

· 航道及通航建筑物 ·



长江上游水井湾航道整治数值模拟*

付旭辉, 唐荣岭, 何京霖, 张波, 龚慧玲

(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)

摘要: 水井湾滩段是长江上游弯道分叉河道, 具有急、浅、险等多种碍航特性。洪中枯流量的差异引起主支叉分流比与分沙比的变化, 河床不稳定。采用数值模拟方法, 结合丁顺坝平面初步布置方案, 研究丁顺坝坝头不同偏角布置下水井湾航道的通航水流条件及河道分流比变化规律, 对比分析各布置方案的计算结果得到平面布置最优方案。研究表明: 通航水流条件与丁顺坝坝头偏角不成正向变动关系, 坝头偏角存在合适区间; 分叉主河道分流比与流量成反向变动关系, 坝头偏角对河道分流比影响较小。研究结果可为同类型河流航道整治方案提供理论依据。

关键词: 水井湾; 丁顺坝; 分叉河道; 通航水流条件

中图分类号: U617.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0095-08

Numerical simulation of Shuijing Bay waterway regulation in upper reaches of the Yangtze River

FU Xuhui, TANG Rongling, HE Jinglin, ZHANG Bo, GONG Huiling

(National Engineering Technology Research Center for Inland Waterway Regulation,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The Shuijing Bay Beach section is a branching channel in the upper reaches of the Yangtze River, which has various navigational characteristics such as rapid, shallow, and dangerous. The difference in flow during flood and dry season causes changes in the diversion ratio and sediment distribution ratio of the main branch, resulting in unstable riverbed. By using numerical simulation combined with the initial plan for the layout of spur training dike, the navigable flow conditions and the variation laws of the diversion ratio of the inlet channel at different deflection angles of spur training dike head are studied. The calculation results of each layout plan are compared and analyzed to obtain the optimal plan for the layout. The results show that there is no positive relationship between navigation flow conditions and the deviation angle of spur training dike head, and there is a suitable range for the deviation angle of the dam head. The diversion ratio of the branching main channel varies inversely with the flow rate, and the deviation angle of the dam head has little impact on the diversion ratio of the channel. The results of this study can provide theoretical basis for the subsequent waterway regulation schemes of similar rivers.

Keywords: Shuijing Bay; spur training dike; branching channel; navigable water flow condition

丁顺坝由丁坝和顺坝组合形成, 具有丁坝-束水冲沙和顺坝-引导水流两种特性^[1]。彭秀竹等^[2]用控制变量法对比分析不同挑角、布设排数以及

结构形式下丁坝群对河势的控制效果; 骆言^[3]研究不同挑角丁坝在沿程弯道的水流特性; 喻涛等^[4]研究不同坝头形式、坝长、挑角的丁坝对坝

收稿日期: 2023-09-12

*基金项目: 重庆市技术创新与应用示范专项重点研发项目(cstc2018jszx-zdyfxmX0021-05); 重庆市教育委员会“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJXCZD2020030); 贵州省交通运输厅科技项目(GZJT2021-221-012)

作者简介: 付旭辉(1976—), 男, 博士, 副教授, 从事水利工程、生态水利研究。

头冲刷深度的影响特性,结果表明坝长的影响权重大于挑角和坝形;吴伊平等^[5]研究丁坝挑角及长度对坝后回流区流动特性的影响;陆晶等^[6]研究 45° 、 90° 、 135° 这3个挑角下冲刷坑长度、最大深度等特征参数的变化;Abbasi等^[7]研究不同流量下不同长度勾头丁坝在弯道各处丁坝周围流速分布,发现坝头流速随弗汝德数、坝长、勾头与来流夹角增大而增大;刘旺喜^[8]研究不同顺坝坝长及坝头偏角黑沙洲水道各汉道分流比变化规律;胡旭跃等^[9]用数值模拟研究不同长度勾头对丁坝周围水流结构和流速场的影响;张岩等^[10]研究不同长度单坝在 60° 弯道内的弯道流场结构、断面流速分布、液面特性等特征参数变化情况,发现流体湍动能、湍流黏度的强度和作用范围与丁坝长度成正向关系,湍动能在坝后流动分离区域存在极值。

