

岷江下游典型滩群碍航特性及整治研究

何熙, 邓涯, 李顺超, 李家世, 贾国珍, 何修伟

Study on the characteristics of navigation-obstructing of typical serial rapids and regulation in the downstream of Minjiang River

HE Xi, DENG Ya, LI Shunchao, LI Jiashi, JIA Guozhen, HE Xiuwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220216001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江宜昌—监利段河床冲淤对宜昌站水沙变化的响应

Response of riverbed evolution of Yichang–Jianli reach of the Yangtze River to water and sediment conditions of Yichang Station

水利水运工程学报. 2020(4): 48 <https://doi.org/10.12170/2019062004>

1958年以来长江口南、北支河段河床演变及影响因素研究

Riverbed evolution and its influencing factors in the South Branch and the North Branch of the Yangtze River estuary since 1958

水利水运工程学报. 2021(2): 27 <https://doi.org/10.12170/20210105003>

黄河上游连续弯曲多滩险河道整治方案数值分析

Numerical analysis of regulation schemes of continuous bending and multi-beach dangerous channels in the upper Yellow River

水利水运工程学报. 2020(2): 9 <https://doi.org/10.12170/20190901001>

感潮河段航道整治设计理论与方法探讨

Study on design theory and method of waterway regulation in tidal river

水利水运工程学报. 2019(6): 86 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.010>

新水沙条件与整治工程下和畅洲汊道演变分析

Riverbed evolution characteristics in the Hechangzhou braided reach under new flow–sediment conditions and waterway regulations

水利水运工程学报. 2021(5): 19 <https://doi.org/10.12170/20210208004>

五里亭船闸下游引航道综合整治

Comprehensive regulation of navigation conditions of lower approach channel of Wuliting navigation lock

水利水运工程学报. 2017(4): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnk.1009-640X.2017.04.001>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220216001

何熙, 邓涯, 李顺超, 等. 岷江下游典型滩群碍航特性及整治研究 [J]. 水利水运工程学报, 2023(4): 62-70. (HE Xi, DENG Ya, LI Shunchao, et al. Study on the characteristics of navigation-obstructing of typical serial rapids and regulation in the downstream of Minjiang River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(4): 62-70. (in Chinese))

岷江下游典型滩群碍航特性及整治研究

何 熙¹, 邓 涯^{2,3}, 李顺超¹, 李家世¹, 贾国珍¹, 何修伟⁴

(1. 四川省交通勘察设计院有限公司, 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: 山区河流出峡谷进入丘陵地带, 河段滩槽交错、多滩并存、上下联动、滩性复杂, 一直是我国西南地区航运开发的重点难题。山区河流碍航滩群治理思路和原则尚不明确, 以岷江下游新开河滩群为例, 分析复杂滩群的碍航特性、水沙特征和河床演变规律, 并结合物理模型和平面二维水沙数学模型对整治方案进行计算分析与优化研究。研究表明: 对于滩群自上而下“急、弯、险、浅”的问题, 要各施其策, 对于下“浅”问题, 需采用整、疏相结合的手段, 依托整治建筑物增强浅段水沙动力; 对于中“弯、险”问题, 需采用整治建筑物调整水流流路, 改善水流流态; 对于上“急”问题, 应重点拓宽航槽以减缓流速。同时在避免下游滩险整治措施对上游滩险的“急、险”有所恶化的基础上, 还需综合协调整个滩群的输沙平衡。研究结果可丰富山区河流复杂滩群整治技术, 也可为其他滩群治理提供借鉴。

关键词: 山区河流; 航道工程; 水沙条件; 滩群治理

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)04-0062-09

山区河流航道在我国西南地区的综合交通运输体系中占据重要地位, 其货运量、能耗、运输能力相比公路运输有着明显优势。但由于其河道蜿蜒曲折、滩槽交错, 极易形成“多滩并存、上下联动”的复杂碍航滩群段, 增加了山区河流航道的治理难度。目前对滩险治理的研究多着眼于单滩^[1-3], 基本通过实测水文、地形资料对碍航滩险的河床演变规律及趋势和滩性特征进行分析, 进而提出整治方案, 但对多个联动性较强滩群治理思路的研究较少。赵志舟等^[4]依托金沙江、澜沧江及乌江河段滩群的治理经验提出, 在滩群治理时应考虑组成滩群各滩点的碍航特征, 同时应顺应整体河势, 注意滩点之间的相互影响和输沙平衡; 王国富等^[5]依托乌江白涛河段复杂滩群, 结合实测资料及数学模型对其近期河床演变进行了分析; 胡小庆^[6]依托金沙江大雪滩群, 结合实测资料和河工物理模型试验结果对各滩点的河床演变与碍航特征进行分析, 提出各滩点的整治措施。

岷江下游属于典型的山区河流, 河道平均比降达 0.8‰, 整个河段呈现单一河段与汉流河段相间的态势, 部分河段受无序采石挖沙影响, 航道条件严重恶化, 且原有整治建筑物遭到不同程度水毁, 航槽淤积, 流态变差。该河段涉及滩险 21 处, 包含一般性浅滩、汉流浅滩、急流滩及河口滩, 滩险特点各异。本文依托该段航道中新开河滩群, 结合实测资料、河工物理模型试验及水沙数学模型对山区河流“急、弯、险、浅”问题进行综合治理方案研究。

