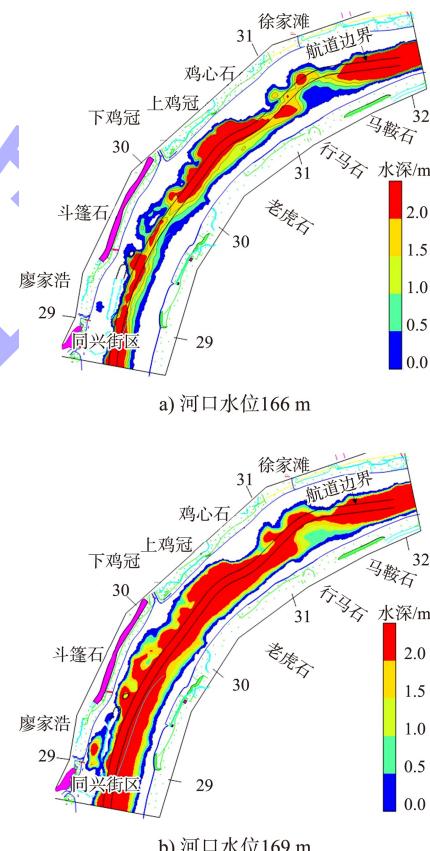


图 4 $Q=327 \text{ m}^3/\text{s}$ 不同河口水位下徐家滩—响水滩沿程水深分布

表 1 $Q=327 \text{ m}^3/\text{s}$ 草街—河口段浅滩里程分布

滩段	不同河口水位下浅滩里程分布/km			
	158.35 m	163 m	166 m	169 m
下白鹤滩	50.8~51.6	50.8~51.6	50.8~51.6	50.8~51.6
桌子角—王家滩	46.4~46.8, 47.6~48.1	46.4~46.8, 47.6~48.1	46.4~46.8, 47.6~48.1	46.4~46.8, 47.6~48.1
利滩	34.5~35.5	34.5~35.5	34.5~35.5	34.5~35.5
徐家滩—响水滩	29.0~30.0, 30.7~31.5	29.0~30.0, 30.7~31.5	29.0~30.0, 30.7~31.5	30.2~30.7
油榨碛—蛮子滩	-	-	-	-
中渡口—土湾	10.6~11.6	-	-	-
猫儿石—红砂碛	6.7~7.2, 7.6~7.8	-	-	-
金沙滩—临江门	1.2~3.0	-	-	-

3.3 河道通行船舶情况

根据 2017 年 9—12 月期间航行于嘉陵江草街—河口段的部分船舶参数见表 2, 发现除工作船外, 嘉陵江河口航段大部分为散货船通行, 船舶满载吃水均大于 2.0 m。为了明确不同草街下泄流量和河口水位组合情况下草街—河口段航道沿程水位变化, 设定 327、400、500、600、800、1 000、1 200 和 1 400 m^3/s 8 级流量, 河口分别为最不利情况(设计水位 158.35m)、161、163、165、167、169、171 和 173 m 8 级水位, 共计 64 组工况进行水力学计算。统计得到各种工况下草街—河口段满足 60 m 航宽且航道水深大于 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 和 5.0 m 的航道长度, 从而确定不同吃水船舶可航行水域范围, 计算结果见图 5。可以看

出, 金沙滩(河口以上 0~3 km)、土湾中上部(河口以上 11~12 km)、蹇家梁(河口以上 18~20 km)、响水滩(河口以上 29~32 km)利滩中上部(河口以上 35~36 km)、桌子角滩(河口以上 48~49 km)和白鹤滩(河口以上 51~52 km)为主要控制性河段, 随着草街下泄流量和河口水位的增加, 船舶自河口以上可航行区间增加。

表 2 部分船舶种类和吃水深度

船名	船舶种类	吃水/m	船名	船舶种类	吃水/m
旺达 16	散货船	3.25	洪青 29	散货船	2.35
云嘉 8	干散货船	2.35	江立 09	散货船	2.35
地质灾害救援	工作船	0.81	津洲 55	散货船	2.90
航龙 818	散货船	2.50	盛发 006	散货船	2.30
洪青 26	散货船	2.35			