多数学者主要研究坝形、坝长、挑角等因子对坝局部的冲刷、流速分布等规律性影响,研究环境大多在弯道处、坝群处,然而研究丁顺坝挑角对分汉河段处航道水流条件的影响较少。

1 滩险概况

水井湾位于长江上游香炉滩水道(986~988 km),长约2.0 km,属于浅险滩。该段航道维护尺度为 $3.5\text{ m}\times 80\text{ m}\times 800\text{ m}$ (水深 \times 宽度 \times 弯曲半径),通航保证率98%。该滩段位于吊鱼嘴、锣锅滩两个滩险之间,水流受边滩采砂等因素影响,河道凹岸冲刷外扩,凸岸淤积收缩,古贤坝心滩右侧逐渐向河心延展,浅滩面积逐渐增大。该滩段枯水期航道浅窄,船舶易发生刮擦或搁浅;受到水位跌落的影响,水井湾出现浅水区,3.5 m水深线断开约1 060 m。

上游吊鱼嘴—水井湾为分汉河道,右汉为通航主槽,左岸大石盘位于吊鱼嘴弯道处存在局部深水区,下行船舶受到下泄水流的顶推作用,过弯时存在触礁风险。水井湾下游锣锅滩邻接大弯段,江心洲打鱼碛分流减小造成主航道内同流量下水位跌落,汛期淤积物在退水期随冲刷能力降低难以完全冲刷下移,造成碍航,使锣锅滩入口弯、浅、险的问题也越发突出。水井湾滩段河势见图1。

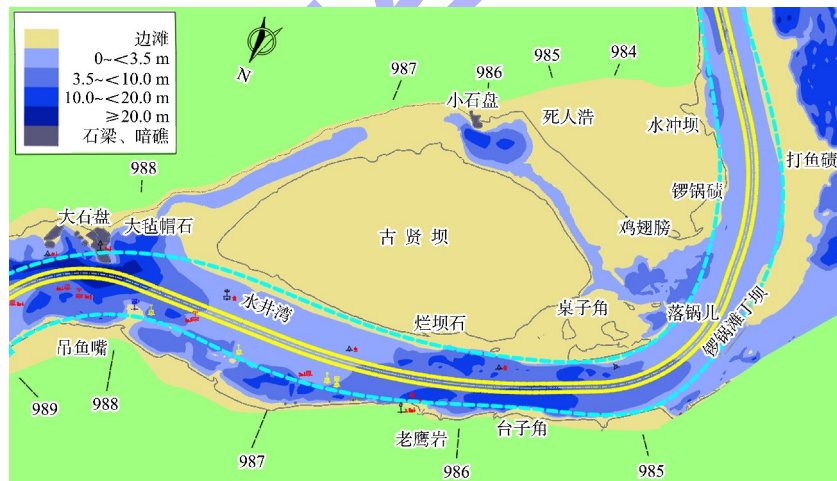


图1 水井湾滩段河势

2 碍航特性及成因

2.1 碍航特性

水井湾主要碍航情况为:1)枯水期航段(986.6~987.3 km)3.5 m等深线不贯通,见图2。水深不足区间为3.13~3.50 m;2)受原边滩人为挖沙的影响,航段(987.0~987.5 km)水位跌落,

枯水期水位比降局部偏大,比降范围为 0.74‰ ~ 1.45‰ ,船舶上行困难;3)受古贤坝浅滩的影响,主航槽枯水期流速沿程变化较大,流速范围为 $0.52\sim 2.64\text{ m/s}$,水流流态不稳定,近年长江干线船舶安全仍然存在诸多不利影响。

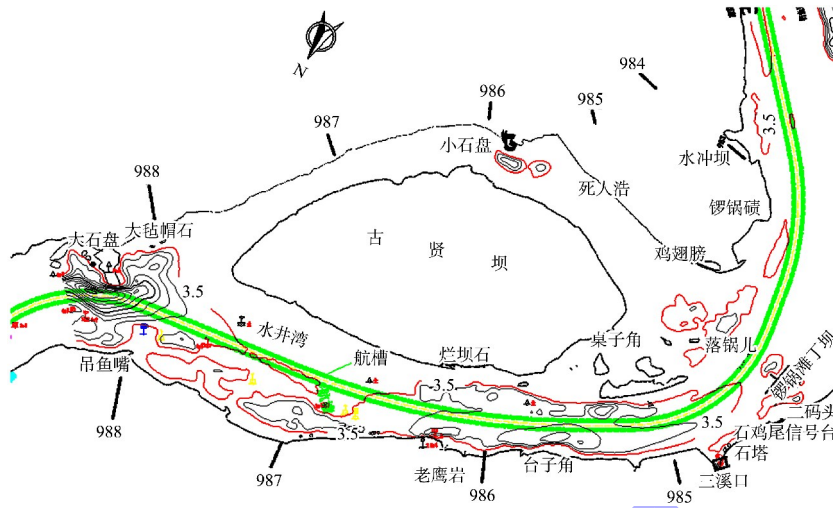


图 2 水井湾滩段碍航特性 (单位: m)

