



岷江下游中枯水碍航浅急滩段航道整治方案*

李顺超¹, 邓 涯^{2,3}, 何 熙¹, 谢玉杰¹, 马爱兴^{2,3}, 何修伟⁴, 胡 颖^{2,3}

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017;

2. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 南京水利科学研究院, 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029;

4. 四川岷江港航电开发有限责任公司, 四川 乐山 614000)

摘要: 山区冲积性河流滩槽明显, 连续弯道间易形成中枯水期碍航的浅、急滩。针对此类滩段整治中简单疏浚可能引起水流归槽而恶化的问题, 以岷江新开河滩段Ⅲ级航道工程为例, 建立全长约 10 km 的河工定床模型, 对研究河段的河床演变规律与碍航特征、工程前水流特性和航道整治设计方案及优化措施的效果等进行分析, 归纳总结出中枯水碍航浅急滩的整治思路和方案。结果表明, 方案实施后航道纵向流速在 3.5 m/s 以下、水面比降小于 2.45‰, 满足航道治理要求。

关键词: 岷江; 浅急滩; 航道整治; 定床物理模型

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0158-06

Channel regulation scheme for navigation-obstructing shallow and rapid beaches during normal water level and dry seasons in downstream of Minjiang River

LI Shun-chao¹, DENG Ya^{2,3}, HE Xi¹, XIE Yu-jie¹, MA Ai-xing^{2,3}, HE Xiu-wei⁴, HU Ying^{2,3}

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering of the Ministry of Communications,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

4. Sichuan Minjiang Port Navigation Power Development Co., Ltd., Leshan 614000, China)

Abstract: The channel and beach in the mountainous alluvial river are obvious, and shallow and rapid beaches are prone to occur in continuous curved reaches during normal water level and dry seasons. Simple channel dredging for such regulation projects, however, may lead to flow concentrating in channels with higher velocity. To solve the above mentioned problem, we take the third-level channel project of the Xinkaihe beach on Minjiang River as an example to build a fixed-bed physical model for a river of about 10 km. Then, we analyze the riverbed evolution laws, navigation obstruction characteristics, flow characteristics before regulation, and the effects of the channel-regulation design scheme and optimization measures. Moreover, we summarize the regulation principle and scheme of navigation-obstructing shallow and rapid beaches during normal water level and dry seasons. The results show that the longitudinal flow velocity in the channel is less than 3.5 m/s, and the water surface slope is below 2.45‰, which can meet the requirements of channel regulation.

Keywords: Minjiang River; shallow and rapid beach; channel regulation; fixed-bed physical model

收稿日期: 2022-04-02

*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y220011、Y221012、Y221013、Y222011); 四川省科技计划项目(2022YFS0467)

作者简介: 李顺超(1976—), 男, 教授级高工, 从事内河港口与航道工程设计与研究。

航运自古以来一直是我国西南山区重要的货物运输类型, 近些年来西江上游、川江、岷江、沱江等山区河流的航道升级扩能工作正在加速推进之中。山区河流航道的整治由来已久, 在过去数十年的航道工程研究中, 航道整治方法和技术取得了丰硕的成果。整体而言, 山区河流碍航滩段航道整治一般可分为石质滩险段^[1-3]、卵石河床滩险段^[4]、峡谷河段^[5]、宽河谷段^[6]、弯曲分汉段^[7]、库尾非衔接段、多滩串联的复杂滩群段等类型。针对上述山区河流典型滩险段的碍航特征^[8]、河床演变、水沙输移规律, 学者们采用河工物理模型和数学模型进行分析, 提出不同类型滩险段航道整治的整治原则、整治方法、整治参数(整治线宽度、整治水位等)^[9], 以及相应的工程措施(疏浚、筑坝和护岸等)。其中, 曹民雄^[10]选取国内 13 个典型石质急流滩的整治工程, 对此类滩险的整治原则和方法进行归纳和总结; 黄元贵^[11]、刘旺喜等^[12]对弯曲分汉的卵石河床滩段航道整治中汉道选定、整治线宽度、水动力轴线等进行了研究; 周家俞等^[13]则对嘉陵江凤仪场枢纽库尾段的弯曲多汉段航道整治方案开展河工定床物理模型研究; 赵志舟等^[14]对卵石河床复杂滩群段航道整治的方法与原则进行分析, 提出整治工程实施后需保证上下游各滩之间输沙平衡的准则。

