

平陆运河与旧州江交汇河段 治理方案试验研究*

喻涛¹, 李进¹, 何俊辉², 韩林峰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. 平陆运河集团有限公司, 广西南宁 530200)

摘要: 平陆运河旧州江交汇段兼具大入汇角、大汇流比和较大落差等典型特征, 支流突发洪水时易导致流态紊乱和横向流速超标, 严重威胁通航安全。采用 1:50 比例物理模型系统开展试验, 设置设计方案及 3 个优化方案, 分析水流速度分布、横向流速、泥沙淤积分布及水面波动。结果表明, 设计方案最大横向流速达 0.49 m/s, 明显超出规范限值; 优化方案 I 虽降低至 0.44 m/s, 但仍存在超标区; 优化方案 II 能有效控制横向流速, 但缓坡区泥沙淤积严重; 优化方案 III 在确保横向流速满足规范的同时, 使泥沙集中沉积于沉砂池内, 并营造了更多的适宜鱼类栖息的缓流区。多级消力池与陡坡联合布置可兼顾通航安全、泥沙管理与生态保护, 提出的“通航-泥沙-生态”协同治理思路可为类似山区交汇河段治理方案提供参考。

关键词: 平陆运河; 旧州江; 消力池; 陡坡; 交汇河段; 治理方案

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0176-09

Experiment study on regulation scheme for confluence reach of Pinglu Canal and Jiuzhou River

YU Tao¹, LI Jin¹, HE Junhui², HAN Linfeng¹

(1. National Research Center for Inland Waterway Regulation Engineering Technology,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Pinglu Canal Group Co., Ltd., Nanning 530200, China)

Abstract: The confluence reach of the Jiuzhou River and the Pinglu Canal is characterized by a large confluence angle, a high discharge ratio, and a considerable elevation drop. During sudden tributary floods, these conditions readily induce flow disturbances and excessive transverse velocities, posing a serious threat to navigation safety. A 1:50 scale physical model is built to conduct systematic experiments. One baseline design scheme and three optimized alternatives are developed to analyze flow velocity distribution, transverse velocity, sediment deposition patterns, and water surface fluctuations. The results indicate that the maximum transverse velocity in the baseline design reaches 0.49 m/s, significantly exceeding the regulatory limit. Although optimization scheme I reduces the velocity to 0.44 m/s, some non-compliant zones remain. Optimization scheme II effectively controls transverse velocity but causes severe sediment accumulation in the gentle-slope zone. In contrast, optimization scheme III not only ensures compliance with transverse velocity standards but also directs sediment deposition into the settling basin while creating additional low-flow zones suitable for fish habitats. The combined arrangement of multi-stage energy dissipation basins and steep slopes can simultaneously safeguard navigation safety, manage sediment, and support ecological protection. The proposed “navigation-sediment-ecology” integrated management approach offers a practical reference for similar regulation scheme for mountainous confluence reaches.

Keywords: Pinglu Canal; Jiuzhou River; energy dissipation pool; steep slope; confluence reach; regulation scheme

收稿日期: 2025-08-22 录用日期: 2025-09-22

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604700); 广西科技重大专项(桂科 AA23023009)

作者简介: 喻涛(1982—), 男, 博士, 教授, 研究方向为航道与通航安全。

在干支流交汇处,水流能量叠加往往导致紊动增强和强烈混合,进而威胁航道安全^[1]。旧州江与平陆运河交汇口兼具大入汇角、大汇流比和较大落差3种典型特征:约45°的入汇角易引发横向冲击与紊动;汇流比达1.6,支流流量占优,加剧干支流相互作用;10.3 m的高差则促使高速水流与水跃产生。多重因素共同作用,使得该区水流结构复杂、紊动强烈、流态突变并伴随集中冲刷,不利于通航安全。因此,有必要对旧州江支流汇入口河段开展整治方案研究,以改善通航水流条件,保障船舶安全航行。

针对不同支流汇入方式下的汇流河段水流特性,已有大量的国内外试验研究,为本文的研究思路与方法提供了借鉴。张艳艳等^[2]通过设置交错导流墩分散水流消能;梁浩然等^[3]通过下移衔接段、设置导水挡墙和扩宽河道改善通航条件;毛森浩等^[4]建议在汇流口布置分流墩并疏浚形成消力池,以减少水流动能;周家俞等^[5]提出在支流沟内布置导流坝和消力池改善流态;张辉等^[6-7]通过调整汇流角度和设置跌水工程优化流速;符蔚等^[8]通过加长导航墙、修建丁坝和开挖航槽改善通航状况;吴文凤等^[9]则通过优化消力池形式和设置隔流墙改善山区低水头区流动条件;史修府等^[10]通过加深消力池深度改善转弯段水力状况;周凯等^[11-12]提出趾墩与悬栅联合消能技术;闫勇等^[13]通过水工模型试验提出新的消力池设计;李世城等^[14]指出增加消力池尾坎坡度可提高消能效率;胡亮亮等^[15]提出设置透空隔流堤改善横流和回流;王飞等^[16]等提出疏浚河道和调整通航墙布局;Zaffar等^[17-18]通过改善消力池性能增强消能效果。

现有研究主要集中于单一消能技术的应用,但在具有大入汇角、大汇流比和较大落差等典型特征的交汇河段,单一消能措施的治理效果有限,因此旧州江交汇河段亟需采用多种消能措施的组合方案。旧州江属于典型的山区河流,上游洪水