2.2 碍航成因

水井湾含浅滩古贤坝, 为弯道过渡分汊河段, 因洪、中、枯三期过流量的差异, 该河段河床不稳定; 按其河床演变发展进程, 中、洪水期主流偏左, 枯水期主流偏河槽中心, 水流受边滩采砂等因素影响, 河道凹岸冲刷外扩, 凸岸淤积收缩, 古贤坝心滩右侧逐渐向河心延展, 浅滩面积逐渐增大。该滩段枯水期航道浅窄, 船舶易发生刮擦或搁浅, 受到水位跌落的影响, 水井湾出现浅水区, 3.5 m 水深线断开约 1 060 m。

3 平面二维水流数值模型

3.1 网格建立

水井湾 (988.0 km)—香炉滩 (979.2 km) 约 8.8 km, 见图 3。本次二维数值模拟采用三角形非结构网格, 见图 4。网格布置以控制地形为原则, 地形变化较大、整治区域进行局部加密, 横向 5~15 m, 纵向 5~25 m, 共 5.202 8 万个节点, 10.302 5 万个单元。

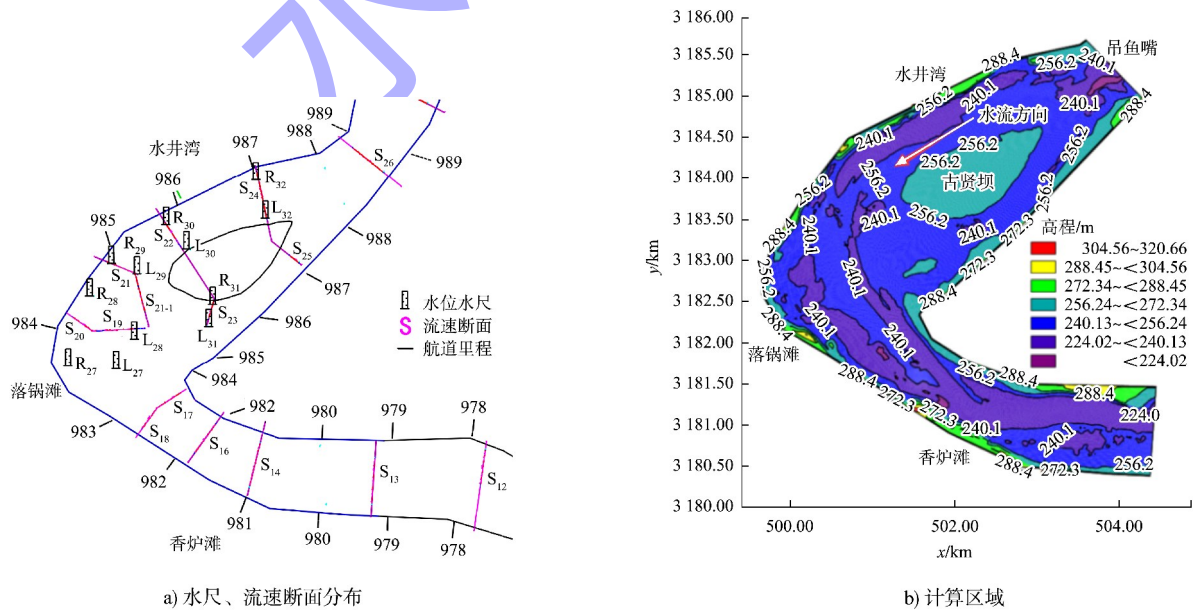


图 3 水井湾—香炉滩模型

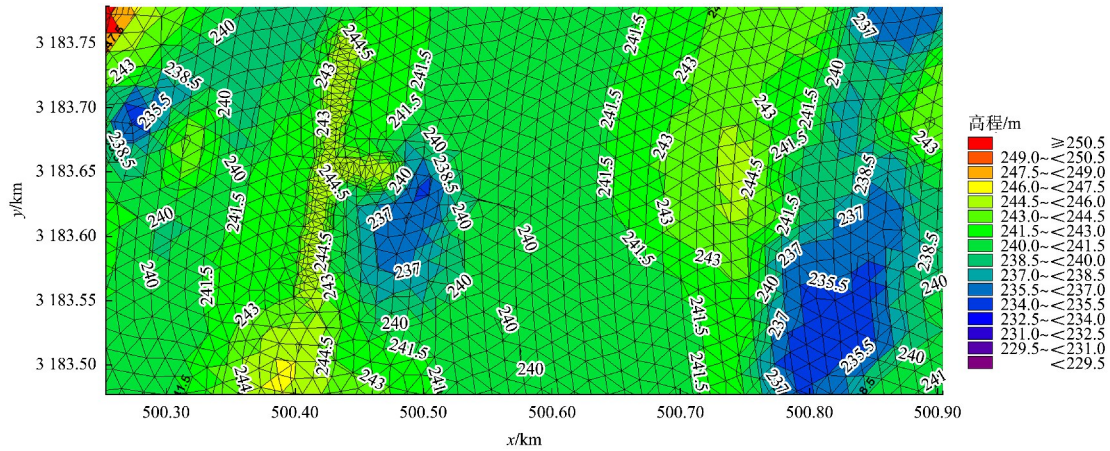


图 4 工程局部网格

3.2 模型验证

计算河段的实测水尺及断面分布见图 3，本次模拟区域全长 8.8 km，共计 12 个水尺和 13 个流速断面，工程河段的河床地形为 2016 年 3 月测图，比例为 1:1 000。洪、中、枯 3 个时期的实测资料分别为 2016 年 9 月、2016 年 7 月、2016 年 3 月。

模型验证进出口边界设置根据实测数据确定，进口为流量，出口为水位。 n 为河道糙率，取值 0.025~0.035。模拟时间步长为 30 s，迭代时长为 800 步，模型达到收敛。水位验证数据见表 1，模拟的沿程水位与实测值误差控制在 ± 0.1 m，仅个别水尺的误差在 $\pm 0.1 \sim \pm 0.2$ m，主要为弯道处水尺。

表 1 水位验证数据

工况	左右岸水尺水位验证									
	左岸	里程/km	实测值/m	计算值/m	误差/m	右岸	里程/km	实测值/m	计算值/m	误差/m
$Q=17\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, $n=0.034$ 洪水	L ₃₂	987.1	251.867	251.934	0.067	R ₃₂	987.1	251.980	252.071	0.091
	L ₃₁	985.6	251.017	250.960	-0.057	R ₃₁	985.6	251.046	251.015	-0.031
	L ₃₀	984.7	251.115	251.169	0.054	R ₃₀	984.7	251.304	251.332	0.028