综上可知, 山区河流不同河段由于河势、河床组成、水沙条件以及梯级枢纽建设等方面存在差异, 各滩段的航道整治也有所区别, 其中冲积性河流卵石河床的部分弯曲滩段入口受河床粗化或基岩暴露制约, 地势相对较高, 中枯水期水深浅、流速大, 形成了主要的碍航卡口段, 一直是山区河流航道整治工程关注的重点之一。

本文以四川岷江下游(龙溪口枢纽—宜宾合江门)Ⅲ级航道一期整治工程中的新开河滩段为例, 通过建立长约 10 km 的河工定床模型, 对研究河段的河床演变规律与碍航特征、工程前水流特性和航道整治设计方案及优化措施效果等进行分析, 归纳总结出中枯水碍航浅急滩的整治思路。本文研究成果已成功应用于新开河滩段航道整治工程

设计中, 该工程正处于施工阶段。

1 工程概况

岷江是长江的一级支流, 新开河滩位于宜宾河口上游约 53 km, 整体河势为河道弯曲、左滩右槽, 由于采砂活动影响滩沿不规则, 且有零星的沙洲露出, 河槽高程基本在 286~289 m, 边滩高程在 289~296 m。岷江新开河滩段河势见图 1。

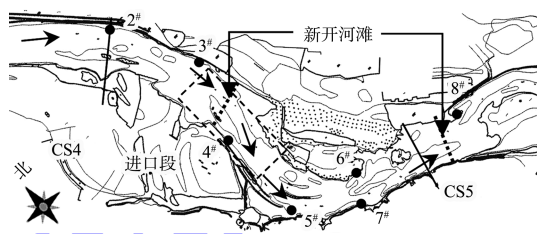
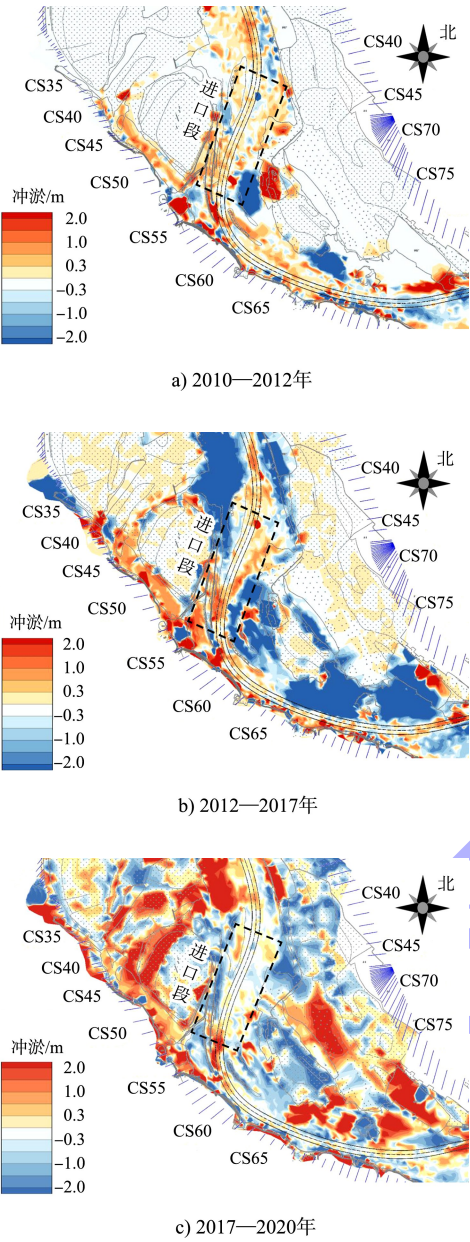


图 1 岷江新开河滩段河势

现状航道等级为Ⅳ级, 航道尺度为 1.5 m×45 m×500 m(航深×航宽×最小弯曲半径), 枯水期通行 500 吨级自航机驳。根据《岷江(龙溪口枢纽—宜宾合江门)航道整治一期工程初步设计》^[15], 研究河段规划航道等级为Ⅲ-(3)级, 航道尺度为 2.4 m×60 m×500 m, 枯水期通行 1 000 吨级单机驳和 2×1 000 吨级分节驳船队。

