



黄河宁夏康滩—营盘滩河段 航道整治方案试验研究

齐鲁尚^{1,2}, 沈寿亮¹, 丁少伟¹

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 黄河干流宁夏中卫市康滩—营盘滩河段长约 9 km, 平面宽窄相间, 呈藕节状。针对康滩—营盘滩河段河道弯曲、支汊纵横、航槽不明、流态紊乱等问题, 采用河工模型试验对疏浚浅区、拓宽航槽的航道整治效果进行分析, 并根据试验结果对设计方案进行优化。最终确定中宁大桥滩采用新开航槽弯曲半径大于 550 m, 与上、下游航道平顺衔接, 太平滩采用疏浚、筑坝和填槽相结合的整治措施, 能够有效改善通航水流条件, 保障通航安全。

关键词: 黄河; 航道整治; 河工模型; 通航水流条件

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0139-08

Test of waterway regulation scheme for Ningxia Kangtan to Yingpantan section of the Yellow River

QI Lushang^{1,2}, SHEN Shouliang¹, DING Shaowei¹

(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The river reaches from Kangtan to Yingpantan in Zhongwei of Ningxia, the mainstream of the Yellow River, is about 9 km long, wide and narrow in plan, and has the shape of a lotus root joint. Considering the problems of channel curvature, bifurcations, unknown channel, violent turbulence in the river reaches from Kangtan to Yingpantan, we use the river model test to analyze and research the effect of channel regulation by dredging the shallow area and widening the channel, and optimize the design scheme according to the test results. It is found that the bending radius of the newly opened fairway at Zhongning Bridge beach is more than 550 m and the upstream and downstream fairways are smoothly connected with each other, and at Taiping beach, the rehabilitation measures of dredging, impoundment and slot filling are carried out, which can effectively improve the flow conditions and ensure the safety of navigation.

Keywords: the Yellow River; waterway regulation; river model; navigation flow condition

1 工程概况

黄河宁夏中卫市沙坡头枢纽—中宁县白马乡段 90 km 航道须整治 12 处滩险, 康滩—营盘滩河段长约 9 km, 为沙坡头枢纽下游天然河道, 两岸受堤防或滨河路基控制, 岸线基本稳定, 平面宽窄相间, 沙质河床, 洲滩易变^[1]。河床宽浅段与窄深段

相间分布, 横向变形大, 水流散乱, 主流摆动剧烈, 河床冲淤变化频繁。枯水期河宽在 100~200 m, 中宁大桥上游浅滩段枯水河面宽约 650 m。枯水期航槽内水流较急, 流速多在 1.50~2.50 m/s, 平均水面比降约 0.8‰, 流态较差。黄河中宁康滩—营盘滩段河势见图 1。

收稿日期: 2023-06-07

作者简介: 齐鲁尚 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运、水利工程设计与研究。

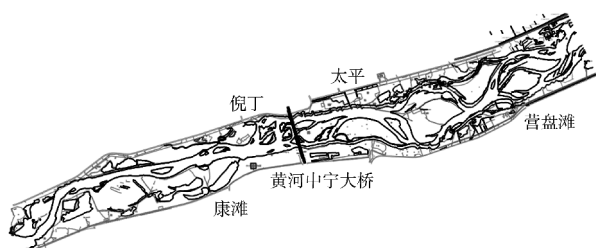


图1 黄河中宁康滩—营盘滩河段河势

为改善康滩—营盘滩河段的通航条件,保障通航安全,开展该河段航道的物理模型试验研究工作,旨在为黄河宁夏沙坡头枢纽—白马乡段航运建设工程设计提供技术支撑和科学依据。

2 模型设计与验证

2.1 模型设计

模型范围从康滩起至下游营盘滩止,包括中宁大桥滩、太平滩及拟建的中宁客运码头等,全长约 9.0 km。模型的中宁大桥见图 2。



图2 模型的中宁大桥

试验河段上段河槽窄深,至中宁枸杞博物院以下水流逐渐分散,河床不稳,航道条件十分复杂。为确保研究河段水沙运动的相似性和试验成果的可靠性,模型设计须兼顾水流和泥沙运动相似,宜按大尺度、小变率进行设计,结合场地、供水等条件,模型设计采用水平比尺 $\lambda_L=130$ 、垂直比尺 $\lambda_H=65$ 的小变率模型,并选用塑料沙模拟沙质推移质运动^[2]。

2.2 模型验证

2.2.1 瞬时水面线验证

模型瞬时水面线验证主要是为了检验模型阻力的相似程度。根据原型实测资料分析,天然河道糙率取 0.028~0.033,模型糙率取 0.020~0.023,采用梅花型加糙可满足河床阻力相似要求。