	L ₂₉	984.6	250.822	250.749	-0.073	R ₂₉	984.6	251.258	251.191	-0.067
	L ₂₈	983.5	250.756	250.754	-0.002	R ₂₈	983.5	251.069	250.987	-0.082
	L ₂₇	982.6	250.684	250.669	-0.015	R ₂₇	982.6	250.920	250.781	-0.139
$Q=10\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$, $n=0.033$ 中水	L ₃₂	987.1	248.995	249.080	0.085	R ₃₂	987.1	249.129	249.220	0.091
	L ₃₁	985.6	247.973	247.996	0.023	R ₃₁	985.6	248.130	248.110	-0.020
	L ₃₀	984.7	248.623	248.580	-0.043	R ₃₀	984.7	248.552	248.580	0.028
	L ₂₉	984.6	247.687	247.786	0.099	R ₂₉	984.6	248.197	248.140	-0.057
	L ₂₈	983.5	247.660	247.670	0.010	R ₂₈	983.5	248.028	247.820	-0.208
	L ₂₇	982.6	247.772	247.650	-0.122	R ₂₇	982.6	247.680	247.621	-0.059
$Q=4\ 672\ \text{m}^3/\text{s}$, $n=0.026$ 枯水	L ₃₂	987.1	245.938	245.925	-0.013	R ₃₂	987.1	245.852	245.890	0.038
	L ₃₁	985.6	245.607	245.644	0.037	R ₃₁	985.6	245.599	245.646	0.047
	L ₃₀	984.7	245.280	245.258	-0.022	R ₃₀	984.7	245.408	245.392	-0.016
	L ₂₉	984.6	244.650	244.805	0.155	R ₂₉	984.6	244.515	244.699	0.184
	L ₂₈	983.5	244.613	244.655	0.042	R ₂₈	983.5	245.026	245.109	0.083
	L ₂₇	982.6	244.652	244.658	0.006	R ₂₇	982.6	243.975	243.915	-0.060

模拟流速与实测流速分布趋势基本一致, 最大、最小值均与实测资料吻合, 误差控制在 ± 0.10 m/s, 个别测流断面误差最大不超过 ± 0.20 m/s, 实测与模拟流速相对偏差基本控制在 $\pm 5\%$, 如断面 L_{17} , 见图5。