收稿日期: 2022-08-29

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

作者简介: 何 熙 (1989—), 男, 四川巴中人, 工程师, 主要从事内河港口与航道工程设计与研究工作。

E-mail: 1013627904@qq.com

1 滩险概况与碍航机理

新开河滩群为岷江上著名的“急、弯、险、浅”复合型滩险,滩群由两个反向河湾组成,其中上段横梁子滩较为顺直,滩槽形态较为稳定;至新开河滩河道放宽,左岸为巨大碛坝,碛坝高程达设计水位以上7 m,碛翅深入江中,形成暗碛挤压河床,致右岸航道弯曲,设计水位下航槽范围内水深通常在1.2~2.0 m。滩口段坡陡流急,滩中下段向右岸深槽落弯,船舶行至此处有扫尾风险,同时受左岸暗碛影响,枯水期伴有滑梁水,滩尾右岸岩脚处泡漩水肆意;背时滩为上下两个河湾的过渡段,右岸马鞭坝受洪水期水流顶冲,头部崩退形成冲坑,左岸受碛坝尾部凸咀刺入江心形成挑流;令牌石滩为该滩群最下游滩险,两岸边滩形态较好,仅在该滩中段右岸扩宽段航槽内存在出浅。滩群河势见图1。新开河滩群经多次维护整治都未取得明显改善,一般在维护后的一段时间,整治建筑物遭遇水毁,航道条件再次恶化。

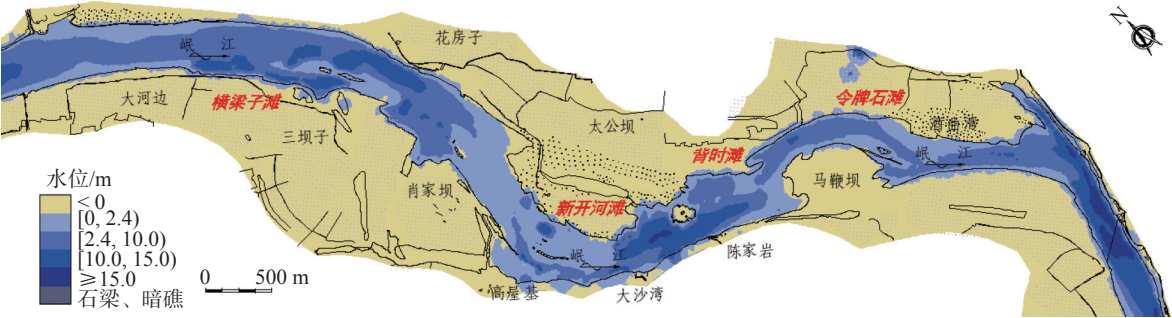


图1 新开河滩群河势图

Fig. 1 River situation in Xinkaihe serial rapids

1.1 滩性分析

为掌握各滩险的滩性,分析了各滩险平均水面比降随流量变化规律(图2),了解其成滩和消滩水位^[7-8]。除新开河上段为中枯水急流滩,其余滩险均为枯水急流滩。同时当来流 $Q \geq 5\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水流开始上滩,随着水位进一步抬升,滩险平均水面比降变化率明显减缓直至消滩。

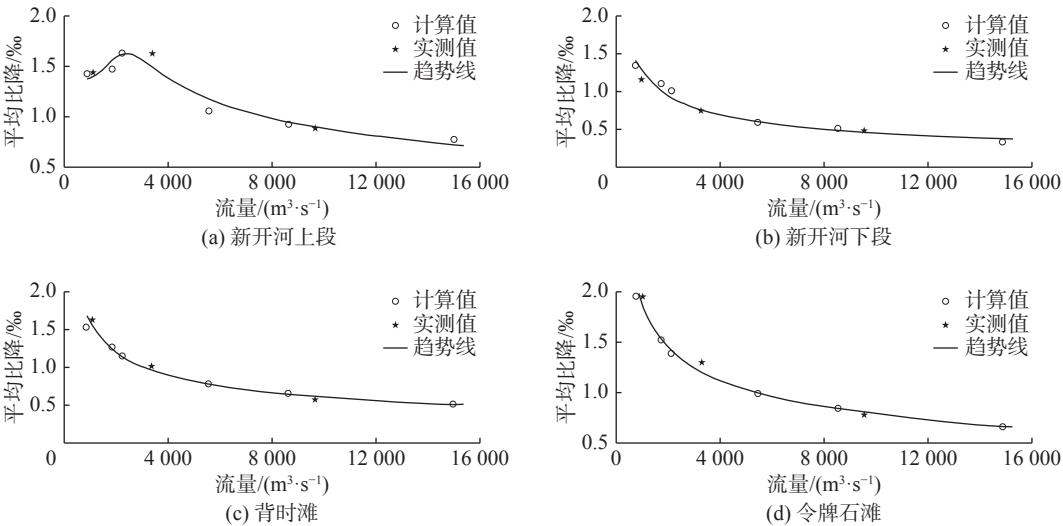


图2 新开河滩、背时滩及令牌石滩平均水面比降随流量变化的关系

Fig. 2 Variation of the average water surface gradient with dscharge of Xinkaihe rapid, Beishi rapid and Lingpaishi rapid