期来沙量大,易在干支流交汇口淤积,影响通航效率。因此,在设计消能措施时,应充分考虑泥沙淤积的影响,尽量减少淤积以保障运河通航。此外,支流口生态环境也是重要因素,整治措施应尽量减小对河道生态的负面影响,甚至在条件允许的情况下改善河流生态功能。

基于以上背景,本文通过1:50比例河流模型试验,提出结合多级消力池与陡坡消能的优化方案,旨在改善干支流交汇区水流结构、降低流态紊动、保障航道通航安全,同时兼顾泥沙管理和生态保护。本文研究成果为类似复杂汇流河段的航道整治提供了参考,并具有一定的创新价值。

1 工程概况

1.1 平陆运河及旧州江概况

平陆运河的起点位于南宁横州市平塘江口,经过沙坪河、钦江及其支流旧州江^[19],最终流入北部湾的钦州港,全长约140 km。平陆运河流域涵盖沙坪河、钦江流域和旧州江。平陆运河、沙坪河流域和沙坪河流域的关系见图1^[20]。

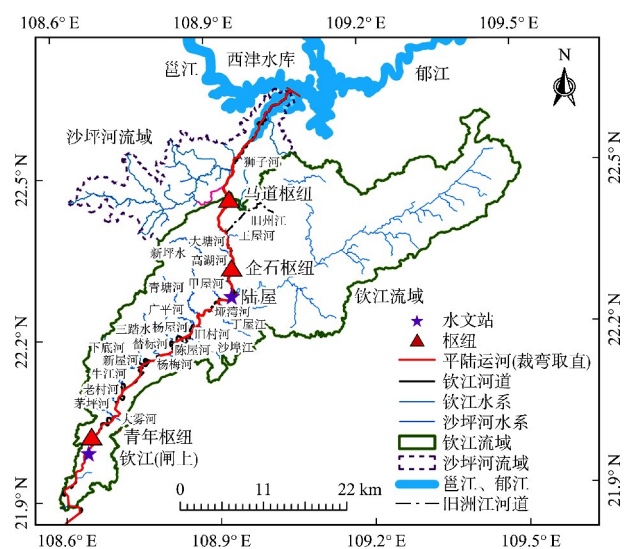


图1 平陆运河、沙坪河流域、钦江流域关系

Fig. 1 Relationship of Pinglu Canal, Shaping River basin, and Qinjiang River basin

旧州江是平陆运河钦江右岸的支流,流经旧州镇文坳子村并与运河交汇,入汇角度约45°。该

流域总面积约 190 km²，干流全长 36.2 km^[21]。运河干流的 5 a 一遇流量为 340 m³/s，旧州江为 20 a 一遇流量 532 m³/s。支干高程落差为 10.3 m。

综上所述，平陆运河与旧州江交汇河段的支干落差和入汇角度较大，这些因素导致通航条件差，通航安全面临较大威胁。

1.2 通航标准

根据 JTS 180-2—2011《运河通航标准》^[22]第 6.2.3 节规定，支流汇入口对应的运河航道内横向流速不应大于 0.3 m/s。

2 模型试验

本文采用 1:50 正比例河流模型进行试验，研究平陆运河交汇口与旧州江交汇口水流条件对通航的影响。

2.1 模型范围

根据模型场地的要求、比例尺和进出口长度的设定，模型的具体范围如下：干流段的总长度约为 2.6 km，支流口上游段长度为 1.2 km，下游段长度为 1.4 km，支流段长度约为 1.0 km。旧州江汇入口模型布置见图 2。