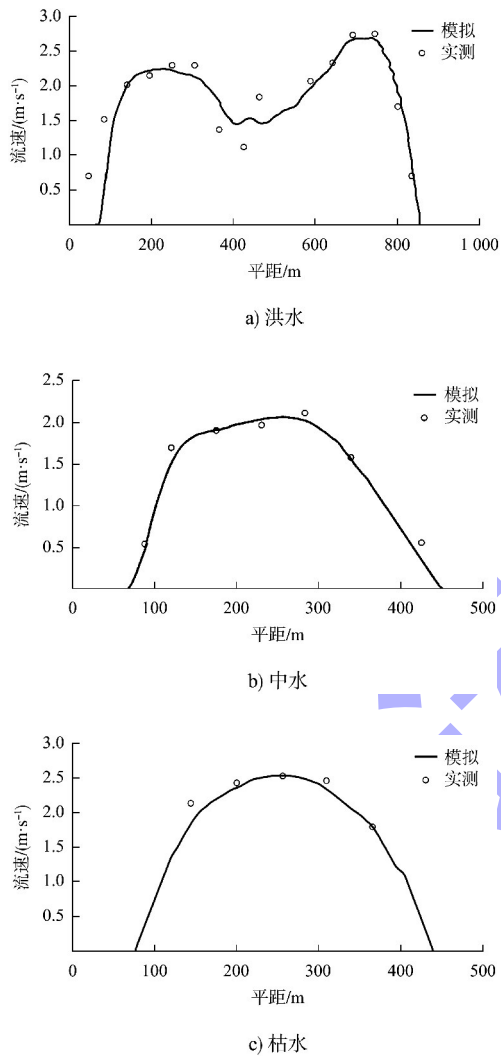


图5 L_{17} 断面流速验证

4 不同丁顺坝方案计算分析

4.1 丁顺坝初设方案

4.1.1 建设标准

水井湾位于长江上游香炉滩水道, 根据水运发展、航道规划、代表船型等因素, 航道整治标准为航道建设尺度 $3.5\text{ m}\times 80\text{ m}\times 800\text{ m}$, 通航保证率98%, 代表船型为2000吨级货船, 水力指标见表2。

表2 2000吨级单船通航水力指标

坡降/ $\%$	0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3.95	3.30	2.98	2.65	2.34	2.06

4.1.2 整治参数

整治线宽度为400~420 m, 整治水位为2.5 m, 流量见表3。

表3 整治参数

整治水位/m	朱沱流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	赤水流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	沱江流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	沱江以上长江流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$
2.5	5 920	270	170	5 480

4.1.3 航槽布置

设计航槽沿深泓线布置, 走向与目前航槽基本一致, 下行船舶循主流沿河而下, 上行船舶贴古贤坝靠右岸上行。

4.1.4 整治思路

河段主要碍航问题为枯水期航道浅窄、主槽流速沿程变化大、水流流态差, 3.5 m水深线断开约1060 m; 因此需要进行河道整治满足3.5 m通航要求。河床受浅区疏浚、人为开挖右岸边滩破坏等因素影响, 河床冲刷不稳定, 需增加巩固边滩建筑物。本设计方案: 1) 增加浅区疏浚区域; 2) 在边滩破坏处新增生态固滩; 3) 在右汊右边滩建立1座丁顺坝。研究的重点为丁顺坝坝头与水流方向夹角。

4.1.5 方案布置

疏浚浅区挖槽宽度80 m, 疏浚基线距航槽边线15 m, 右岸基线长约1250 m; 疏浚区上游右岸进出口段基线加宽5 m, 设计成喇叭状。在右汊右边滩建立1座丁顺坝, 下方修建1处生态固滩区, 巩固边滩, 集中水流冲刷航槽, 恢复边滩的生态环境。1#丁顺坝(丁坝坝长281 m, 顺坝坝长391 m)总长672 m, 丁顺坝坝头高程以设计水位以上2.5 m控制, 坝尾高程以设计水位以上3 m控制; 1#生态固滩区顶高程以设计水位以上0 m控制, 固滩区容积约33.5万 m^3 。根据丁顺坝坝头与水流流向夹角的不同, 初步设置3种方案: 方

案 1-1(偏角 28°)、方案 1-2(偏角 48°)、方案 1-3(偏角 68°), 方案布置见图 6。

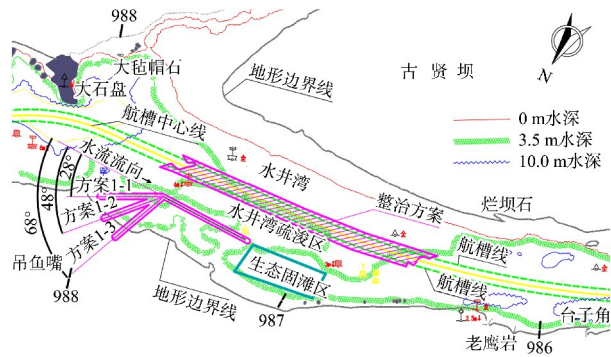


图 6 初设方案平面布置

4.1.6 计算工况

本次计算模拟参数根据朱沱流量确定, 该河段位于赤水河和沱江以上, 数模计算流量选用沱江以上长江流量, 共选用 5 种特征流量工况, 见表 4。

表 4 数模计算工况

工况	朱沱流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	沱江以上长江 流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	数模尾 水位/m	备注
1	2 230	2 052	240.30	设计流量
2	5 920	5 480	242.80	2.5 m 整治水位流量
3	8 350	7 750	245.69	多年平均流量
4	11 500	10 786	247.44	中水流量
5	18 500	17 467	251.14	洪水流量