由于原型实测资料较少,仅有 2017-03-26 实测流量 $Q=418 \text{ m}^3/\text{s}$ 时试验河段的瞬时水面线^[3],模型以此资料进行瞬时水面线验证,原型与模型水面线对比见图 3。

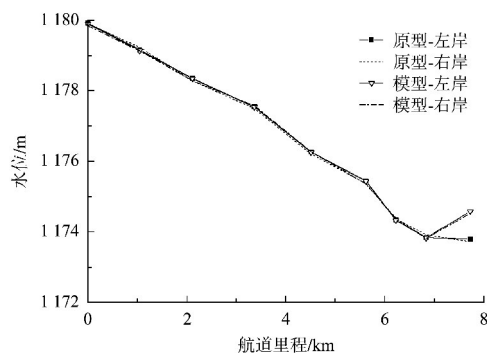


图3 康滩—营盘滩河段瞬时水面线验证

由图 3 可知,在 $Q=418 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,模型实测水位与原型实测水位最大差值小于 $\pm 0.08 \text{ m}$,多数差在 $\pm 0.05 \text{ m}$ 左右,符合 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[4] 的要求,表明模型水面线与原型吻合较好,从而保证了模型河道阻力与原型相似。

2.2.2 分流比验证

在流量 $Q=455 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,根据原型中宁大桥下游约 300 m 处左、右汊实测分流量,其中左汊分流量为 $350 \text{ m}^3/\text{s}$ 、分流比为 76.9%,右汊分流量为 $105 \text{ m}^3/\text{s}$ 、分流比为 23.1%;模型实测左汊流量为 $330 \text{ m}^3/\text{s}$ 、分流比为 73.2%,与原型实测分流比相差仅 3.7%,同样满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》要求。

由模型水面线、分流比等验证可知,模型与原型相似性较好,可在此基础上进行工程前后水流条件及整治方案的试验研究。

3 航道整治方案

3.1 整治方案设计

根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[5] 和工程河段的实际情况,该段航道设计标准为 V 级,相应航道尺度为 $1.3 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 270 \text{ m}$ (航道水深×航道宽度×弯曲半径)。相应通航水流条件为航槽流速宜小于 3.50 m/s ,建筑物及弯道处横向流速宜

小于 0.30 m/s 。

在规划航道范围内有 2 处浅区须疏浚,位置见图 4。

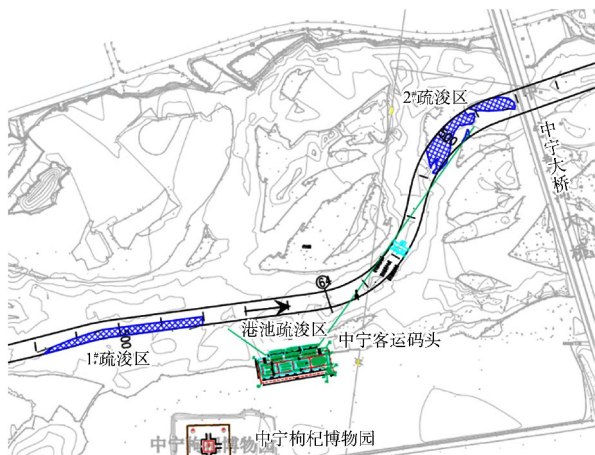


图4 设计方案工程布置

1) 疏浚中宁枸杞博物院附近航槽 (CS40 ~ CS45), 疏浚区域位于航道右侧 (1[#]疏浚区), 疏浚区长 380 m、宽 10~20 m、深 1.3 m, 挖槽边坡比为 1:3。

2) 在中宁大桥上游开挖新航槽, 从拟建中宁客运码头 (CS49) 起航槽中心线为半径 270 m、长约 330 m 的反弧段, 经长约 60 m 直线段后接半径为 260 m、长约 300 m 的弧线段, 航宽由 40 m 逐渐增至 60 m, 航槽由右岸过渡至河道左侧, 后与下游深槽平顺衔接。

根据最新地形测图, 该方案的 2[#]疏浚区域为旧桥至上游约 250 m 范围, 疏浚宽度为 48~60 m, 深度为设计水位下 1.3 m, 挖槽边坡比为 1:3。

结合黄河旅游区的开发建设, 拟在试验河段中宁大桥上游黄河右岸建设中宁客运码头 1 个, 工程等级按三类河港设计。

3.2 模型工况及结果分析

模型实测 $363 \text{ m}^3/\text{s}$ (设计流量)、 $850 \text{ m}^3/\text{s}$ (整治流量)、 $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ (中水流量) 和 $2520 \text{ m}^3/\text{s}$ (洪水流量) 共 4 级流量的水位和流速等, 工程河段共截取 12 个横断面 (断面间距约 720 m), 断面布置见图 5, 水位分布见图 6。