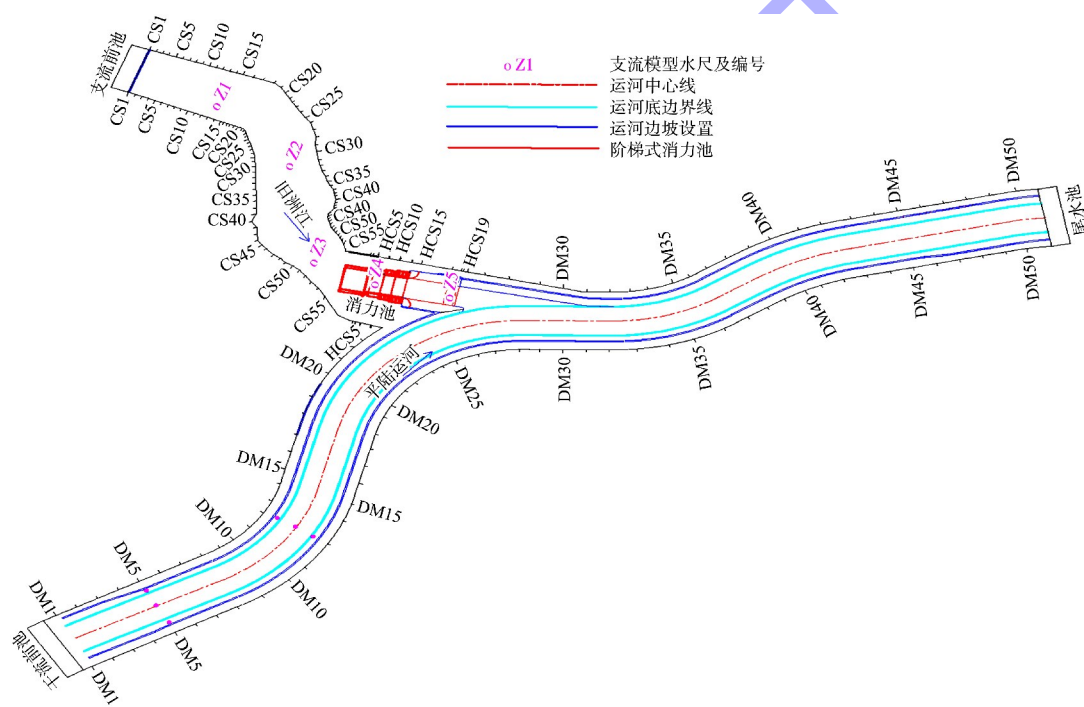


图 2 旧州江汇入口模型布置

Fig. 2 Layout of entrance model of Jiuzhou River

2.2 模型验证

由于研究河段缺少实测流速流向资料，只有 2022 年 8 月实测的旧州江水面线成果。因此，模型主要进行水面线的验证。原型在旧州江支流布置 4 把水尺，进行瞬时水面线观测。经模型水面线验证试验结果，见表 1。

比对原型和模型水面线，两者水面线吻合较好，水面比降一致性较匹配。从数值对比来看，水位偏差均在 ±0.05 m 内，未超过 ±0.10 m。水位验证结果满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试

验技术规范》^[23]规定的误差要求。经模型水位验证试验，结果满足定床河工模型的相似性要求，说明模型的阻力与原型阻力基本相似，可以进行水流特性、工程方案等试验。

表 1 水位验证结果

Tab. 1 Results of water level verification

水尺编号	原型水位/m	左岸模型水位/m	偏差/m
Z1	40.53	40.51	-0.02
Z2	39.99	40.02	0.03
Z3	39.60	39.65	0.05
Z4	39.45	39.46	0.01

2.3 试验条件

2.3.1 模型比尺

为了提高模型试验的观测精度,选择了较小的几何比尺。在考虑到模型场地和供水条件的基础上,确定该试验采用正态定床模型,模型比尺为1:50。

2.3.2 试验工况

平陆运河为I级航道,最高通航流量洪水重现期为20 a。运河流量主要来源于沿线支流,为分析航道在最不利影响情况下的水流条件,模拟中支流流量选取20 a一遇的洪水流量;干流流量来源于旧州江汇入口以上区间来流,相当于5 a一遇的洪水流量;尾水位通过干流相应洪水水面线成果插值确定。控制工况水文组合为:支流流量 $532\text{ m}^3/\text{s}$,干流流量 $340\text{ m}^3/\text{s}$,尾水位 35.32 m 。

2.3.3 试验仪器

本文采用西南水运工程科学研究所研发的XKVMS系列表面流场测量系统测量流速,通过水位测针观测水位。测量内容包括交汇区河段的表面流速分布、流态以及水面波动等水流条件。

2.4 试验方案

本文共设计4种方案,即设计方案、优化方案I、优化方案II及优化方案III,具体布置见表2。

表2 试验方案
Tab.2 Experimental schemes

方案	布置情况
设计方案	三级消力池+1:15缓坡
优化方案I	三级消力池+1:15缓坡+隔流堤
优化方案II	改变运河走向+三级消力池+1:15缓坡
优化方案III	改变运河走向+三级消力池+1:4陡坡

3 治理方案及效果分析

3.1 设计方案试验

3.1.1 设计方案布置

设计方案为首先拓宽支流口并与运河平顺衔接;在支流口上游河底高程 38.5 m 处布置三级消力池。消力池出口从HCS14到HCS16按1:15的坡度放坡,坡底高程为 26.2 m ;从断面HCS16到HCS17为底高程 26 m 的消力池,随后从断面HCS17放坡至HCS18,坡顶高程为 27.7 m ,设计方案平面布置见图3,设计方案消力池剖面见图4。

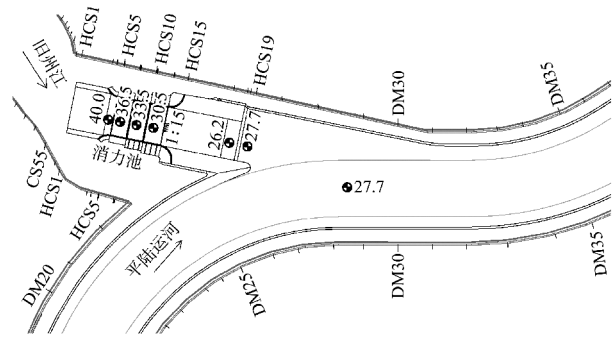


图3 设计方案平面布置(单位:m)

Fig.3 Design scheme layout (unit: m)

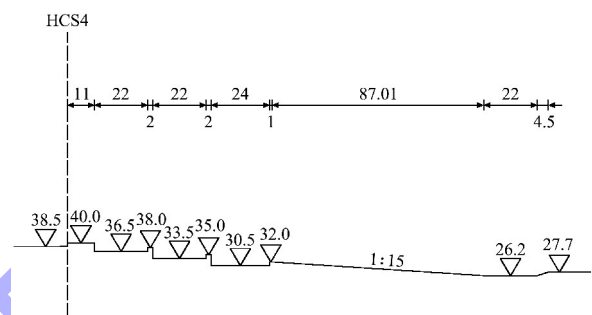


图4 设计方案三级消力池纵剖面(单位:m)