1.2 水沙特征

岷江下游洪水一般发生在每年 6—9 月,此时含沙量也相对较大,枯水期一般为每年 11 月至次年 4 月,此时输沙量也相对较小。根据高场水文站 2006—2020 年共计 15 年实测资料统计,多年平均流量为 2 582 m³/s,最大日均流量为 31 000 m³/s,多年年均径流量均方差 $\sigma=410$ m³/s。2006—2020 年高场站多年悬移质平均含沙量 0.284 kg/m³,多年平均悬移质输沙量 0.232 亿 t,多年悬移质年均输沙量均方差 $\sigma=0.148$ 亿 t。岷江推移质主要产于上游大渡河,且具有粒径大、年内集中、年际变化大的特点,岷江流域以大渡河为主要产沙区。图 3 为高场站各年径流量、悬移质输沙率与多年均值的偏差分布,按 1 倍均方差以内为中水中沙年进行分析,可得各年的水沙特征情况。在综合考虑 2010—2020 年时段内泥沙输移量、沙水比、洪峰峰值及出现时段基础上,模型选取小水小沙(2015 年)、中水中沙(2010 年)及大水大沙(2020 年)3 组典型水文年为代表工况,其中卵石推移质输沙率按悬推比 3% 考虑^[9]。

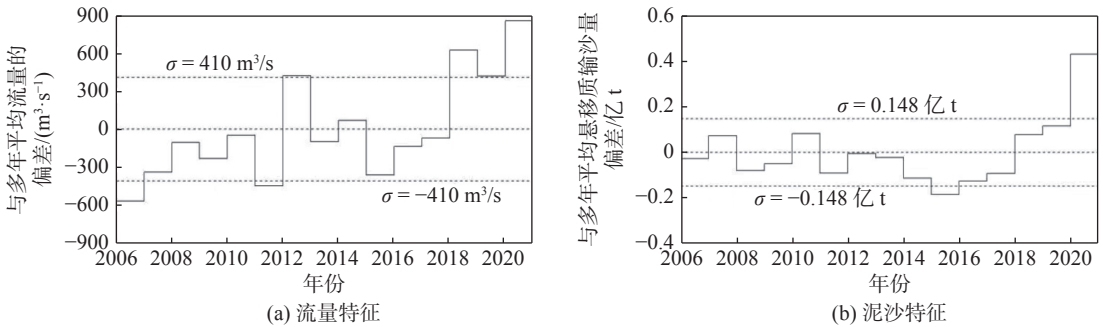


图 3 高场站各年水文泥沙特征

Fig. 3 Hydrographic and sediment characteristics of Gaochang hydrologic station

1.3 河床演变规律

图 4 为新开河滩群 2010—2017 年及 2017—2021 年年际冲淤变化。2010—2017 年河道受人为因素影响明显,在横梁子滩右岸边滩滩唇、新开河滩滩口、碛翅及碛尾处受采砂影响,河床下切明显。枯水河槽内主要在新开河滩中部、背时滩凸咀位置及令牌石滩滩口处航槽内存在一定淤积。2017—2021 年河道采砂活动基本禁止,河床基本为自然演变,特别是经历 2020 年岷江特大洪水后,原采砂坑发生明显淤积。在新开河滩左岸碛坝处有冲有淤,碛尾冲刷明显,部分泥沙被携带至背时滩航槽内,导致该滩中段有明显回淤。背时滩至令牌石段,右岸马鞭坝受中洪水顶冲呈崩退趋势,碛首泥沙一部分被携带至碛尾淤积,另一部分被携带至令牌石滩航槽内。

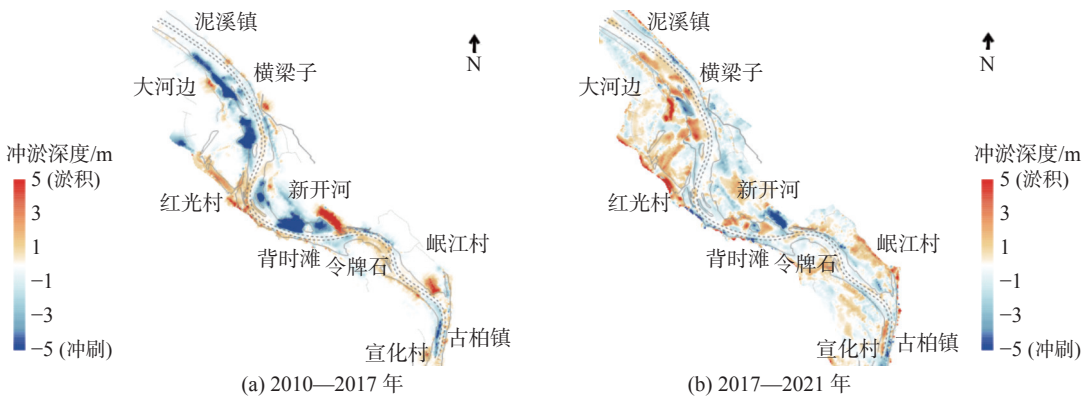


图 4 新开河滩群 2010—2017 年及 2017—2021 年冲淤变化

Fig. 4 Erosion and deposition changes in Xinkaihe during 2010-2017 and 2017-2021

1.4 碍航缘由

岷江新开河滩群主要表现为新开河滩滩口流急, 滩中下段航槽落弯, 泡水及滑梁水肆意; 背时滩至令牌石滩段航道弯曲且水深较浅, 同时背时滩左岸碛尾深入江中与右岸马鞭坝对峙, 流态紊乱; 令牌石滩两岸均为冲积台地, 中洪水水流取直后将右岸开阔而低矮的马鞭坝滩面卵石带至下游航槽内。整个滩群自上而下形成“急、弯、险、浅”的碍航特征。