4.2 通航水流条件及分流比

4.2.1 水流条件

对不满足 3.5 m 航深的浅区进行疏浚后航道水深分布见图 7, 洪、中、枯流量下, 水深均达到通航要求。增加丁顺坝后, 航槽纵比降、流速在整治方案区域(988.0~986.4 km)变化显著, 见图 8。沿程纵比降、流速在 $Q=2\ 052\ m^3/s$ 时 3 种方案的变化差异更明显, 方案 1-1 对通航更有利, 水流流态较好, 跌水现象有所改善, 沿程比降趋于平缓; 方案 1-2 和方案 1-3 跌水现象加剧, 水流不稳定, 流态较差, 沿程比降起伏较大。当 $Q \geq 5\ 480\ m^3/s$ 时, 不同方案下沿程纵比降、流速变化趋势近乎一致。

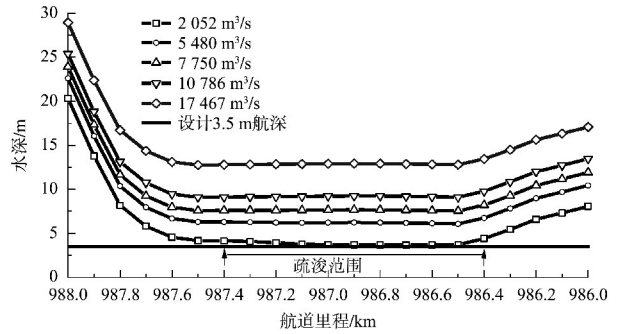


图 7 疏浚后航道水深分布

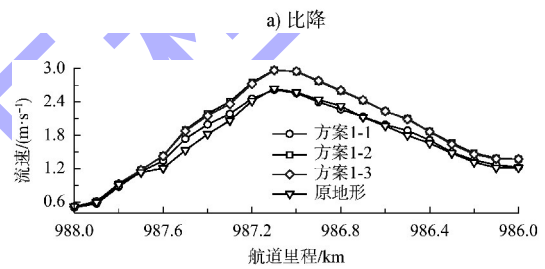
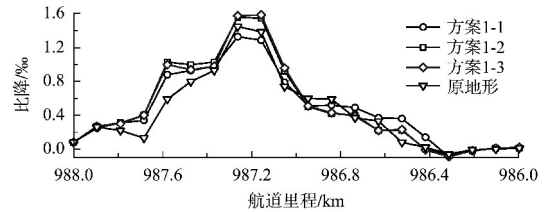
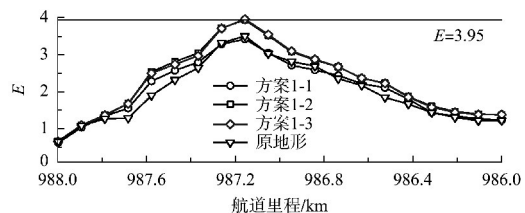


图 8 当 $Q=2\ 052\ m^3/s$ 时, 初设方案上游至下游沿程比降、流速分布

4.2.2 通航指标

$$E=0.628J+V \quad (1)$$

式中: J 为坡降阻力, 与比降成正比; V 为水流阻力, 与流速成正比。消滩临界指标为当 $J=0$ 时, $E_0=3.95\ m/s$, 即 $E>E_0$ 则成滩。航槽内的消滩判数一般都小于成滩临界值 $3.95\ m/s$, 不形成急滩。当 $Q=2\ 052\ m^3/s$ 时, 方案 1-1 指标均小于 E_0 , 满足通航要求; 方案 1-2 和方案 1-3 存在少部分指标处于临界值。当 $Q=5\ 480\ m^3/s$ 时, 3 个方案均存在大于临界指标点, 具备成滩条件, 见图 9。



a) $Q=2\ 052\ m^3/s$

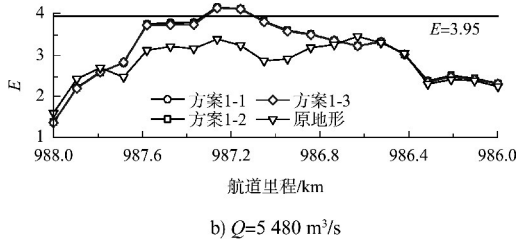


图 9 初设方案航槽内消滩判数分布

4.2.3 分流比

$$\eta_1 = \left[1 + \frac{A_2 \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{2.5}}{A_1} \right]^{-1} \quad (2)$$