Fig.4 Longitudinal profile of three-level energy dissipation pool in the design scheme (unit: m)

3.1.2 设计方案效果分析

旧州江支流地形呈典型山区河流特征,水流较快且流态紊乱。试验结果显示,交汇区航道左边界的合流速度较大,但整体速度较小,主要由于消力池的作用。此外,干支交汇区航道中心线与支流流向夹角小,水流条件简单,相关情况见图5。

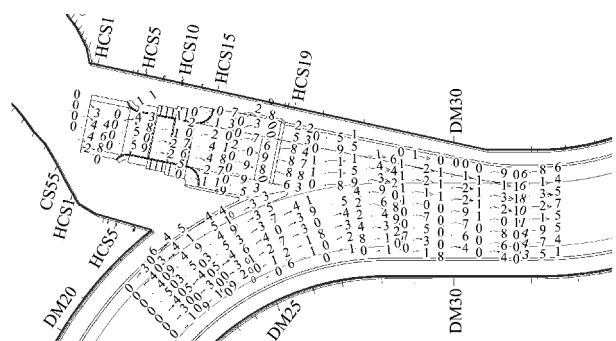


图5 设计方案合速度分布(单位:m/s)

Fig.5 Design scheme resultant velocity distribution (unit: m/s)

实测数据显示,航道范围内的最大横向流速为 0.49 m/s ,出现在断面DM34的航道左侧区域。并且,在断面DM30~DM32的航道左侧,存在流

流速超标的区域，其横向尺度为 38.15 m，纵向尺度为 29.1 m；而在断面 DM33~DM35 的航道内，流速超标的区域几乎覆盖了整个航道，横向尺度为 57.26 m，纵向尺度为 47.12 m。综上所述，航道内的横向流速分布未能满足 JTS 180-2—2011《运河通航标准》要求。横向流速分布超标区域见图 6。

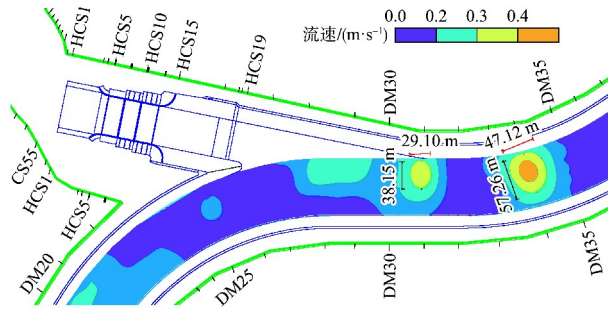


图 6 设计方案航道横向流速分布

Fig. 6 Channel's horizontal velocity distribution of design scheme

对设计方案试验成果的分析表明，虽然该方案通过消力池有效处理了支流水流，但由于支流地形呈现典型的山区河流特征，来水流速较快。在上游流量较大的情况下，交汇区的横向流速超出 JTS 180-2—2011《运河通航标准》要求较多。因此，设计方案存在一定的不足，需要进一步调整和优化，以更好地满足通航安全要求。

3.2 优化方案 I 试验

3.2.1 优化方案 I 布置

在设计方案成果的基础上，提出进一步优化的措施：在原有方案基础上，增加了实体隔流堤，以期减小干支汇合区的横向流速。顺直隔流堤的长度为 37.4 m，宽度为 2 m，顶高程为 27.7 m；隔流堤与航道边界的最短距离约为 6.5 m，优化方案 I 平面布置见图 7，消力池剖面与设计方

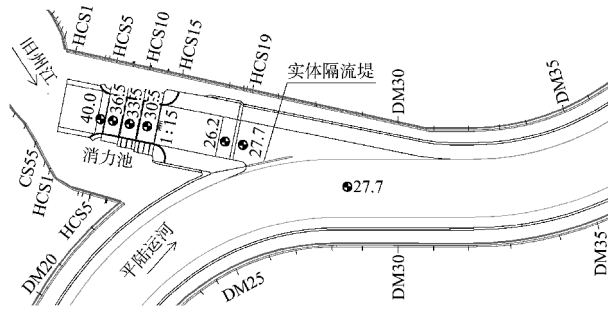


图 7 优化方案 I 平面布置(单位:m)

Fig. 7 Optimization scheme I layout(unit: m)

3.2.2 优化方案 I 效果分析

试验结果表明，在实体隔流堤的作用下，航道内水流的合速度普遍偏小，交汇区航道内水流流速均在 2 m/s 以内，其中干支交汇区航道中心线与支流来流方向的夹角比较小，且航道内无复杂的水流流态，见图 8。

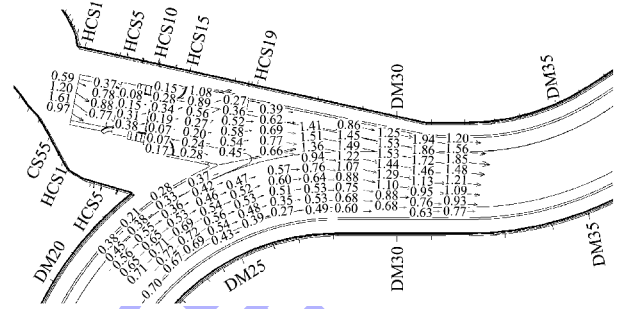


图 8 优化方案 I 合速度分布(单位:m/s)