1987 年岷江扩建工程时, 在新开河滩进口修建 3 座丁坝, 并延长右岸顺坝, 但该滩下段弯、险问题并未消除; 2002 年再次对该滩群实施整治, 基本理顺了航槽, 并对该滩右岸顺坝实施加固, 之后左岸碛坝发育, 碛嘴深入河心与右岸岩壁对峙。1996 年背时滩至令牌石滩整治工程中, 在令牌石滩右岸修筑顺坝 1 座; 2000 年为限制左岸退缩, 修筑 2 座短丁坝。上述整治措施仅针对单滩碍航问题提出整治方案, 并未从根本上消除新开河滩群的碍航问题, 且经自然演变后整治建筑物基本水毁, 航槽碍航问题仍然突出。

2 平面二维水沙数学模型

在 2017 年 4 月实测 1 : 2 000 河床地形基础上, 建立岷江下游新开河滩群平面二维水沙数学模型。模型上起泥溪镇, 下至古柏固定水尺, 全长约 10 km。计算网格采用三角形网格和四边形网格的混合网格, 最小网格尺度为 4 m, 最大网格尺度为 30 m, 工程区内网格进行适当加密处理。

利用实测枯水流量 $Q=1\ 101\ \text{m}^3/\text{s}$, 中水流量 $Q=3\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$ 以及洪水流量 $Q=9\ 680\ \text{m}^3/\text{s}$ 三组工况条件下沿程 8 个水位测点以及两个测流断面分别开展模型的水位验证(图 5)以及断面流速分布验证(图 6)。验证结果表明水位、断面流速分布精度均符合《水运工程模拟试验技术规范》(JTJ/T 231—2021)的要求。

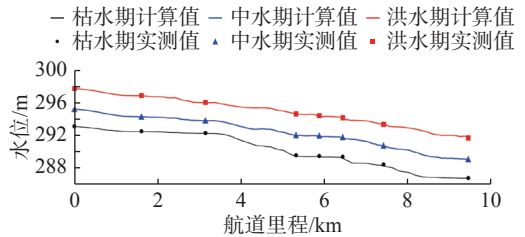


图 5 水位验证

Fig. 5 Water level verification

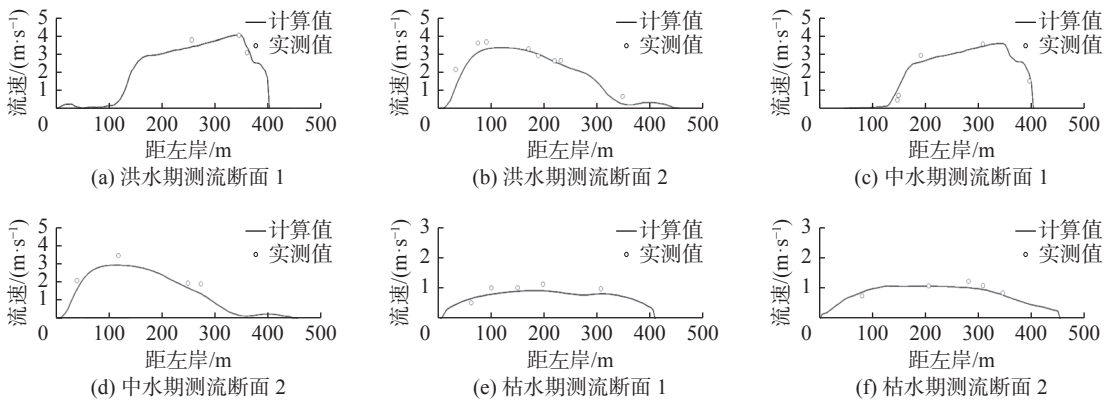


图 6 流速验证

Fig. 6 Measured flow velocity in verification

岷江下游河段河床变形主要集中在涨、落水两个特征时期, 依托 2017 年洪中枯 3 次地形测量结果开展冲淤量验证, 2017 年 4—7 月底为一个涨落水期, 8—11 月为另一个涨落水期。

模型采用 2017 年 4 月实测地形为起始地形, 每天为 1 个计算时段, 起止时间为 2017-04-01—2017-07-15; 然后以 2017 年 7 月的实测地形为起始地形, 每天为 1 个计算时段, 起止时间为 2017-07-15—2017-09-

04;并分别对两个时段主槽内冲淤量的实测值与计算值进行对比。统计结果显示,2017 年 4—7 月主槽内实测淤积量为 0.22 万 m³,计算值为 0.19 万 m³,偏差 17.33%;2017 年 7—9 月主槽内实测淤积量为 0.16 万 m³,计算值为 0.14 万 m³,偏差 13.78%。冲淤沿程分布趋势总体一致,说明沿程冲淤规律基本相同,2 个时段的冲淤量实测值和计算值也较接近,偏差在±20% 以内,符合《水运工程模拟试验技术规范》(JTJ/T 231—2021)的要求。