在 2012—2017 年新开河滩采砂活动频繁, 右侧边滩沿岸遭到大幅开采, 河床下切幅度高达 5 m 以上, 同时部分筛选后的废石料堆积于滩体表面, 高度在 3 m 以上, 造成边滩完整的滩沿破碎和不规则, 在上段和下段形成较大采砂深坑。2017—2020 年以后采砂活动得到控制, 滩体周围的采砂坑有一定的自然回填, 但由于 2020 年岷江流域大洪水(高场站最大日均流量 3.1 万 m³/s), 整个滩面表现为冲刷, 幅度在 0.6~1.5 m。

新开河滩进口段处于上游弯道与新开河滩弯道的连接段, 水动力轴线右上游贴左侧河槽向下游贴右侧河槽的摆动, 此类水动力轴线的走向极易在洪水消落期导致未带走的泥沙落淤, 从 2010—2020 年的 3 次河床演变也可发现此规律, 进口段的淤积幅度基本在 0.3~1.5 m, 见图 2。



注：淤积为正，冲刷为负。
图 2 新开河滩段河床冲淤变化

2 河工定床模型建立与验证

2.1 模型建立

岷江新开河滩河工定床物理模型见图 3。模型范围上起泥溪镇上游 1.2 km、下至古柏固定水尺下游 1.2 km，全长 10 km^[16]。模型上下边界位于河道顺直段，进出口水流平顺，利于物理模型控制上下游边界条件。

考虑到新开河滩段地形较为复杂，三维水流特性显著，河工模型试验研究采用正态模型，根

据试验场地及动力条件，确定平面和垂直比尺均为 100，流速比尺为 10，糙率比尺为 2.154，流量比尺为 10 万，水流时间比尺为 10。



图 3 岷江新开河滩段河工物理模型

在模型制作过程中，采用断面法控制河道地形，主槽和局部复杂地形采用加密断面或加围等高线的方法进行塑造，礁石采取逐点放样制作，模型全长约 70 m，制模断面 153 个，模型地形制作精度在±1 mm 之内。

河段枯水糙率为 0.047，模型糙率 0.022，模型采用梅花形(1.5 cm 的石子、间距为 10 cm)加糙，在恒定流验证时根据沿程水位进行糙率局部调整。

2.2 模型验证

依据 2017 年中(3 649 m³/s)、枯水(1 101 m³/s)实测水文资料，对研究河段的水位、流速断面分布进行验证，水尺、测流断面位置分布见图 1，水位和断面流速验证结果见表 1 和图 4。物理模型模拟的沿程水位与实测资料基本一致，误差在±8 cm 以内；沿程 2 条断面流速分布与实测资料符合较好，断面流量误差在±5%以内，均满足《水运工程模拟试验技术规范》^[17]要求。

表 1 沿程水位验证结果

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	里程/km	天然水位/m	模型水位/m	水位差值/m
1 101(枯水)	1. 85	292. 41	292. 34	-0. 07
	3. 37	292. 00	292. 04	0. 04
	4. 26	291. 21	291. 28	0. 07
	4. 91	290. 05	290. 11	0. 06
	5. 59	289. 53	289. 49	-0. 04
	5. 53	289. 56	289. 56	0. 00
	6. 75	289. 19	289. 17	-0. 02

续表1

流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	里程/km	天然水位/m	模型水位/m	水位差值/m
3 649(中水)	1. 85	294. 43	294. 51	0. 08
	3. 37	293. 95	293. 90	-0. 05
	4. 26	293. 02	293. 08	0. 06
	4. 91	292. 52	292. 54	0. 02
	5. 59	-	-	-
	5. 53	292. 05	292. 00	-0. 05
	6. 75	291. 39	291. 37	-0. 02