Fig. 8 Optimization scheme I resultant velocity distribution(unit: m/s)

尽管实体隔流堤有效地阻断了支流来流与干流的直接汇合，使得支流水流较为平顺地过渡到干流，减小了横向流速超出规范值的范围，但在此方案下，横向流速仍然偏大，实测数据显示，在航道范围内，最大横向流速为 0.44 m/s，出现在断面 DM35 的航道右侧区域。此外，在断面 DM35 的航道中心位置，存在流速超标的区域，横向尺度为 51.22 m，纵向尺度为 47.10 m。因此，横向流速分布仍未满足 JTS 180-2—2011《运河通航标准》要求，见图 9。

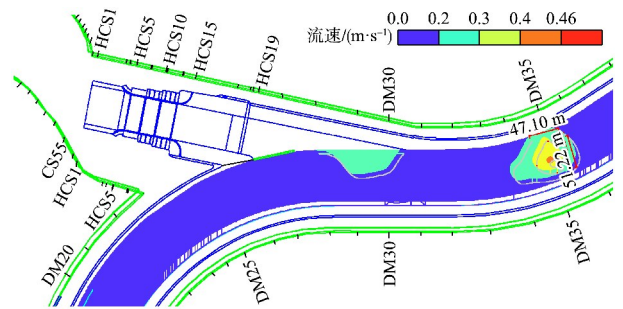


图 9 优化方案 I 航道横向流速分布

Fig. 9 Optimization scheme I lateral flow velocity distribution in channel

优化方案 I 的试验总结：通过在交汇区设置实体隔流堤，虽然成功减小了航道范围内的水流速度，但仍存在一些区域的横向流速超标。因此，可以得出结论：实体隔流堤在一定程度上起到了导

流和消能的作用, 但对改善干支流交汇区的横向流速效果有限, 仍需要对该方案进行进一步优化。

3.3 优化方案 II 试验

3.3.1 优化方案 II 布置

在设计方案的基础上, 优化方案 II 通过增大交汇区航道的弯曲半径, 旨在使水流与航道中心线之间的夹角变得更小, 其余部分保持不变。优化方案 II 的平面布置见图 10, 消力池的剖面与设计方案相同。

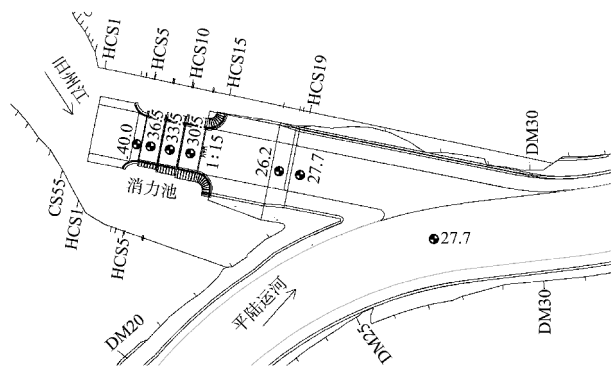


图 10 优化方案 II 平面布置 (单位: m)

Fig. 10 Optimization scheme II layout plan (unit: m)

3.3.2 优化方案 II 效果分析

试验结果表明, 航道内水流的合速度均小于 2.0 m/s, 最大合速度为 1.69 m/s, 出现在断面 DM31 靠航道左侧处。在断面 DM27~DM30 区域, 航道中心线与主流之间的夹角较大, 导致航道内水流流态较为复杂, 具体情况见图 11。在增大交汇区航道弯曲半径后, 横向流速得到很大改善, 汇入段的航道内无超出范围值的区域, 达到了安全通航标准, 见图 12。

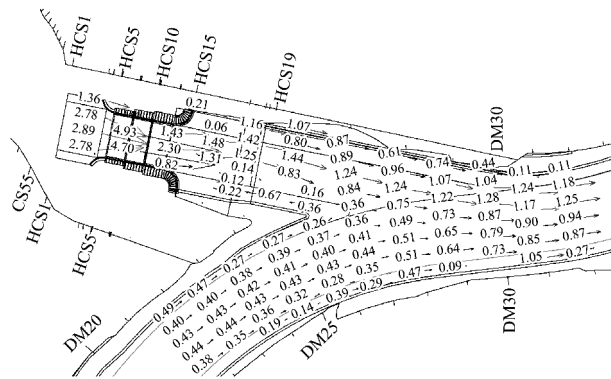


图 11 优化方案 II 合速度分布 (单位: m/s)

Fig. 11 Optimization plan II resultant velocity distribution (unit: m/s)

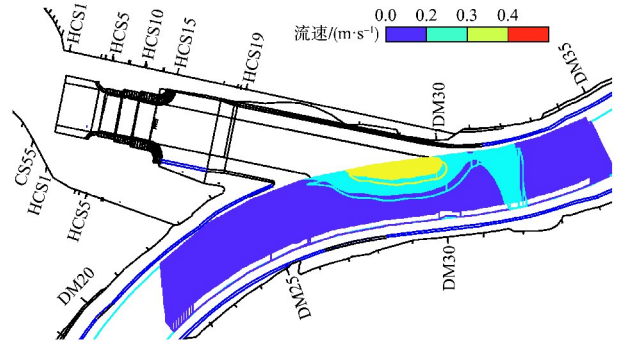


图 12 优化方案 II 航道横向流速分布

Fig. 12 Channel lateral flow velocity distribution of optimization plan II

在增大交汇区航道弯曲半径后, 设计方案在大落差和上游支流来流量较大的情况下, 消能效果较为理想。经过优化, 运河航道内的横向流速显著降低, 并且未出现流速超标的区域, 基本能够满足安全通航的要求。然而, 依据泥沙淤积分布的计算结果见图 13, 在丰水年, 优化方案 II 的消力池下游缓坡处积聚了大量泥沙, 不利于支流内泥沙的清除。