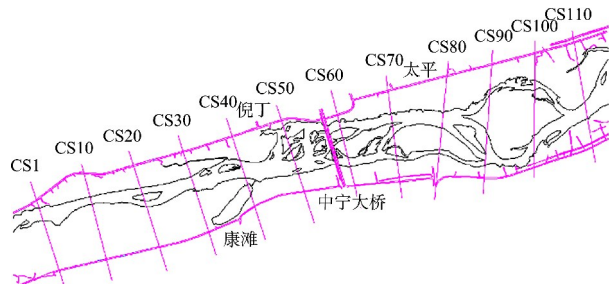


图5 分析断面布置

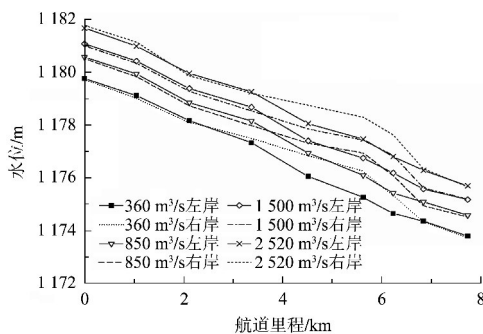


图6 研究河段设计方案水位分布

当 $Q=363 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 1[#]疏浚区及码头河段水位较整治前降低 $0.03 \sim 0.05 \text{ m}$, 比降也由整治前的 0.91‰ 降至 0.88‰ , 航槽流速在 $1.30 \sim 2.60 \text{ m/s}$; 码头港池水流平缓, 无不良流态, 码头前沿流速小于 0.80 m/s 。 $Q=363 \text{ m}^3/\text{s}$ 时中宁大桥上游天然河道和设计方案下河道流速分布见图 7。新开航槽因整治后水流归槽导致流速增加, 为 $1.10 \sim 2.30 \text{ m/s}$, 较整治前增大 $0.20 \sim 0.70 \text{ m/s}$, 水面比降约 0.7‰ , 部分槽外水流斜向流入, 航槽内存在横流。由于无工程措施, 模型进口及中宁大桥下游水流条件与整治前相同。

当 $Q=850 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 1[#]疏浚区河段水位较整治前降低 $0.02 \sim 0.04 \text{ m}$, 水面比降为 0.96‰ , 航槽流速在 $2.65 \sim 3.40 \text{ m/s}$; 码头港池水域仍较平缓, 无不良流态, 码头前沿流速小于 1.00 m/s 。新开航槽内流速在 $1.55 \sim 2.28 \text{ m/s}$, 较整治前增加 $0.30 \sim 0.50 \text{ m/s}$, 水面比降约 0.6‰ , 此时槽外斜向流入的水流比 $Q=363 \text{ m}^3/\text{s}$ 时增多, 航槽内斜流增强, 流态较乱。其余段的水流条件与天然情况相近。