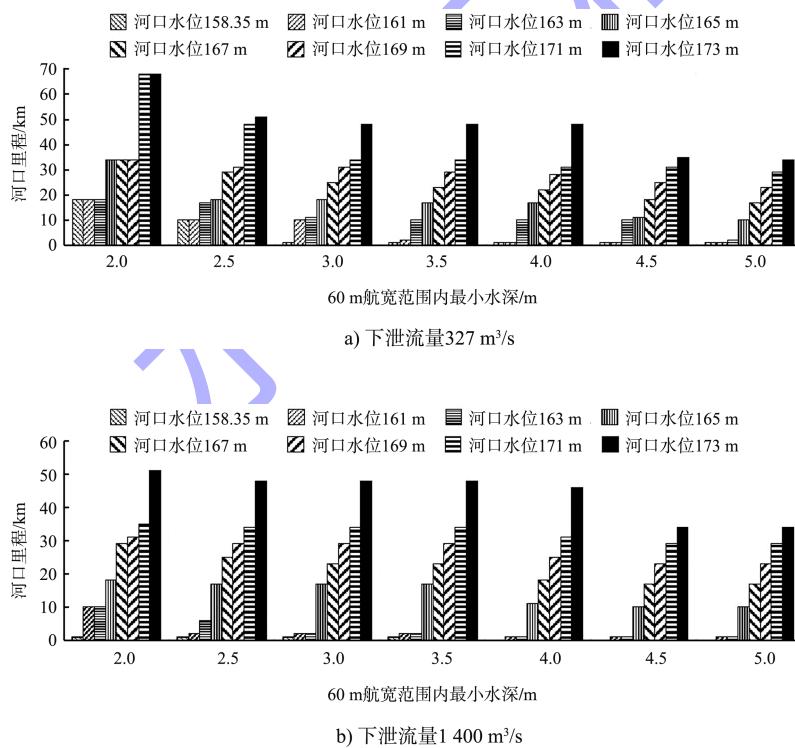


图 5 不同河口水位下相同吃水船舶的可航行水域范围

2012、2014、2016、2018、2020 年内嘉陵江河口水位过程见图 6a)。枯水期河口水位范围为 159.4~174.7 m, 5 个年份枯水期不同水位权重见图 6b), 其中水位为 158.35~163 m 的时间占 1.8%, 163~166 m 的时间占 13.6%, 166~169 m

的时间占 25.2%。结合不同河口水位下研究河段浅滩分布结果, 可见嘉陵江草街—河口段枯水期较长时间范围内均存在浅滩碍航的风险, 影响河段通航能力及通航安全。

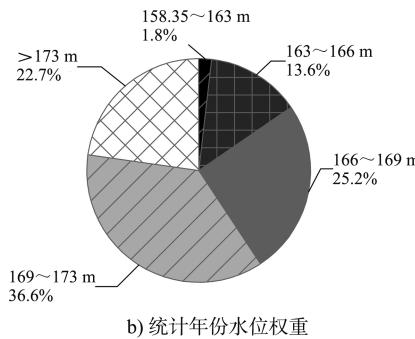
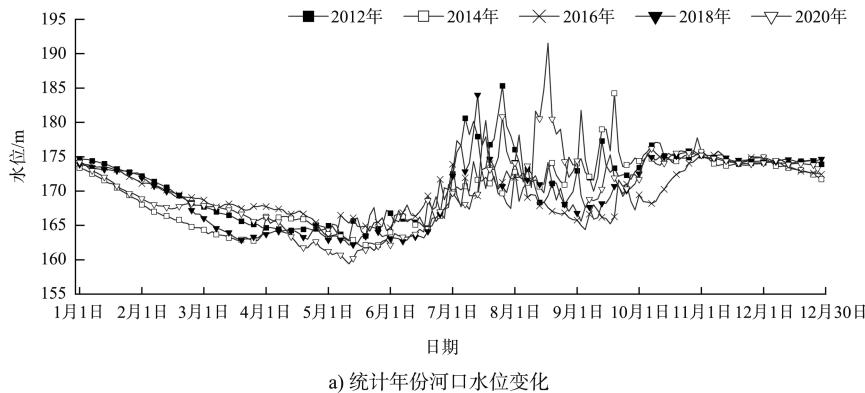