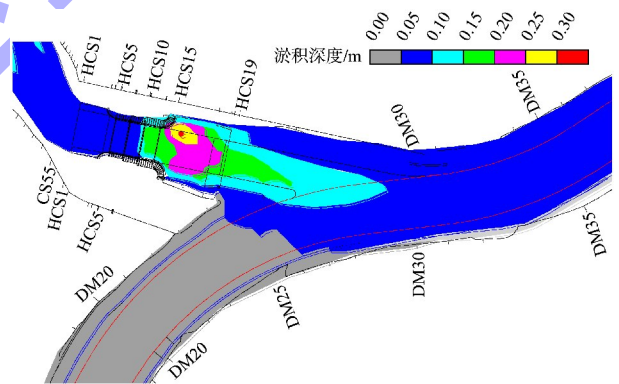


图 13 优化方案 II 泥沙淤积分布

Fig. 13 Optimization scheme II sedimentation distribution

3.4 优化方案 III 试验

3.4.1 优化方案 III 布置

针对优化方案 II 缓坡上泥沙减淤问题, 并营造鱼类适宜避险的缓流区, 优化方案 III 在优化方案 II 的基础上将 1:15 的缓坡改为 1:4 的陡坡。坡脚处高程为 26.6 m。优化方案 III 平面布置见图 14, 消力池剖面见图 15。

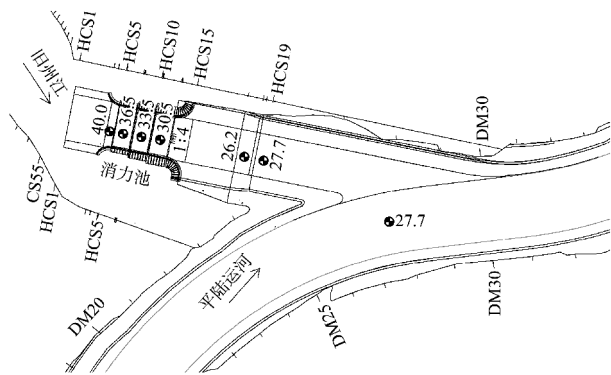


图 14 优化方案III平面布置(单位:m)

Fig. 14 Optimization scheme III layout plan (unit: m)

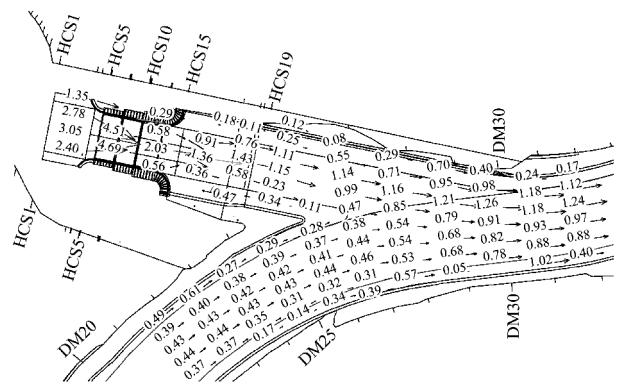


图 16 优化方案III合速度分布(单位:m/s)

Fig. 16 Optimization scheme III resultant velocity distribution (unit: m/s)

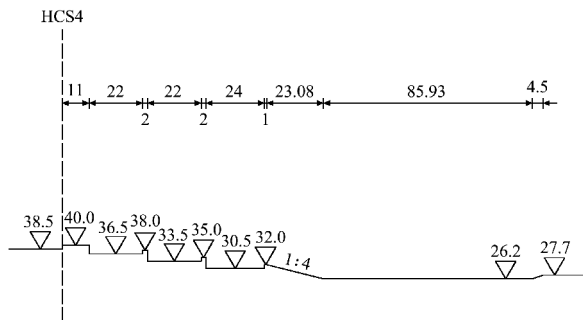


图 15 优化方案III消力池剖面(单位:m)

Fig. 15 Energy dissipation basin cross-section of optimization scheme III (unit: m)

3.4.2 优化方案III效果分析

试验结果表明,三级消力池和斜坡的消能作用显著改善了汇入口段航道的合流速,从而减小了航道中心线与主流之间的夹角,并有效避免航道内复杂的水流现象,见图 16。

在设置 1:4 陡坡后,横向流速与优化方案 II 相比没有明显改善,但汇入段航道内未出现流速超标区域,能够安全通航,见图 17,为了进一步观察汇入口河段的流态和水面波动,试验中在汇入口处的断面 DM25 和下游的断面 DM29 靠左岸设置观测点。结果显示,断面 DM25 处水位波动差为 33.54 cm,断面 DM29 处水位波动差为 44.72 cm,航道内水流流态良好,较为平稳。

在实施优化方案 III 后的试验结果表明,交汇区水流状态较为平稳。尽管横向水流速度未有显著改善,但通过泥沙淤积分布计算,见图 18,在丰水年,优化方案 III 的主要淤积区位于 1:4 放坡后的沉砂池内,这个结果有助于支流内泥沙的清除。