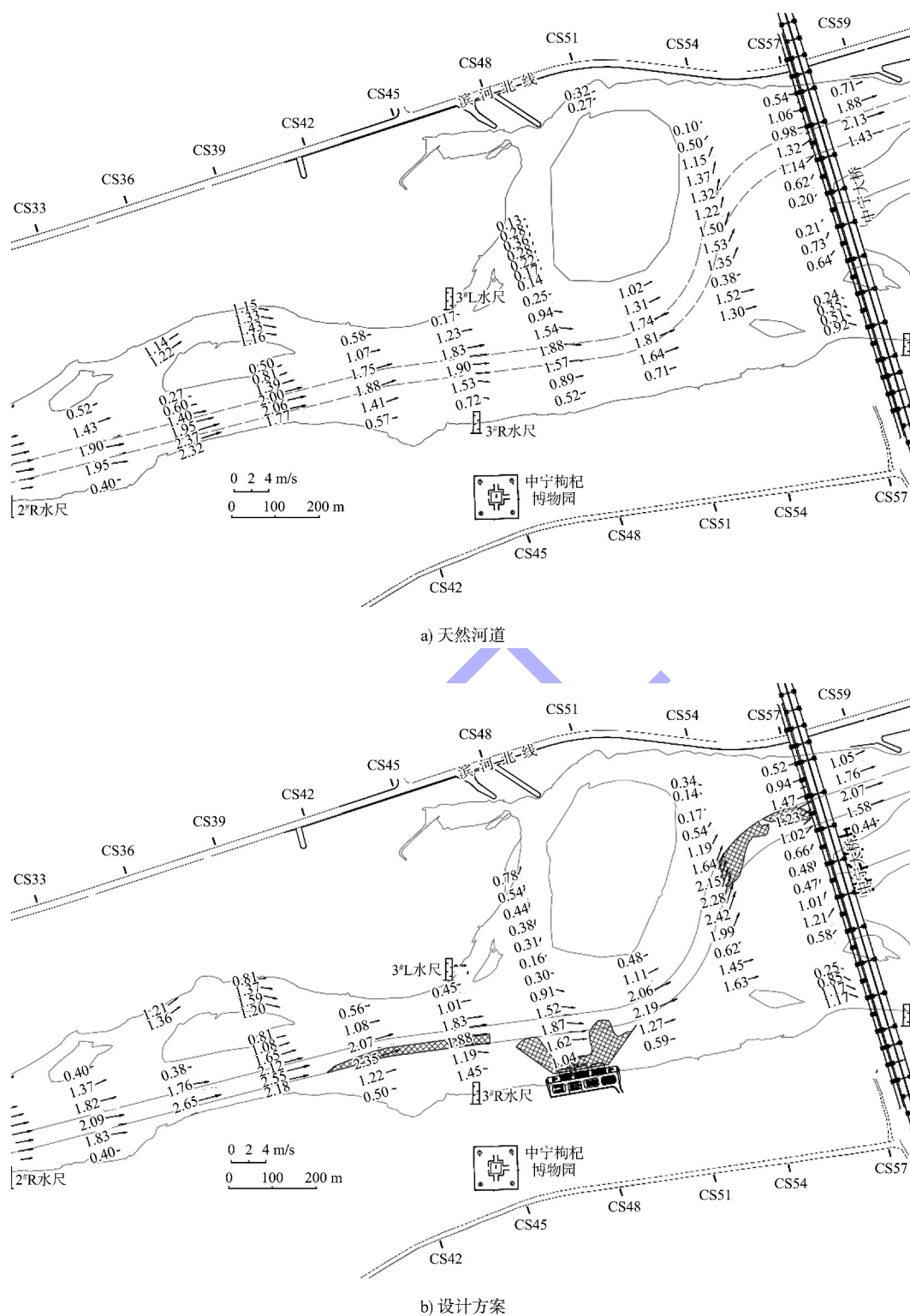


图7 $Q=363 \text{ m}^3/\text{s}$ 中宁大桥上游河道流速分布

当 $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 水位升高显著, 整治工程对水流条件的影响明显减弱。1#疏浚区水位较整治前仅降低 0.02 m, 流速大多大于 3.50 m/s, 在 3.16~4.35 m/s; 码头港池水域仍无不良流态,

码头前沿流速为 1.32 m/s。新开航槽内流速在 1.17~2.14 m/s, 和整治前的流速差小于 0.10 m/s, 水面比降与整治前相近, 约 0.6‰, 此时滩面水深增大、斜向水流减弱, 流态较 $Q=850 \text{ m}^3/\text{s}$ 时有所

改善。其余河段的水流条件同整治前。

当 $Q=2\,520\text{ m}^3/\text{s}$ 时,随着流量的增大,工程措施对水流条件影响越来越小。研究河段流速大多处于 3.50 m/s 以上,水流条件已恢复到天然状态。

通过对各级流量下水位、比降、流速和分流比等水力要素的分析可知:1) 选择左汊为规划航槽是恰当的,但存在航槽弯曲,与水流动力轴线夹角过大、斜流明显、流态较乱等问题,导致中宁大桥滩工程后通航水流条件不理想,且挖槽回淤的可能性较大;2) 中宁客运码头港池水域水面较平稳,无不良流态,船舶停靠安全,但港池存在泥沙回淤问题。

3.3 方案优化设计

3.3.1 中宁大桥滩

在原设计基础上进一步调整航槽布置,并对3处浅区进行疏浚。优化方案布置见图8。

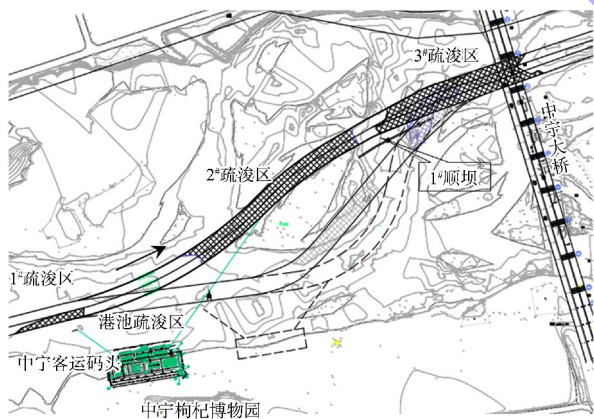


图8 中宁大桥滩整治工程布置

1) 1#疏浚区: 与中宁客运码头疏浚区统一考虑。

2) 2#疏浚区: 该疏浚区为新开航槽进口段,位于航槽从左岸过渡至右岸的起始段,将支汊拓宽挖深,疏浚长度约 480 m ,疏浚宽度为 $8\sim 40\text{ m}$,疏浚深度 1.3 m 。