图6 统计年份河口水位

4 河道补水需求分析

4.1 现场调查结果

根据前述分析, 枯水期嘉陵江草街—河口段由于浅滩水深或航宽不足, 浅滩碍航, 不能达到规划航道维护尺度标准。虽然河口水位升高后可改善航道通航条件, 但河口水位变化显著, 且低水位时期占比较大, 因此进一步探讨嘉陵江草街—河口段各主要滩险河段满足Ⅲ级航道尺度要求的最小流量需求。由2017年8月—2018年8月期间草街—河口段主航道最小水深统计结果, 绘制得到草街—北碚段、北碚—井口段和井口—河口段主航道最小水深随草街下泄流量变化, 见图7。可以看出, 不同滩段在相同流量下的水位差异明显, 各种流量下均有水位小于2 m的情况出现, 由于嘉陵江通航船舶满载吃水均大于2 m, 故不能满足航道通航需求。

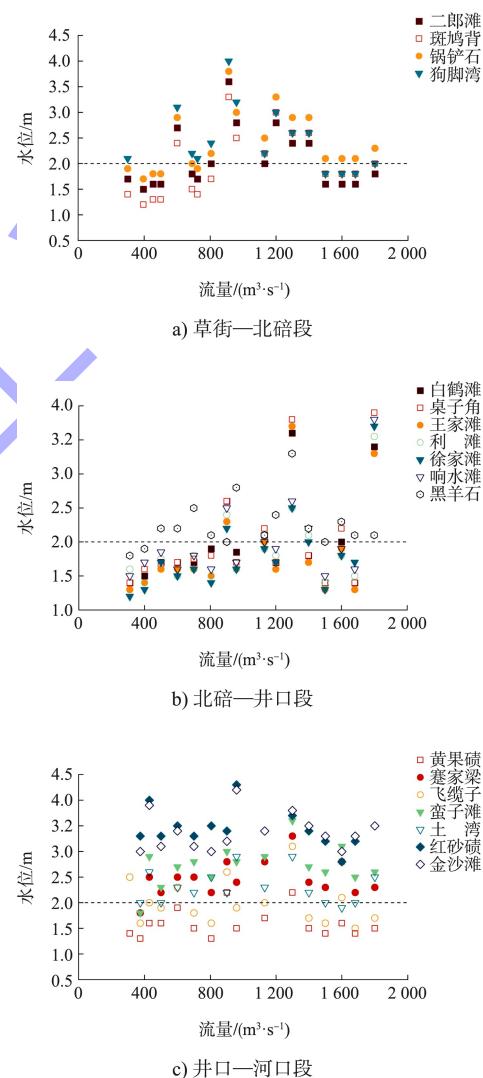


图7 3个河段主航道最小水深随草街下泄流量变化

嘉陵江草街—北碚段航道水深仅受河道地形和草街下泄流量的影响, 根据监测结果及最小水深与草街下泄流量关系分析, 得到观测时段内该

河段水深小于 2.0 m 对应的草街出库流量；嘉陵江北碚—河口段位于三峡回水变动区，航道通航条件不仅受草街下泄流量过程的影响，还受到河口水位的影响，航道水流条件较复杂，观测时段内草街—北碚段和北碚—河口段水深小于 2.0 m 对应的草街出库流量见表 3。可以看出，观测时段内草街下泄流量范围为 300~1 800 m³/s 时，各滩段水深也存在较大变化，水深与流量变化规律性较差。