式中: η_1 为右汉河道的分流比; A_1 、 A_2 分别为右、左汉河道过流面积, m^2 ; H_1 、 H_2 分别为右、左汉河道平均水深^[11], m 。与原地形相比, 方案后右汉河道分流比变小, 分流比均在 88% 以上, 见表 5。分流比与流量成反向变动关系, 各方案差异较小, 不同工况下变化趋势基本一致, 见图 10。

表 5 初设方案右汉河道分流比

流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	分流比计算值/%			
	原地形	方案 1-1	方案 1-2	方案 1-3
2 052	99.85	98.70	99.83	99.82
5 480	95.17	91.72	91.69	91.72
7 750	94.02	91.75	91.70	91.71
10 786	93.59	91.11	91.07	91.07
17 467	90.44	88.00	88.17	88.61

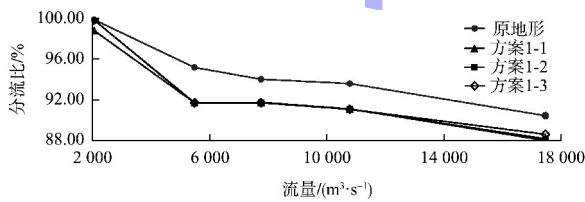


图 10 初设方案右汉河道分流比分布

4.3 优化方案

水井湾分汉河段在枯水期低流量下, 丁顺坝坝头与水流流向的夹角增大, 航槽内沿程比降较原地形的增幅变大, 加剧了跌水现象, 水流不稳定, 流态较差不利于通航; 方案 1-2 和方案 1-3 在枯水期流量下均不完全满足通航要求, 部分指标

偏大, 方案 1-1 在枯水期设计流量下满足通航要求, 但整治水位流量下具备成滩风险, 需调整初设方案以改善整治效果, 达到通航要求, 减小船舶通行风险。

通航指标与比降、流速均成正向变动关系, 比降和流速均随着丁顺坝坝头偏角增加而变大, 若使航槽内的通航指标均满足要求, 需适当减小流速或者降低航槽沿程比降。方案进一步优化, 根据现有的规律将丁顺坝坝头与水流流向的夹角减小, 增设两种偏角不同的优化方案: 方案 2-1 (偏角 18°)、方案 2-2 (偏角 8°), 坝头与坝尾高程、坝长保持不变。

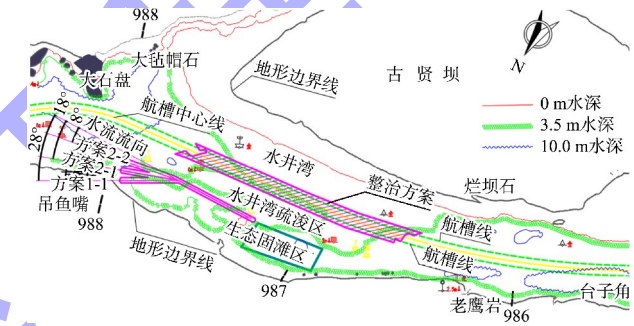
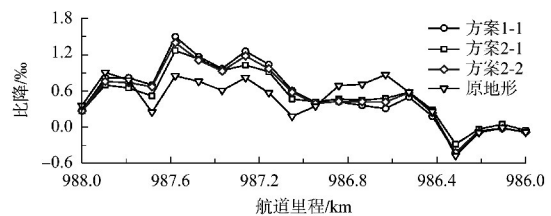


图 11 优化方案布置

4.4 优化方案结果分析

4.4.1 水流条件

沿程比降、水流流速与丁顺坝坝头偏角未形成正向变动关系, 见图 12, 当 $Q = 2\ 052\ m^3/s$ 时, 方案 2-1 和方案 2-2 水流条件差异较小; 当 $Q = 5\ 480\ m^3/s$ 时, 优化方案较方案 1-1, 水流条件均有所改善, 但方案 2-1 较方案 2-2 流速和沿程比降变幅更大, 流速变幅为 $0 \sim 0.47\ m/s$, 沿程比降变幅为 $0.01\% \sim 0.14\%$; 方案 2-1 流速更低, 流速范围为 $1.07 \sim 3.06\ m/s$, 水流流态较缓。