3) 3#疏浚区: 该疏浚区为中宁大桥上游 310 m 至下游 100 m 范围,疏浚长度约 410 m ,疏浚宽度为 $8\sim 60\text{ m}$ (在老桥拆除前桥轴线上游 150 m 至下游 50 m 航槽加宽至 60 m),疏浚深度 1.3 m 。

4) 1#顺坝: 该坝为低矮顺坝,拦截支沟水流,

防止横向水流对航槽的干扰。顺坝坝头位于中宁大桥上游约 360 m ,坝长约 190 m ,距新挖航槽右边线约 20 m ,与新挖航槽基本平行。坝顶高程同整治水位,坝顶宽为 2.5 m ,两侧边坡均为 $1:2$ 。

5) 港池疏浚: 由于新开航槽较原设计方案上延左移,拟建中宁客运码头与航道明显错位,为更好地与航槽衔接、方便船舶进出港,将拟建中宁客运码头上移约 300 m 。码头顶高程为 $1\,180.5\text{ m}$,港池疏浚水深为设计水位下 1.3 m ,疏浚边坡为 $1:3$ 。其余布置同原设计方案。

3.3.2 太平滩段

太平滩中汊水深较大、河面较宽,宜选作规划航道加以治理。优化方案布置见图9。

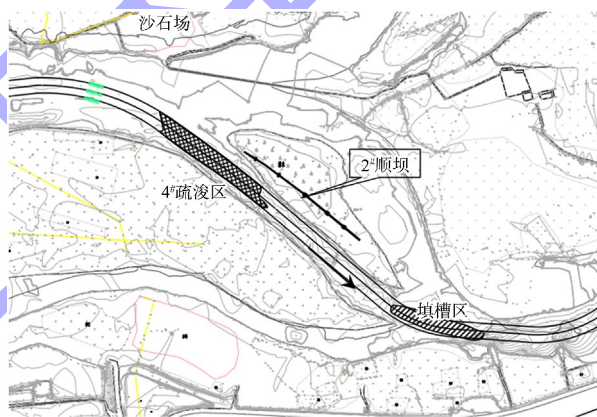


图9 太平滩整治工程布置

1) 4#疏浚区: 太平滩滩口段 (CS80~CS84) 航槽水深虽满足设计要求,但水急、坡降大,拟采用疏浚方式增大过流面积,减小流速,降低比降。该疏浚区长度约 360 m ,宽度约 $12\sim 45\text{ m}$,底高程须与上、下游河道顺畅衔接,由下往上为 $1\,172.9\sim 1\,173.6\text{ m}$ 。

2) 2#顺坝: 该坝为低矮顺坝,沿航槽左侧浅滩滩脊布置,坝体走向与航槽基本平行。顺坝距新挖航槽左边线 $40\sim 55\text{ m}$,坝长约 370 m ,坝顶高程与整治水位相同,坝顶宽为 2.5 m ,两侧边坡均为 $1:2$ 。

3) 1#填槽区: 太平滩下段河床纵坡比降大,航槽弯曲、扫弯水强劲,回流和泡漩并存,采取局部 (CS90~CS92) 填槽的措施减弱弯道扫弯水。

该填槽区域长约 250 m, 宽度为 10~40 m, 由下往上填槽底高程为 1 172.5~1 173.9 m。

4 优化方案分析

模型实测了 363、850、1 500 和 2 520 m³/s 共 4 级流量下水力要素, 方案优化后研究河段水位分布见图 10。

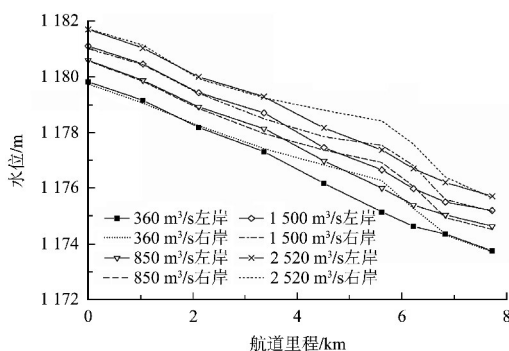


图 10 研究河段设计方案优化后水位分布

4.1 流速、比降变化

4.1.1 中宁大桥滩

$Q=363$ m³/s 时中宁大桥上游设计方案优化后河道流速分布见图 11。当 $Q=363$ m³/s 时, 中宁大桥滩 1[#]疏浚区及码头河段水位较整治前降低约 0.1 m, 比降较整治前增加约 0.04‰, 为 0.68‰, 航槽内流速多在 1.38~1.81 m/s; 码头港池水域水流平缓, 无不良流态, 流速均未超过 1.00 m/s, 码头前沿流速小于 0.30 m/s。