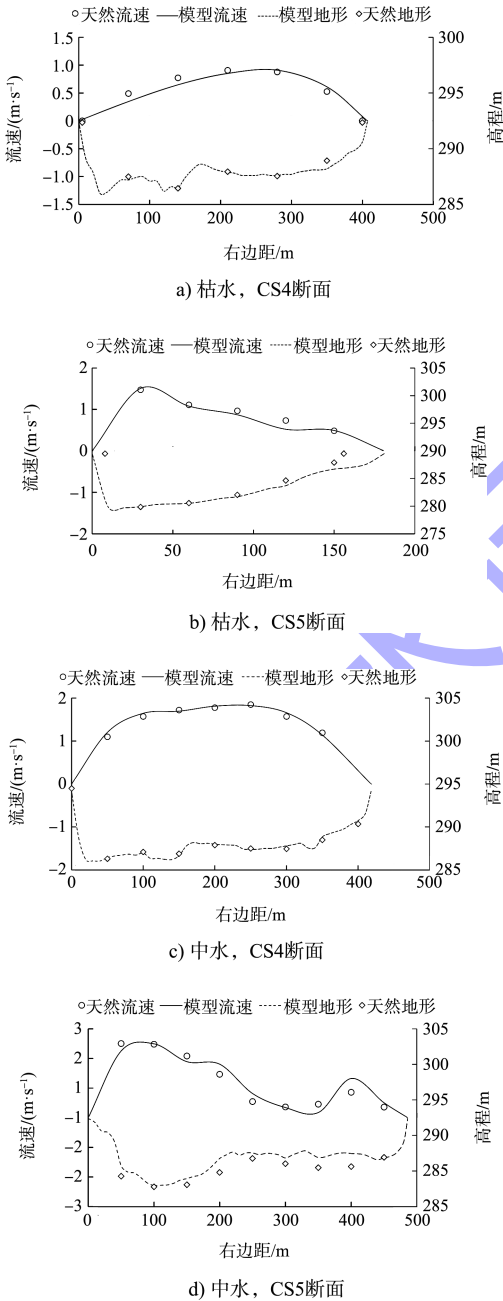


图 4 流速断面分布验证结果

3 滩段碍航特性分析

结合天然实测和工程前模型模拟的水位资料,

对新开河滩入口段(3[#]、4[#]水尺)的滩性特征进行分析, 见图 5。研究滩段平均水面比降在中水期的 2 250 m³/s(第二造床流量)达到最大, 接近 1. 2‰; 而枯水流量 900 m³/s 下比降为 0. 8‰, 洪水期在 0. 7‰左右, 属于典型的中枯水滩。

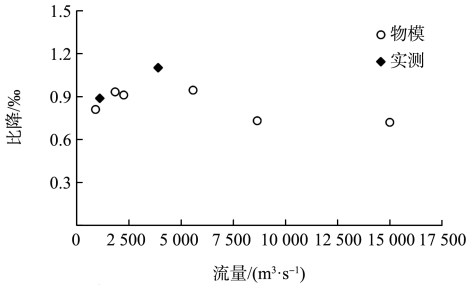


图 5 新开河滩入口段滩性变化特征

进一步对河心比降进行分析, 枯水流量 900 m³/s 下入口段最大比降为 3. 58‰, 中水流量 2 250 m³/s 下增加至 3. 72‰, 航道流速则接近 3. 5 m/s, 不满足 1 000 吨级船舶自航上滩水力指标, 见图 6a)。在设计流量 900 m³/s 下入口段航道水深也不满足 2. 4 m 规划航深的要求, 见图 6b)。可见, 新开河滩入口段属于典型的中枯水浅、急滩。结合图 2 的河床演变分析可知, 新开河滩入口段成滩的主要原因是其处于连续弯道间的过渡段, 汛期未带走泥沙容易落淤, 导致河床出浅和河槽缩窄, 属于自然成滩。

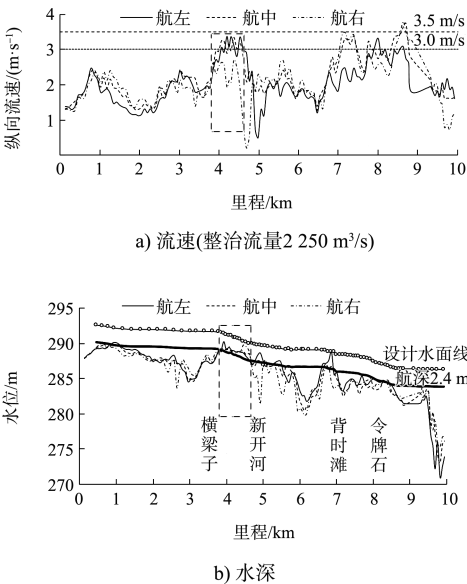


图 6 新开河滩入口段航道流速及水深变化

4 滩段航道整治方案研究

针对新开河滩入口段航深不足的情况，首先提出对不满足区域的航槽进行疏浚的设计方案，并在左侧滩头布置两条护滩坝，一方面维持航道疏浚效果，另一方面减缓滩头冲蚀，见图 7。