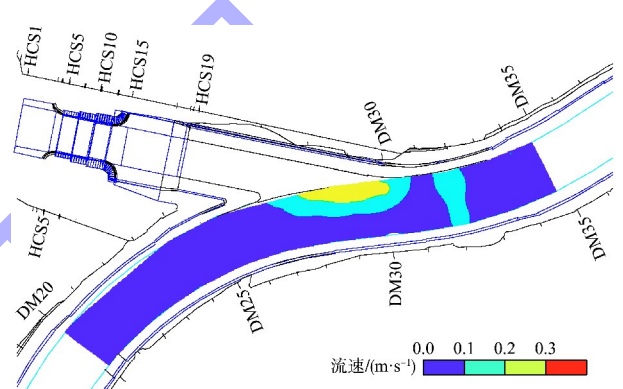


图 17 优化方案III航道横向流速分布

Fig. 17 Channel's lateral flow velocity distribution of optimization scheme III

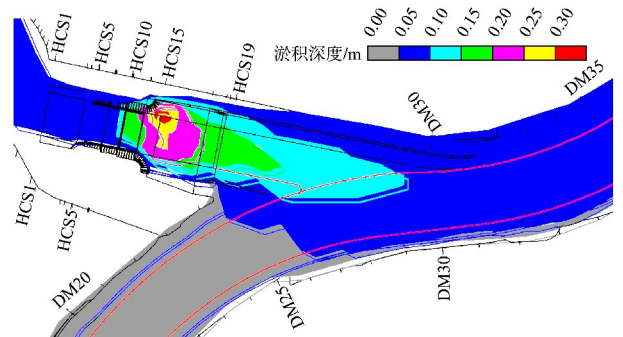


图 18 优化方案III泥沙淤积分布

Fig. 18 Optimization scheme III sedimentation distribution

3.5 方案总结

为改善平陆运河与旧州江交汇口的水流条件,本文提出 3 种优化方案:优化方案 I 增设隔流堤,优化方案 II 增大航道弯曲半径,优化方案 III 在优化方案 II 基础上,将消力池下游缓坡改为陡坡。优化方案 I 虽能减小流速,但部分区域流速超标,未达要求,相比之下,优化方案 II 和 III 有效降低

了横向流速,符合安全通航标准。优化方案Ⅱ与Ⅲ的效果相似,但优化方案Ⅱ的泥沙淤积发生在坡度为1:15的区域,清淤困难;优化方案Ⅲ的淤积集中在1:4坡度后的沉砂池中,有助于水流稳定和清理。此外,优化方案Ⅲ在鱼类栖息地方面更具优势,坡比增大后,水流和水深梯度更丰富,有利于鱼类栖息和繁衍。综合考虑各方面因素,优化方案Ⅲ为最佳方案。

4 结语

1) 旧州江支流入汇角大、流量占优且存在较大河底落差,导致交汇区水流顶托显著、流态紊乱及横向流速梯度过大,治理难度高。

2) 本文提出的多级消力池、隔流堤、斜坡等措施均表现出一定的消能与促淤效果,其中运河线型优化的综合效果最为显著,表明在复杂地形河段,运河走向设计对通航安全具有决定性意义。

3) 当支流来沙量较大时,单纯考虑水流条件难以保证航道长期稳定,应同时纳入泥沙淤积控制与生态效应。本文提出的“三级消力池+陡坡”组合措施,实现了“通航-泥沙-生态”协同治理,提高清淤效率,并兼顾了鱼类栖息环境。

参考文献:

- [1] 代宁波. 斜坡下游三维水流数值模拟及消能特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
DAI N B. Numerical simulation of three-dimensional water flow downstream of a slope and research on energy dissipation characteristics [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [2] 张艳艳, 张康, 王建平, 等. 支流入汇对潮汐河段通航的影响及整治措施研究[J]. 人民长江, 2022, 53(1): 13-17, 24.
ZHANG Y Y, ZHANG K, WANG J P, et al. Study on influence of tributary inflow on tidal river navigation and flow adjustment measures [J]. Yangtze River, 2022, 53(1): 13-17, 24.
- [3] 梁浩然, 袁浩, 胡瑞昌. 平陆运河老村河支流入汇段通航水流条件优化[J]. 水运工程, 2024(4): 107-113, 137.
LIANG H R, YUAN H, HU R C. Optimization of navigational flow conditions in tributary confluence section of Laocun River of Pinglu Canal [J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 107-113, 137.
- [4] 毛森浩, 王威, 张铭, 等. 干支流垂直交汇下跌水工程下游通航水流条件优化[J]. 水利水运工程学报, 2023(3): 29-37.
MAO S H, WANG W, ZHANG M, et al. Navigable flow condition optimization at vertical channel confluence in the downstream of a water drop project [J]. Hydro-science and engineering, 2023(3): 29-37.
- [5] 周家俞, 徐奎, 黄成林, 等. 西津水利枢纽二线船闸下游引航道右岸支流汇入口消能设施设计[J]. 水运工程, 2018(12): 119-122, 146.
ZHOU J Y, XU K, HUANG C L, et al. Design of energy-dissipating and desilting facilities at entrance of right bank of lower approach channel of Xijin hydro-junction second-lane ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2018(12): 119-122, 146.
- [6] 张辉, 李涛, 李铭, 等. 引江济淮五老堰跌水工程汇流口通航水流条件及改善措施[J]. 水运工程, 2022(7): 140-146.
ZHANG H, LI T, LI M, et al. Navigable flow conditions and improvement measures at confluence of Wulaoyan water drop project for water diversion project from the Yangtze River to the Huaihe River [J]. Port & waterway engineering, 2022(7): 140-146.
- [7] 张辉, 虞邦义, 贲鹏, 等. 引江济淮跌水工程汇流口通航条件三维数值模拟[J]. 水运工程, 2021(8): 111-116.
ZHANG H, YU B Y, BEN P, et al. Three dimensional numerical simulation of navigation condition at confluence of water diversion and fall project from the Yangtze River to the Huaihe River [J]. Port & waterway engineering, 2021(8): 111-116.
- [8] 符蔚, 王能, 李志威, 等. 分汊河段船闸引航道整治试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 17-22.
FU W, WANG N, LI Z W, et al. Physical model test on regulation and optimization of navigation lock approach channel in a branching reach [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(8): 17-22.
- [9] 吴文凤, 张绍培, 张家兴, 等. 山区河道低水头航电枢纽的水力学问题研究[J]. 水运工程, 2020(11): 106-112.
WU W F, ZHANG S P, ZHANG J X, et al. Study on