新开航槽 2[#]疏浚区与上游航槽衔接顺畅, 衔接段弯曲半径为 950 m, 航槽内流速多在 1.30~2.30 m/s; 3[#]疏浚区航槽内流速在 0.30~1.30 m/s, 水流流向与航槽的夹角多小于 10°, 大桥上下游河段局部水面比降为 1.52‰; 1[#]顺坝修筑后, 拦截了右侧进入航槽的水流, 航槽内的斜流消失, 水流平顺。

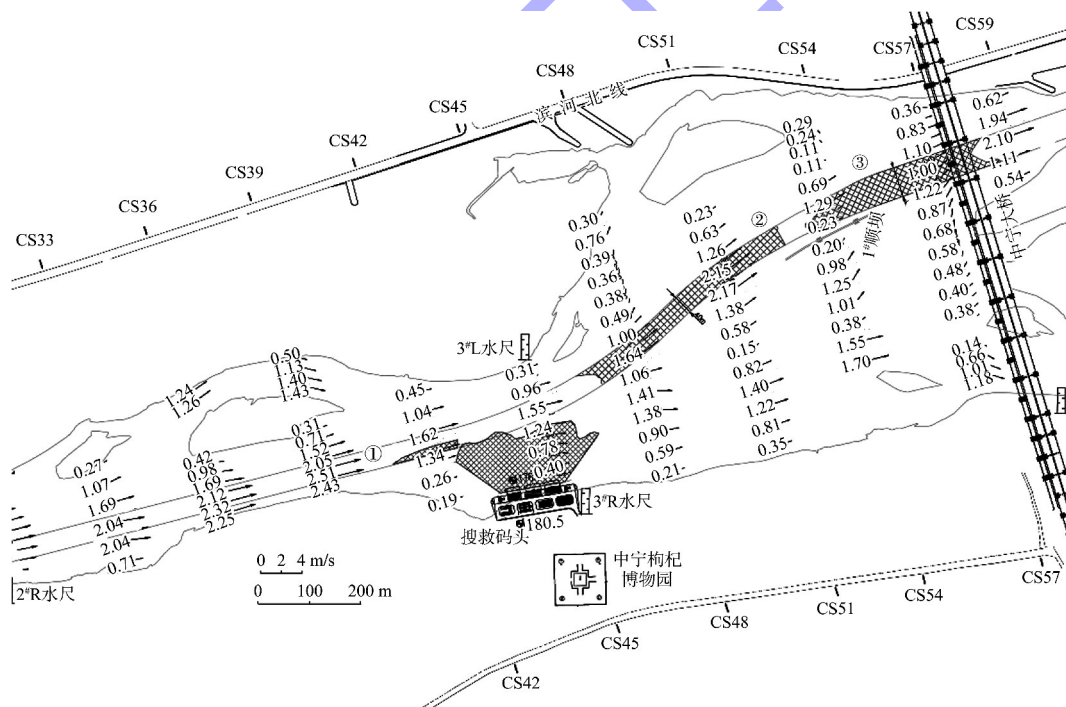


图 11 $Q=363$ m³/s 中宁大桥上游设计方案优化后河道流速分布

当 $Q=850$ m³/s 时, 1[#]疏浚区河段水位较整治前降低 0.06 m, 水面比降为 0.65‰, 航槽流速在 1.30~2.60 m/s; 拟建码头港池水域无不良流态, 流速均未超过 1.50 m/s, 码头前沿流速小于 0.70 m/s。新开航槽 2[#]疏浚区航槽内流速多在 1.60~2.30 m/s, 3[#]疏浚区流速在 0.60~1.40 m/s, 大桥上下游河段

局部水面比降为 1.38‰; 1[#]顺坝修筑后, 右侧进入航槽的水流被拦截, 航槽内流态显著改善。

当 $Q=1 500$ m³/s 时, 水位继续升高, 整治工程对水流条件的影响减弱。1[#]疏浚区河段水位较整治前降低 0.02 m, 水面比降为 0.63‰, 航槽流速在 2.20~2.60 m/s, 流速基本在 3.50 m/s 以下。

拟建码头港池水域仍无不良流态,码头前沿流速为 1.11 m/s。新开航槽 2[#]疏浚区流速多在 1.00~2.21 m/s, 3[#]疏浚区流速在 0.60~1.70 m/s,大桥上下游河段局部水面比降为 1.54‰。