3 整治方案研究

针对新开河滩群碍航成因、滩点关联性、滩性特征及河段水沙动力条件,可将新开河滩群自上而下归纳为两个具有明显特征的航段,即:横梁子至背时滩段表现为“急-弯-险”特征,背时滩至令牌石滩段表现为“弯-弯-浅”特征。结合该滩群历史整治方案,在分析治理经验基础上,采用疏浚和整治相结合的手段,一方面依靠疏浚等措施增深航槽,同时对大流速陡比降区域实施航道拓宽;另一方面采用整治建筑物调顺水流流路,消除不良流态,同时增强浅段水沙动力,维持挖槽区稳定。

岷江下游龙溪口枢纽至宜宾合江门河段按照内河Ⅲ-(3)级航道标准进行整治,航道尺度为 2.4 m×60 m×500 m(水深×直线段宽度×弯曲半径),设计代表船型为 1 000 t 级机动驳及 2×1 000 t 级分节驳,设计最小通航流量为 900 m³/s,上水通航标准:水面比降 0.5‰、1‰、2‰、3‰、4‰时对应的流速分别为 3.9、3.8、3.5、3.2、3.0 m/s^[10]。

3.1 整治方案

基于以上整治思路和原则,提出两套方案。方案 1 为老槽方案,即依托现有深槽规划航线(图 7)。该方案在新开河滩滩口左岸布置 2 座丁坝,引导水流进入规划航槽;对新开河滩中下段原水毁顺坝实施修复;在背时滩右岸马鞭坝碛首修筑 1 座顺坝以导顺水流,并防止马鞭坝头部受水流顶冲后继续崩退,在该滩凹岸处布置 1 处护滩工程,防止弯道环流淘刷左岸边滩;修复令牌石右岸原有顺坝;按设计水位以下 2.8 m 浚深规划航槽内的浅区,同时切除新开河滩及背时滩航槽外凸咀和碍航浅点。

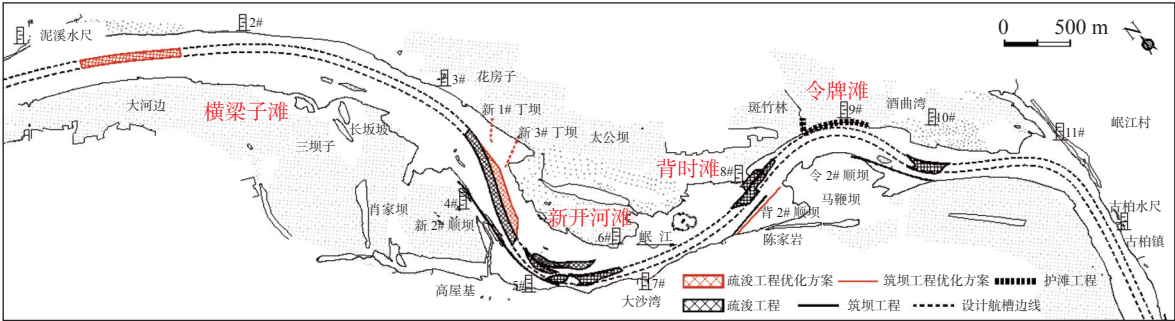


图 7 新开河滩群方案 1 及方案优化示意

Fig. 7 Regulation scheme 1 and optimization scheme of Xinkaihe serial rapids

方案 2 为新开槽方案(图 8),即在新开河滩左岸碛坝处开辟 1 条新航槽,并在碛坝碛首布置 2 座丁坝及 1 座丁顺坝用以引导水流进入新开槽;在背时滩右岸马鞭坝碛首布置 1 座勾头丁坝调整水流过渡至背时滩,并在该滩凹岸处布置 1 处护滩工程,保护左岸边滩;修复令牌石右岸原有顺坝;按设计水位以下 2.8 m 浚深规划航槽内的浅区。

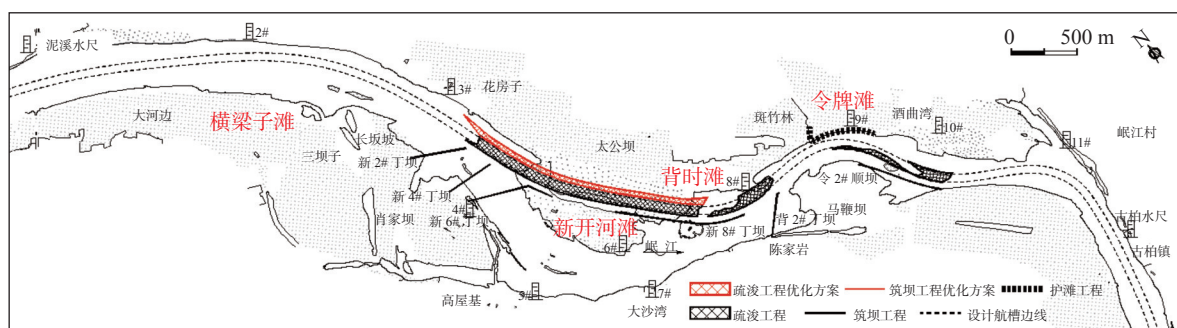


图 8 新开河滩群方案 2 及方案优化示意

Fig. 8 Regulation scheme 2 and optimization scheme of Xinkaihe serial rapids

物模^[10]和数模对比分析发现,方案2实施后总体效果欠佳,新开槽槽口局部水面比降达到6.1‰,槽内流速在整治流量下基本达到4.0 m/s,且随流量增加,流速呈增加趋势,同时新开槽还存在稳定性问题。因此,在方案1上进行优化。