表 3 嘉陵江草街—北碚段和北碚—河口段水深
小于 2.0 m 时草街出库流量

河段	滩险名称	流量/(m ³ ·s ⁻¹)
草街—北碚段	二郎滩	300~912
	斑鸠背	300~912
	锅铲石	350~1 680
	狗足湾	350~1 680
北碚—河口段	下白鹤滩	300~1 680
	桌子角	430~1 680
	王家滩	374~1 680
	利滩	374~1 680
	徐家滩	374~1 680
	响水滩	374~1 680
	黑羊石	374~500
	黄果碛	374~1 680
	蹇家梁	374~670
	飞缆子	374~1 680
	蛮子滩	374~670
	土湾	545~1 600
	红砂碛	300~800
	金沙滩	300~1 200

4.2 航道补水需求计算分析

考虑到水位观测在时空连续性的限制，采用水力学计算模型对嘉陵江草街—河口段各主要滩险河段满足Ⅲ级航道尺度要求的最小下泄流量需求进行计算。其中下游河口边界采用最不利情况，即不考虑三峡库区回水和长江水位顶托作用的影响。

根据计算结果绘制得到不同滩段 60 m 航宽范围内最小水深与流量的关系，见图 8。各滩段 60 m 航宽范围内最小水深与流量呈现一定的线性关系。采用线性插值近似得到各滩段满足Ⅲ级航道尺度

要求的最小下泄流量见表 4。可以看出，在现有地形条件和不考虑三峡回水和长江水位顶托影响的情况下，嘉陵江草街—河口段满足Ⅲ级航道尺度要求的最小下泄流量约为 1 620 m³/s。

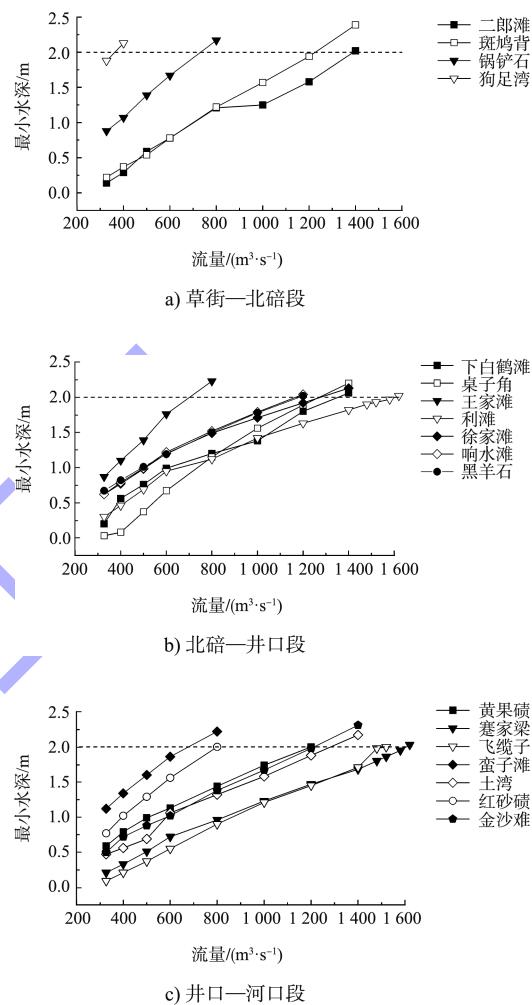


图 8 3 个河段各滩段 60 m 航宽范围内最小水深与流量关系

表 4 嘉陵江草街—河口各险滩满足Ⅲ级航道尺度要求最小下泄流量需求

滩险名称	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	滩险名称	流量/(m ³ ·s ⁻¹)
二郎滩	1 391	响水滩	1 168
斑鸠背	1 227	黑羊石	1 183
锅铲石	732	黄果碛	1 200
狗足湾	362	蹇家梁	1 620
下白鹤滩	1 354	飞缆子	1 520
桌子角	1 271	蛮子滩	327
王家滩	702	土湾	1 283
利滩	1 598	红砂碛	800
徐家滩	1 276	金沙滩	1 212