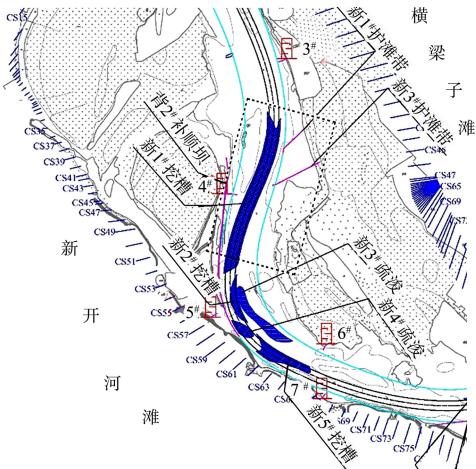
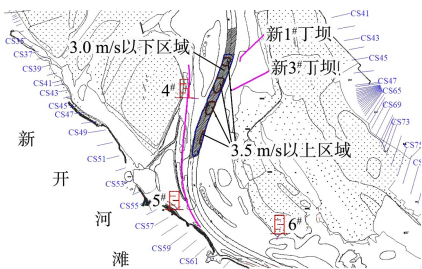


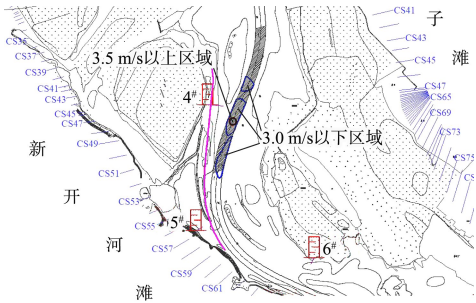
图 7 新开河滩入口段航道整治设计方案

在设计方案实施后，大规模的航槽疏浚满足了航道水深 2.4 m 要求，入口段中枯水比降也由工程前的 3.58‰ ~ 3.98‰ 降至 2.76‰ ~ 2.85‰，但航道纵向流速仍有大部分区域在 3.5 m/s 以上，个别点位在 4.0 m/s 左右，纵向流速仍较大，航道水流条件仍不满足消滩水力指标，见图 8a）。

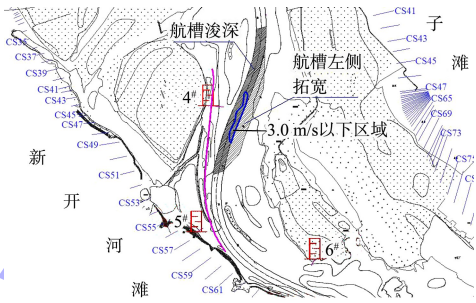
考虑入口段滩性为中枯水滩，建设 2 条丁坝（新 1#和新 3#护滩坝）会缩窄中枯水期河道过水断面，因此，首先考虑去除这 2 条丁坝。新 1#和新 3#丁坝去除后航道表面流速有所缓解，但仍有大部分区域在 3.0~3.5 m/s，个别区域接近 3.7 m/s，仍不满足要求，见图 8b）。



a) 设计方案



b) 修改方案



c) 推荐方案

图 8 新开河滩入口段 3 个方案下航道表面纵向流速 3.0 m/s 和 3.5 m/s 分布

在去除入口段 2 条丁坝基础上进一步分析，80 m 宽的航槽开挖虽增加了航道水深，但也导致水流向河槽集中，因此结合入口段主槽在右、边滩在左的河势特征，选择对右侧滩沿岸进行开挖，拓宽段底高程在航槽底高程以上 0.5 m。优化方案实施后，入口段水面比降进一步降至 2.45‰，仅部分航左线附近航道流速在 3.0 m/s 以上，见图 8c），不超过 3.4 m/s（图 9），航道水流条件得到大幅改善，可满足 1 000 吨级船舶自航上滩水力指标。

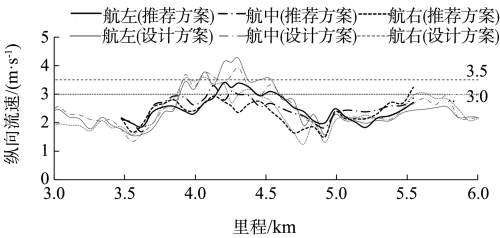


图 9 整治流量 2 250 m³/s 推荐方案后新开河滩入口段水面比降与航道纵向流速变化

通过对新开河滩入口段航道整治方案的研究，对于此类典型的中枯水浅、急滩，在航道整治中应注意以下方面：1) 为避免航槽疏浚后引起水流

归槽、比降与流速增大,疏浚范围除航槽外,另外需要向河中侧边滩扩挖,以增大中枯水过水面积;2)为避免缩窄中枯水期过水断面面积而引起航道水流条件恶化,中枯水浅急滩段应以扩挖航槽为主,避免布设束水丁坝。