3.2 急-弯-险滩群

横梁子至背时滩航段方案 1 实施后,新开河滩右岸长顺坝效果明显,其水流流路与航槽曲率基本一致,消除了滩下口的滑梁水,基本解决了弯和险的问题,但新开河滩滩口的流急问题仍存在。在整治流量 $Q=2\,250\text{ m}^3/\text{s}$ 时最大流速、比降组合达 $3.72\text{ m/s}\times 3.02\text{‰}$,超过船舶上滩限值。在背时滩卡口段亦存在流速接近 3.5 m/s ,比降达 2.26‰ 的区域。针对上述问题,对背时滩右岸顺坝向岸侧移动 40 m ,大流速区基本消除。针对新开河滩滩口流急的问题,对急流段航槽实施拓宽,同时取消进口处 2 座丁坝。由于背时滩右岸顺坝向岸侧移动后,上游水位进一步降低,且传递至新开河滩,导致滩口流急问题进一步加剧,因此在多次对新开河滩疏浚区及拓宽段开挖底高程和范围进行优化调整后,上段流急的问题得到解决。但优化方案实施后,水位降落传递至泥溪水尺处,致使该处航深不足,故在此处增加 1 处疏浚。新开河滩滩口段物模结果^[1]流速为 $3.20\sim 3.50\text{ m/s}$,最大比降为 2.41‰ ,数模结果流速为 $2.86\sim 3.35\text{ m/s}$,最大比降为 1.86‰ ;背时滩物模结果流速为 $2.80\sim 3.02\text{ m/s}$,数模结果流速为 $2.41\sim 3.00\text{ m/s}$,物模与数模结果基本一致。随着流量进一步增加,新开河滩群基本消滩,船舶可依托水深适宜的缓流区上行。

在定床阶段的优化方案上,开展了小水小沙、中水小沙及大水大沙等3组典型水文年的水沙数学模型研究。整体表现为:整个滩群的原有采砂坑均有明显淤积,新开河滩挖槽区总体稳定性较好,但在新开河滩滩尾至背时滩段淤积较为明显,在中水小沙及大水大沙年2.4 m等深线不连续。为进一步研究淤积原因,开展了汛期5 570、8 650及15 000 m³/s共3组流量下的定床输沙试验(图9)。3组工况下输沙路线差异较小,本文以 $Q=8\,650\text{ m}^3/\text{s}$ 工况下新开河滩群定床输沙路线为例,对比该级流量下输沙路线和水流流路。由于背时滩为上下两个河湾的过渡段,表现为输沙路线和汛期水流流路存在较大交角(图10),即在退水过程中只能依靠中枯水以下流量冲槽,因此相对而言冲刷历时缩短,泥沙淤积明显。

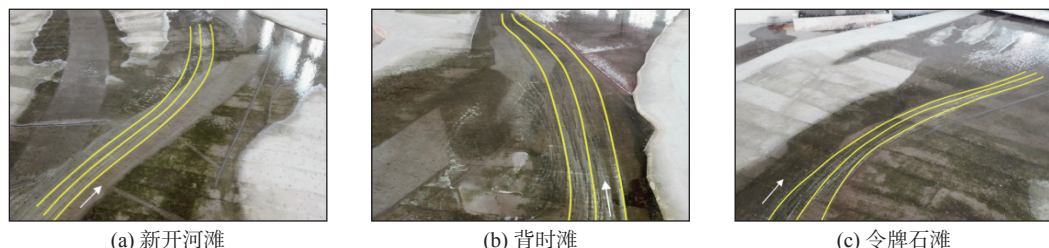
图 9 新开河滩群优化方案定床输沙路线($Q=8\,650\text{ m}^3/\text{s}$)

Fig. 9 Fixed bed sediment transport of Xinkaihe serial rapids ($Q=8\ 650\text{ m}^3/\text{s}$)

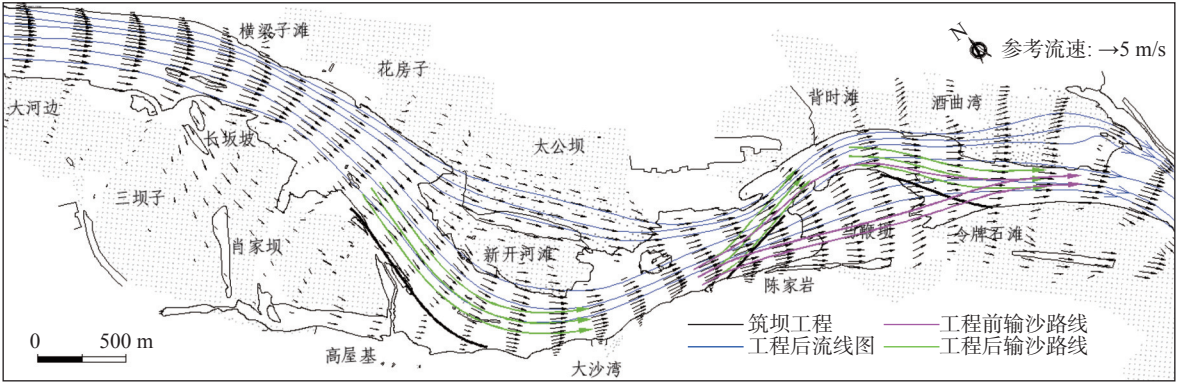


图 10 新开河滩群工程前后定床输沙路线及优化方案流场($Q=8\,650\text{ m}^3/\text{s}$)