当 $Q=2\,520\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水位进一步升高,整治工程对水流基本无影响。

4.1.2 太平滩

当 $Q=363\text{ m}^3/\text{s}$ 时,太平滩滩口段由于 4[#]疏浚区的开挖,增大了过水面积,流速为 1.05~1.38 m/s,比整治前减小 0.20~0.30 m/s,水面比降也由整治前的 1.18‰减小为 0.74‰。太平滩中段航槽顺直,主流居中,新建 2[#]顺坝拦截了横流,槽内水流平顺,流速多在 1.25~2.33 m/s,与整治前差别不大,水面比降为 0.53‰,较天然情况减小 0.12‰。太平滩下段填槽后,该处的回流、泡漩等不良流态减弱,流速多在 1.10~2.24 m/s,较天然情况增大约 0.30 m/s,水面比降为 1.74‰,较天然情况减小 0.25‰。可见,在该流量下太平滩通航水流条件显著改善。

当 $Q=850\text{ m}^3/\text{s}$ 时,太平滩滩口段流速在 1.60~2.30 m/s,水面比降为 0.46‰,与整治前差别不大。中段 2[#]顺坝仍发挥堵汉截流作用,航槽流速在 2.00~2.60 m/s,水面比降为 0.83‰。下段填槽措施实施后,流速多在 2.10~2.60 m/s,填槽上游附近较整治前略有减小,最大流速较整治前略有增大,但流速变化都未超过 $\pm 0.20\text{ m/s}$,此时水面比降为 1.85‰,较整治前减小 0.24‰。

当 $Q=1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,太平滩滩口段(4[#]疏浚区)流速为 2.10~3.20 m/s,比降仅为 0.03‰,此时流速较整治前减小约 0.10 m/s,但比降却减小 0.25‰。中段虽有水流漫过 2[#]顺坝进入中汉,但漫坝水流流速较小,对航槽内水流的影响不大,槽内流速为 1.50~2.30 m/s,比降仅为 0.47‰。下段填槽措施实施后,水位抬升,水面比降减小,流速多在 1.70~2.20 m/s。

当 $Q=2\,520\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水位进一步抬升,工程

措施对水流基本无影响。

4.2 分流比变化

优化方案流量为 363、850 m^3/s 条件下中宁大桥滩左、右汉的分流比相较于工程整治前的变化见表 1。可以看出,当流量为 363 m^3/s 时,优化方案左汉分流比为 84.51%,较整治前增加 4.89%;当流量为 850 m^3/s 时左汉分流比为 81.89%,较整治前增加 7.51%。

表 1 中小流量下分流比对比

位置	363 m^3/s 时的分流比/%		850 m^3/s 时的分流比/%	
	优化方案	整治前	优化方案	整治前
左汉	84.51	79.62	81.89	74.38
右汉	15.49	20.38	18.11	25.62

4.3 航槽稳定性分析

采用定床输沙方式初步研究航槽的稳定性。选择造床作用较强的整治流量($Q=850\text{ m}^3/\text{s}$)和中水流量($Q=1\,500\text{ m}^3/\text{s}$)进行试验,观测优化方案实施后研究河段的泥沙运动。 $Q=850$ 、 $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下泥沙淤积区域分布见图 12。试验观测表明:推移质泥沙一般沿主流往下游输移,形成明显的输沙带,遇到缓流区则逐渐沉降淤积。

1) 中宁大桥滩:河床变化较剧烈,近年来呈淤积趋势。输沙试验表明:工程后该滩淤沙范围较大,部分泥沙沿新开航槽往下输移,除在桥址附近有少量淤沙外,航槽其余部分未见泥沙停留。

2) 太平滩:整治后水流顺畅,流态改善。输沙试验表明:上游来沙皆可冲走,航槽内未见淤沙停留,航槽基本稳定。

3) 拟建客运码头:该码头位于右岸缓流区,港池水流平缓。输沙试验表明港池泥沙回淤明显。

原设计及优化方案对比见表 2,结合前文分析可知,优化方案的整治效果较好。中宁大桥滩新开航道弯曲半径大、航槽水流顺畅;太平滩进口段流速、比降减小,中段斜流消失,下段流态改善。