为保障河段最小下泄流量需求, 上游草街电站应执行梯级水电站水库调度方案, 保证通航最小流量要求, 同时水量调度要保证上下游最低通航水位。但根据流域水文径流特征, 嘉陵江径流量年内分配不均, 其中汛期5—10月占全年来水总量83.1%。根据近年来研究河段水文资料统计结果, 研究河段 $1\,620\text{ m}^3/\text{s}$ 的保证率仅为30%左右。随着气候改变和人类活动的影响, 河段径流量变化更为复杂, 各滩段满足对应航道尺度要求的最小下泄流量对应的保证率可能进一步减小。因此, 结合流域径流分配规律及草街电站实际调度运行情况, 单纯依靠草街电站提高下泄流量以达到航道规划尺度的可能性较小, 还需要深入研究河口段航道提升的可能性, 进一步结合航道整治工程或渠化工程以改善通航条件。

5 结论

1) 嘉陵江草街—河口段航道水深受河口水深影响, 草街下泄流量为 $327\text{ m}^3/\text{s}$, 河口水位为158.35 m时, 河段基本不受三峡库区回水和长江水位顶托影响, 呈天然河流的特性。

2) 草街—北碚段、北碚—井口段和井口—河口段主航道不同滩段在相同流量下的水位差异明显, 现状条件下浅滩碍航问题突出。

3) 在现有地形条件下, 嘉陵江草街—河口段满足Ⅲ级航道尺度要求的最小下泄流量要求约为 $1\,620\text{ m}^3/\text{s}$, 但保证率仅为30%左右。研究河段还需深入研究河口段航道提升的可能性, 进一步结合航道整治工程或渠化工程以改善通航条件。

参考文献:

- [1] 李文杰, 李娜, 杨胜发, 等. 基于挟沙力的三峡水库泥沙淤积形态分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(5): 726-734.
- [2] 肖毅, 杨胜发, 王涛, 等. 三峡水库蓄水初期库区航道条

件分析[J]. 水运工程, 2019(11): 92-99, 138.

- [3] 何进朝, 母德伟. 嘉陵江土湾滩航道整治模型试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 24-28.
- [4] 谢红利, 夏建旺, 李於彬. 嘉陵江二郎滩至斑鸠背滩群航道整治方案研究[J]. 中国水运(下半月), 2014, 14(5): 169-170, 173.
- [5] 曾亚东. 库区汊道与支流河口段航道尺度研究[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(8): 259-261.
- [6] 傅博. 三峡成库后嘉陵江北碚至河口段航道泥沙淤积问题研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [7] 尹晔. 山区河流水库下游河道冲淤演变研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- [8] 李秀佳. 梯级水库调度对长江航道通航条件影响研究初探[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(8): 65-66.
- [9] 董玉文, 杨忠超, 谢辉. 草街电站尾水渠扩挖工程影响数值分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(6): 54, 112-115, 54.
- [10] 徐晓明, 习倩倩, 张星星. 三峡库区航道演变及养护对策研究[J]. 中国水运(航道科技), 2021(5): 1-6.
- [11] 刘扬扬, 李斐, 许秀贞. 嘉陵江中下游干流水电开发对水文情势的影响[J]. 人民长江, 2014, 45(5): 10-15.
- [12] 赵志舟. 嘉陵江草街枢纽通航明渠体型及通航条件研究[J]. 山西建筑, 2009, 35(28): 357-358.
- [13] 陈理真. 嘉陵江草街至河口段滩群航道整治实例分析[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(4): 149-151.
- [14] 王志平. 嘉陵江凤仪库区航道推移质运动特性研究及治理[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [15] 周勤, 马倩, 何进朝, 等. 嘉陵江草街—北碚段航道整治效果及补水需求分析[J]. 水运工程, 2019, (7): 149-154.
- [16] 杨峰. 草尾河阿弥石河段航道整治效果数值分析[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(4): 83-84.
- [17] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.

(本文编辑 王璁)