5 结论

- 1)岷江新开河滩入口段属于典型的中枯水浅、急滩,滩段平均比降在中水期($2\ 250\ \text{m}^3/\text{s}$)达到最大,约 1.2‰ ,枯水及洪水期比降在 0.8‰ 以下。
- 2)中枯水浅、急滩段航道水流条件在中水期最不利,滩段比降高达 3.72‰ ,而航道流速则在 $3.5\ \text{m/s}$ 左右,难以满足 $1\ 000$ 吨级船舶自航上滩水力指标。
- 3)仅航槽范围内疏浚虽对滩段比降、流速有所改善,但进一步的水流归槽导致航道流速仍偏大,需要向边滩侧扩挖,以增加中枯水过流断面。

参考文献:

[1] 曹民雄,蔡国正,龙杰.石质滩险的滩性分析方法与实例[J].水运工程,2008(12):110-113.

[2] 曹民雄,费德明,李花白,等.石质急流滩航道整治的原则与方法[J].水运工程,2004(11):75-79.

[3] 徐宿东.石质汉流滩航道整治水动力数学模型计算与分析[D].南京:河海大学,2004.

[4] 胡富昌.山区河流卵石滩航道整治技术研究[J].中国水运(理论版),2007(8):6-7.

[5] 周昱瑛,刘信华,黄伟军.山区河流主要特性分析及滩险整治方法初探[J].水运工程,2005(1):50-54.

[6] 祖福兴,李洪英,王平义.山区河流两峡间宽谷河段航道整治研究[J].人民长江,2018,49(16):7-13.

[7] 吕娜.山区弯曲分汊河道演变特征试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2010.

[8] 赵志舟,黄超,余俊华.川江风簸碛滩碍航成因与整治效果分析[J].水运工程,2008(8):112-115.

[9] 杨胜发,高凯春,王平义,等.山区河流泥沙运动规律及复杂滩险航道整治技术研究与应用[R].重庆:重庆交通大学,2013.

[10] 曹民雄.山区河流急流滩险航道整治技术研究[D].南京:南京水利科学研究院,2005.

[11] 黄元贵.山区河流汉流卵石滩整治[J].珠江水运,2007(12):27-29.

[12] 刘旺喜,谭昆,杨祥飞,等.山区河流弯曲分汊浅滩整治技术研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(3):448-451.

[13] 周家俞,徐奎,黄成林.山区河流枢纽库尾河段航道整治模型试验研究[J].水运工程,2018(10):143-147.

[14] 赵志舟,赵世强,许光祥.山区河流滩群河段的碍航特征与整治原则分析[J].水利水运工程学报,2013(2):39-44.

[15] 四川省交通勘察设计研究院有限公司.岷江(龙溪口枢纽—宜宾合江门)航道整治一期工程初步设计[R].成都:四川省交通勘察设计研究院有限公司,2019.

[16] 南京水利科学研究院.岷江(龙溪口枢纽—宜宾合江门)航道整治一期工程新开河滩群物理模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2021.

[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)

(上接第 157 页)

[16] 廖伯文,安瑞冬,李嘉,等.高坝过鱼设施集诱鱼进口水力学条件数值模拟与模型试验研究[J].工程科学与技术,2018,50(5):87-93.

[17] 路莅枫,田红伟.微弯分汊河段枢纽增建鱼道水流条件数值模型试验[J].水运工程,2019(2):101-106.

[18] 文典,李洪泽,王晓刚,等.基于鱼类集群及上溯通道分析的鱼道进口位置论证[J].水利水运工程学报,2021(6):89-96.

[19] LI G N, SUN S K, LIU H T, et al. Optimizing the entrance location for a fish pass facility with limited

attraction flow in a large river—a case study of the Jinsha River, China[J]. Canadian journal of civil engineering, 2019, 46(9):847-857.

[20] 曾燭.嘉陵江干流鱼类群落生态结构分析[J].长江流域资源与环境,2012,21(7):850-857.

[21] 蒋国福,何学福.嘉陵江下游鱼类资源现状调查[J].淡水渔业,2008,38(2):3-7.

[22] 南京水利科学研究院.水利水电工程鱼道设计导则:SL 609—2013[S].北京:中国水利水电出版社,2013.

(本文编辑 武亚庆)