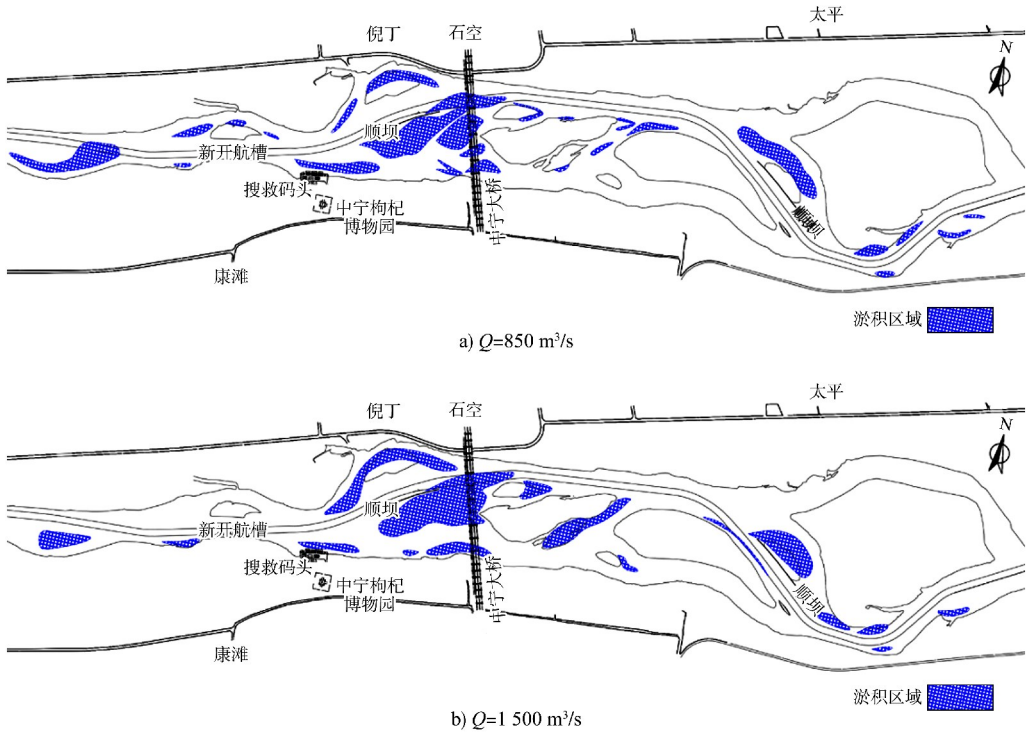


图 12 不同流量条件下泥沙淤积区域分布

表 2 工程措施及整治效果对比

试验方案	主要工程措施	整治效果
设计 方案	1) 疏浚 CS40~CS45 段右侧航槽;疏浚中宁大桥上游 0~250 m 范围内浅区,疏浚宽度为 40~60 m。 2) 拟建中宁客运码头港池疏浚	1) 设计方案基本恰当。 2) 新开航槽内横流较强,流态较乱,通航水流条件差。 3) 新开航槽及港池均存在回淤的可能
优化 方案	1) 中宁大桥滩:①CS40~CS45 疏浚浅区;②增大航道弯曲半径,疏浚 2#和 3#浅区;③在新开航槽右侧修筑 1#低矮顺坝;④拟建中宁客运码头较原设计方案沿右岸上移约 300 m。 2) 太平滩:①疏浚太平滩滩口段 4#疏浚区;②沿航槽左侧浅滩滩脊线布置 2#低矮顺坝;③太平滩下段进行填槽	1) 中宁大桥滩新开航道的弯曲半径大于 550 m,与上、下游平顺衔接,通航条件良好。 2) 新开航槽走向与水动力轴线间夹角较小,航槽稳定性增强。 3) 进口段水陡流急、中段横流较强及下段流态紊乱等碍航问题得到明显改善。 4) 客运码头港池和航槽部分开挖区存在泥沙回淤的可能

5 结 论

- 1) 方案优化后中宁大桥滩新开航槽的弯曲半径大于 550 m,与上、下游航道平顺衔接,航槽水流顺畅,流态良好。新开航槽与水流动力轴线的夹角明显减小,航槽的稳定性增强。
- 2) 太平滩采用疏浚、筑坝和填槽相结合的整治措施,进口段水陡流急、中段横流较强及下段流态紊乱等碍航问题均得到明显改善。
- 3) 中宁客运码头上移后,与主航道的衔接紧密,船舶进出港更为方便,港池水域无不良流态,水流平稳,进出港和靠泊条件较好。

参考文献:

[1] 华设计集团股份有限公司. 黄河宁夏中卫市沙坡头

枢纽至中宁县白马乡段航运建设工程工程可行性研究报告[R]. 南京: 华设计集团股份有限公司, 2016.

[2] 重庆西南水运工程科学研究所. 黄河宁夏中卫市沙坡头枢纽—中宁县白马乡段康滩—营盘滩河段航道整治物理模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2017.

[3] 重庆西南水运工程科学研究所. 黄河宁夏沙坡头枢纽—中宁段航运建设工程水文测量与分析报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2017.

[4] 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.

[5] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

(本文编辑 王 璁)