Fig. 10 Fixed bed sediment transport and flow field after the regulation project of Xinkaihe serial rapids ($Q=8\,650\text{ m}^3/\text{s}$)

3.3 弯-弯-浅滩群

背时滩至令牌石滩航段方案 1 实施后,该段通航水流条件改善明显,但从航道内泥沙冲淤变化情况来看,在中水中沙及大水大沙年令牌石滩均存在约 100 m 范围内 2.4 m 等深线断开的情形,但相对天然情况下改善明显。一方面其右岸坝坝修建后浅段水沙动力增强,另一方面顺坝对马鞭坝滩面输移至航槽内的泥沙起到拦截作用。优化方案中调整了航线以避免该段淤积带,依托左侧冲刷带布置航线,减小航道日常维护工作(图 11)。

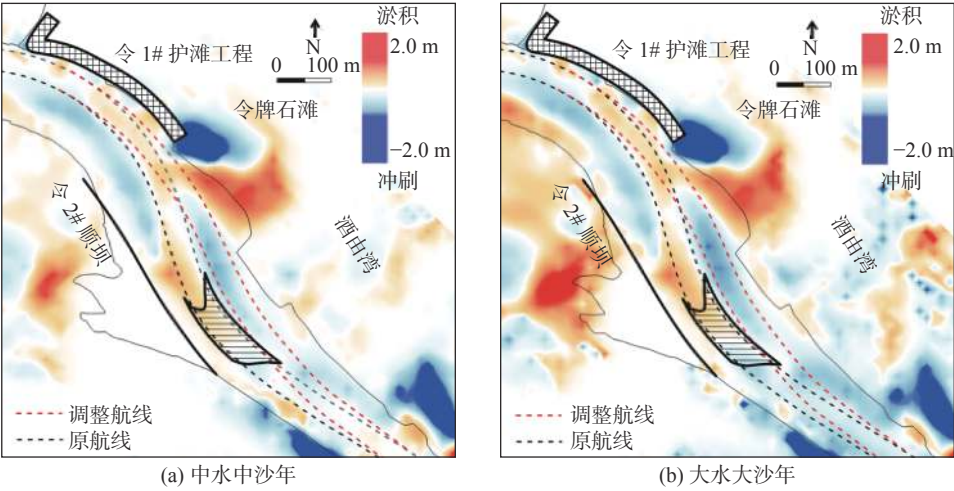


图 11 令牌石滩航线调整示意

Fig. 11 Chart of route adjustment of Lingpaishi rapid

3.4 输沙率分析

对于山区河流复杂滩群的治理,一般需保证下游浅滩的输沙能力略大于上游浅滩^[12]。本文采用沙莫夫推移质输沙率公式^[13]并结合物模和数模资料计算整治流量下各段的推移质输沙率 g_b 。

$$g_b = 0.95 \sqrt{d}(U - U'_c)(U/U'_c)^3(d/h)^{1/4} \tag{1}$$

$$U'_c = 3.83d^{1/3}h^{1/6} \tag{2}$$

式中: U 为水流平均流速(m/s); U'_c 为泥沙止动流速(m/s); d 为泥沙中值粒径(m); h 为水深(m)。

优化方案实施后,新开河滩疏浚区上段推移质输沙率 $0.104\,5\text{ kg/s}$,下段推移质输沙率 $0.106\,3\text{ kg/s}$;背时滩疏浚区推移质输沙率 $0.109\,5\text{ kg/s}$;令牌石疏浚区推移质输沙率 $0.236\,4\text{ kg/s}$ 。计算结果表明滩群下游浅滩

输沙率基本大于上游浅滩输沙率,但背时滩段推移质输沙率与上游浅滩输沙率较为接近,且该段冲槽历时较短,更易发生淤积,这也与水沙数学模型计算的趋势较为一致。

4 结 语

山区河流“急、弯、险、浅”复杂滩群往往是该段航道的控制性工程,整治思路及原则上既要掌握组成该滩群的各滩险自身滩性特点、河床演变的关联性,又要统筹协调好滩群之间水沙动力特性。对于自上而下“急、弯、险、浅”的滩群治理,需遵循自下而上且有针对性的治理原则。对于下“浅”的问题,需采用整、疏相结合的手段,重点放在整治建筑物的位置及相关整治参数上;对于中“弯、险”的问题,需选择控制性节点并依托主导河岸采用整治建筑物调整水流流路,改善水流流态;对于上“急”问题,应重点拓宽航槽,增大过流面积,减缓流速,但同时需避免下游滩险的整治措施对上游的“急、险”有所恶化。此外,在综合考虑整个滩群输沙平衡的基础上,一般需保证下游滩险的输沙能力略大于上游滩险。

参 考 文 献:

- [1] 杨祥飞. 长江上游铜鼓滩治理措施研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(1): 133-137. (YANG Xiangfei. Regulation measures of Tonggu beach at upstream of Yangtze River[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, 29(1): 133-137. (in Chinese))
- [2] 陆永军, 谢凌峰, 王义安. 二维泥沙数学模型在北江下游航道整治工程中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2001(2): 16-20. (LU Yongjun, XIE Lingfeng, WANG Yian. Application of 2-D sediment mathematical model in training the lower-reaches channel in downstream of Beijiang River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2001(2): 16-20. (in Chinese))
- [3] 赵志舟, 周华君. 长江神背嘴滩险成因分析与整治技术[J]. 水利水运工程学报, 2008(3): 58-63. (ZHAO Zhizhou, ZHOU Huajun. Regulation measures and effect analysis for the Shenbeizui shoal in the Yangtze River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(3): 58-63. (in Chinese))
- [4] 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. (ZHAO Zhizhou, ZHAO Shiqiang, XU Guangxiang. Analysis of navigation hindering characteristics and regulation principle of shoal group reaches of mountain rivers[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(2): 39-44. (in Chinese))
- [5] 王国富, 程昌华, 赵健. 乌江白涛河段复杂滩群河床演变分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(5): 1009-1012. (WANG Guofu, CHENG Changhua, ZHAO Jian. Analysis of riverbed evolution of the Baitao section of Wujiang River[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(5): 1009-1012. (in Chinese))
- [6] 胡小庆. 金沙江大雪滩群河床演变与滩险碍航特性[J]. 水利水运工程学报, 2011(2): 39-47. (HU Xiaoqing. River channel process and navigation hindering property of the Daxuetan shoals in Jinsha River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(2): 39-47. (in Chinese))
- [7] 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. (CAO Minxiong. Study on the regulation of waterway with rapids in mountainous rivers[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2005. (in Chinese))
- [8] 曹民雄, 陆宏健, 蔡国正, 等. 红水河十五滩滩性分析[J]. 水利水运工程学报, 2005(3): 41-45. (CAO Minxiong, LU Hongjian, CAI Guozheng, et al. Beach characteristics analysis of Shiwutan in Hongshui River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2005(3): 41-45. (in Chinese))
- [9] 四川省交通勘察设计研究院有限公司. 岷江(龙溪口枢纽至宜宾合江门)航道整治一期工程[R]. 成都: 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 2019. (Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd. Minjiang River (Longxikou navigation-power junction to Yibin Hejiangmen) channel phase I regulation works engineering[R]. Chengdu: Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., 2019. (in Chinese))
- [10] 何熙, 张有林, 李顺超, 等. 岷江下游霸王滩滩险整治技术[J]. 水运工程, 2020(7): 168-174. (HE Xi, ZHANG Youlin, LI

Shunchao, et al. Regulation technique on Bawang rapids in downstream of Minjiang River[J]. Port & Waterway Engineering, 2020(7): 168-174. (in Chinese))

- [11] 南京水利科学研究所. 岷江(龙溪口枢纽至宜宾合江门)航道整治一期工程新开河滩群物理模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2021. (Nanjing Hydraulic Research Institute. Experimental study on physical model of Xinkaihe serial rapids of Minjing River (Longxikou navigation-power junction to Yibin Hejiangmen) channel phase I regulation works engineering[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2021. (in Chinese))
- [12] 倪志辉, 郭毅, 吴立春. 八字脑滩群航道整治数学模型计算与分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 70-74, 99. (NI Zhihui, GUO Yi, WU Lichun. Numerical model of channel regulation for Bazinao shoal group[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35(2): 70-74, 99. (in Chinese))
- [13] 张小峰. 河流动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (ZHANG Xiaofeng. River dynamics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010. (in Chinese))

Study on the characteristics of navigation-obstructing of typical serial rapids and regulation in the downstream of Minjiang River

HE Xi¹, DENG Ya^{2,3}, LI Shunchao¹, LI Jiashi¹, JIA Guozhen¹, HE Xiuwei⁴

(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, Ministry of Transport of PRC, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Sichuan Minjiang Port & Shipping & Electricity Power Development Co., Ltd., Leshan 614000, China)

Abstract: Some sections of mountain rivers have interlocking rapids and troughs, and multiple beaches coexist, and influence each other in various complicated ways, which have been the key problems of navigation development in southwest China. To address the problem of unclear ideas and principles for the management of serial rapids in mountain rivers, we analyze the navigation-obstructing characteristics, water and sediment conditions, and evolution of river bed of serial rapids based on the Xinkaihe serial rapids in the lower reaches of the Minjiang River. In addition, calculation analysis and optimization research are carried out by combining the physical model and the two-dimensional flow and sediment mathematical model. The results of the study show that for the problems of “sharp, curved, dangerous and shallow rapids” from upstream to downstream, the regulation scheme should be targeted for each rapid. Firstly, for the problems of “shallow” in the downstream, a combination of “dredging and remediation” should be used to enhance the water-sand dynamics of the shallow section. Secondly, for the problem of “curved and dangerous”, regulating structures should be used to adjust the flow path and improve the flow pattern. Finally, for the problem of “sharp” in the upstream, the focus should be placed on widening the channel and slowing down the flow speed. At the same time, on the basis of avoiding the remediation measures downstream from worsening the “rapid and dangerous” of the upstream rapid, it is also necessary to comprehensively coordinate the sand transport balance of the whole serial rapids. The research results of this paper can enrich the regulation technology of complex serial rapids in mountain rivers, and can also provide a reference for other serial rapids management in China.

Key words: mountainous river; channel engineering; water and sediment condition; serial rapids regulation