- hydraulic problems of low-head navigation-power junction in mountainous river [J]. *Port & waterway engineering*, 2020(11): 106-112.
- [10] 史修府, 牧振伟, 吕智, 等. 溢洪道转弯段消力池水力特性优化模拟[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(12): 91-100.
SHI X F, MU Z W, LYU Z, et al. Simulation on optimizing hydraulic characteristics of stilling pool in turning section of spillway[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2024, 41(12): 91-100.
- [11] 周凯, 牧振伟, 赵乾, 等. 悬栅消力池压强特性研究及优化[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(10): 128-132.
ZHOU K, MU Z W, ZHAO Q, et al. Study and optimization of pressure characteristics of suspended grid stilling basin [J]. *Water resources and power*, 2023, 41(10): 128-132.
- [12] 周凯, 牧振伟, 周镇, 等. 底流消力池墩栅联合消能工水力特性数值模拟研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(2): 142-148, 156.
ZHOU K, MU Z W, ZHOU Z, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of pier-fence joint dissipators in underflow dissipation basins [J]. *Journal of water resources and water engineering*, 2023, 34(2): 142-148, 156.
- [13] 闫勇, 陈强. 梯形消力池在官地水电站的应用[J]. *人民长江*, 2020, 51(8): 147-150, 185.
YAN Y, CHEN Q. Application of trapezoid stilling basin in Guandi Hydropower Station [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(8): 147-150, 185.
- [14] 李世城, 张法星, 曲景学, 等. 消力池尾坎纵向坡度对池内水流流场和消能率的影响[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(5): 104-107.
LI S C, ZHANG F X, QU J X, et al. Influence of end sill slope on flow field and energy dissipation rate in stilling basin [J]. *Water resources and power*, 2017, 35(5): 104-107.
- [15] 胡亮亮, 谭家万, 袁浩. 基于隔流堤的下游引航道通航水流条件优化[J]. *水运工程*, 2022(5): 72-77.
HU L L, TAN J W, YUAN H. Optimization of navigable flow conditions of downstream entrance channel with separation levee [J]. *Port & waterway engineering*, 2022(5): 72-77.
- [16] WANG F, AN X. Study on flow conditions for navigation in entrance area and connection reach downstream of the lock of a new hub [J]. *IOP conference series: earth and environmental science*, 2021, 768(1): 012049.
- [17] ZAFFAR M W, HASSAN I, LATIF U, et al. Numerical investigation of scour downstream of diversion barrage for different stilling basins at flood discharge[J]. *Sustainability*, 2023, 15(14): 11032.
- [18] ZAFFAR M W, HAASAN I, GHUMMAN A R. Performance evaluation of different stilling basins downstream of barrage using FLOW-3D scour models [J]. *Hydrology*, 2023, 10(12): 1-25.
- [19] 龙翔宇, 冯珍珍, 高成岩. 平陆运河沙坪河段船舶操纵仿真模拟试验[J]. *水运管理*, 2024, 46(7): 19-22.
LONG X Y, FENG Z Z, GAO C Y. Ship maneuvering simulation test for Shaping River section of Pinglu Canal [J]. *Shipping management*, 2024, 46(7): 19-22.
- [20] 喻涛, 李娅, 何俊辉, 等. 平陆运河与沙坪河交汇河段通航水流条件试验研究[J]. *水运工程*, 2024(4): 93-100, 156.
YU T, LI Y, HE J H, et al. Experimental research on navigable flow conditions in intersection of Pinglu Canal and Shaping River [J]. *Port & waterway engineering*, 2024(4): 93-100, 156.
- [21] 何俊辉. 平陆运河旧州江支流口泥沙淤积模拟研究[J]. *西部交通科技*, 2023(12): 1-2, 60.
HE J H. Sediment deposition simulation at Jiuzhou River tributary inlet of Pinglu Canal [J]. *Western China communications science & technology*, 2023(12): 1-2, 60.
- [22] 运河通航标准: JTS 180-2—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Navigation standard of canal: JTS 180-2-2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [23] 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.
Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.