a) 比降

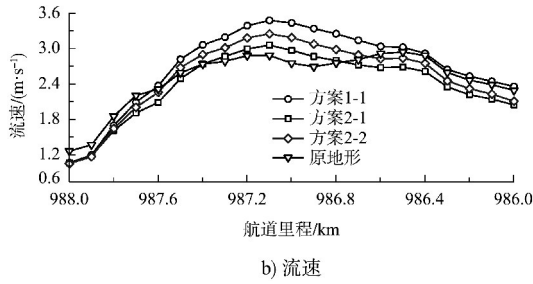


图 12 $Q=5480\text{ m}^3/\text{s}$ 时，上游至下游优化方案
沿程比降、流速分布

4.4.2 通航指标

设计流量下优化方案均满足通航要求；整治水位流量下方案 2-2 部分指标位于临界值，存在成滩风险，方案 2-1 通航指标均小于 E_0 ，满足要求，见图 13。

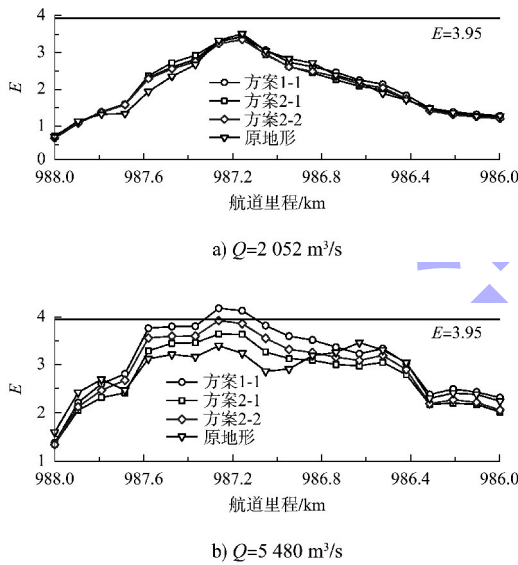


图 13 上游至下游优化方案消滩判数分布

4.4.3 分流比

同一工况下优化方案后的分流比较原地形小，当 $Q=5480\text{ m}^3/\text{s}$ 时差值最大，见表 6；方案 1-1 和方案 2-1 右汉河道分流比随流量的变动趋势基本一致，见图 14，方案 2-2 右汉河道分流比较方案 2-1 有所增加，增加范围为 0.17%~0.63%，增幅小于 1.00%，因此丁顺坝坝头与水流流向夹角变化对各汉分流比影响较小。

表 6 优化方案右汉河道分流比

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	分流比计算值/%			
	原地形	方案 1-1	方案 2-1	方案 2-2
2 052	99.86	98.79	99.20	99.40
5 480	95.17	91.72	91.60	92.24
7 750	94.02	91.75	91.80	91.97
10 786	93.59	91.11	90.97	91.33
17 467	90.44	88.00	88.03	88.21

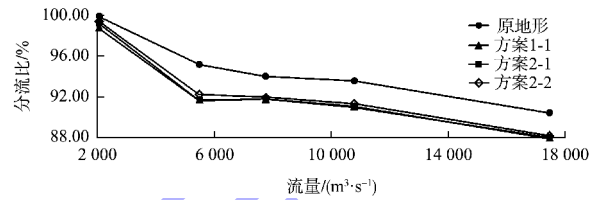


图 14 优化方案右汉河道分流比分布

5 结语

1) 水井湾因洪、中、枯三期过流量的差异，受江心滩的影响，枯水期河道窄浅，沿程河道存在跌水现象，水流湍急，通航风险增加。

2) 沿程比降、流速与丁顺坝坝头与水流流向夹角变化不成正向变动关系，坝头偏角存在合适区间，方案 2-1 为最优方案，坝头偏角合适区间为 $8^\circ \sim 28^\circ$ 。

3) 水井湾右汉主河道分流比与流量成反向变动关系，同一工况下优化方案后的分流比较原地形小，当 $Q=5480\text{ m}^3/\text{s}$ 时差值最大；丁顺坝坝头与水流流向夹角变化对河道分流比影响较小。

参考文献：

[1] 陈晓云. 浅谈川江过渡段浅滩整治中丁坝、顺坝的作用与布置[J]. 水运工程, 1997(2): 23-27.
 [2] 彭秀竹, 徐向舟, 赵莹, 等. 黄河下游丁坝群对河势控制效果研究[J]. 大连理工大学学报, 2022, 62(4): 378-385.
 [3] 骆言. 不同组合下双丁坝对弯道内水力特性的影响试验及数值模拟研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.