



长江中游熊城河段航道整治效果预测

於 龙, 胡 见

(长江航运发展研究中心, 湖北 武汉 430010)

摘要: 针对长江中游熊城(熊家洲—城陵矶)河段航道整治工程实施后, 未来 10 a 该河段的航道条件变化的问题。采用动床模型试验的研究方法, 建立熊城河段的物理模型, 通过再现 2022 年 2 月—2023 年 3 月该河段天然的水沙条件, 验证了模型设计、选沙及各项比尺的合理性。选取典型年和系列年开展模型试验, 分析航道整治工程实施后熊城河段河床冲淤、滩槽格局等变化。结果表明: 整治方案实施后该河段河床有所冲刷, 滩槽格局变化不大, 航道条件明显改善, 可达到整治目标; 八姓洲西侧顺直过渡段抛石棱体头部局部出现冲刷坑, 七弓岭弯道段局部区域各年末均有一定程度回淤, 其中 4 a 末最大, 需要进行维护疏浚才能保障畅通。建议工程实施后加强对七弓岭、七姓洲弯道的观测, 若出现不利变化或碍航问题需及时采取维护措施保障航道通畅。

关键词: 熊城段; 航道整治; 效果预测

中图类分号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0168-09

Prediction of waterway regulation effects in Xiongcheng river section of middle reaches of the Yangtze River

YU Long, HU Jian

(Yangtze River Shipping Development Research Center, Wuhan 430010, China)

Abstract: Regarding the changes in the navigation conditions of the Xiongcheng (Xiongjizhou–Chenglingji) river section of middle reaches of the Yangtze River over the next decade following the implementation of the waterway regulation project, this study adopts the research method of movable-bed model experiments to establish a physical model of the Xiongcheng river section. By reproducing the natural water and sediment conditions of the river section from February 2022 to March 2023, the rationality of the model design, sediment selection, and various scales is verified. Model tests are conducted in typical and series years to analyze changes in riverbed scour and deposition, as well as the evolution of shoal-channel patterns in the Xiongcheng river section after the implementation of the waterway regulation project. The results show that after implementation of the remediation plan, the riverbed of the river section has been eroded, the pattern of the beach and channel has not changed much, and the navigation conditions have significantly improved, which can achieve the remediation goals. Local erosion pits have appeared at the head of the stone throwing prism in the straight transition section on the west side of Baxingzhou, and there has been a certain degree of siltation in some areas of the Qigongling bend section at the end of each year, with the largest at the end of 4 years, which requires maintenance and dredging to ensure smooth flow. It is recommended to strengthen the observation of the Qigongling and Qixingzhou bends after the implementation of the project. If there are adverse changes or navigation problems, timely maintenance measures should be taken to ensure smooth navigation.

Keywords: Xiongcheng river section; channel regulation; effect prediction

收稿日期: 2025-04-06 录用日期: 2025-05-16

作者简介: 於龙(1987—), 男, 工程师, 从事长江航道整治工程的项目质量监督管理工作。

熊家洲—城陵矶河段位于“九曲十八弯”的荆江河段尾闾。该河段多急弯、险流, 航道条件差, 且洞庭湖在该河段出口入汇, 汇流区的水流掺混现象严重, 进一步增加了河段水流条件的复杂性, 使其成为长江流域最危险的河段之一^[1-3]。

国内外已有研究^[4-7]多关注于熊家洲—城陵矶河段水流和泥沙特性。刘胜琪等^[7]研究下荆江急弯段的水流动力结果表明, 七弓岭急弯段 2002—2016 年的水流动力轴线大幅左摆, 水流冲刷动力在凸岸增强, 凹岸减弱, 七弓岭弯顶上游的断面平均环流强度递减, 凹岸沙洲的二次流已非常微弱, 导致泥沙淤积。雷雪婷等^[8]对熊城河段水流特性研究结果表明, 该河段受河道弯曲狭窄、河中洲滩高度不高及洞庭湖入汇等影响, 三维水流结构特性明显, 表现为横流、环流和回流等特点。赵占超等^[9]对熊城河段河床演变规律表明, 该河段主要以枯水河槽冲刷为主, 深槽有所刷深拓展, 弯道进口至弯顶段河势调整变化相对较大, 切滩撇弯现象进一步发展, 部分地方发生崩退或有崩退趋势。

动床物理模型试验的研究方法在长江航道整治方案比选和效果预测等领域应用效果良好。游

强强^[10]采用动床模型试验的研究方法对湖广—罗湖洲河段 6 m 水深航道整治工程的整治效果进行了预测, 结果表明该工程有利于主航槽航道条件的维持。方佳敏等^[11]采用动床模型试验的研究方法对长江下游贵池水道航道治理工程方案进行比选, 确定了推荐方案。

前述研究多关注于熊城河段的水流泥沙特性, 较少关注该段航道条件的发展状况, 目前荆江二期航道整治工程已开工, 本文采用效果较好的动床模型试验研究方法, 建立了熊家洲—城陵矶河段的物理模型, 研究熊城河段航道整治实施后, 该河段的航道条件变化情况, 旨在为后续该河段的航道维护提供相应的建议。

1 河道概况

熊城河段(熊家洲—城陵矶河段)上起熊家洲、下至城陵矶, 全长约 40 km, 由熊家洲、七弓岭及观音洲 3 个连续弯段及弯道之间的过渡段组成, 属于典型的蜿蜒型河道。洞庭湖于城陵矶处汇入长江, 其出流与研究河段出流相互顶托。熊城河段近期河势见图 1。

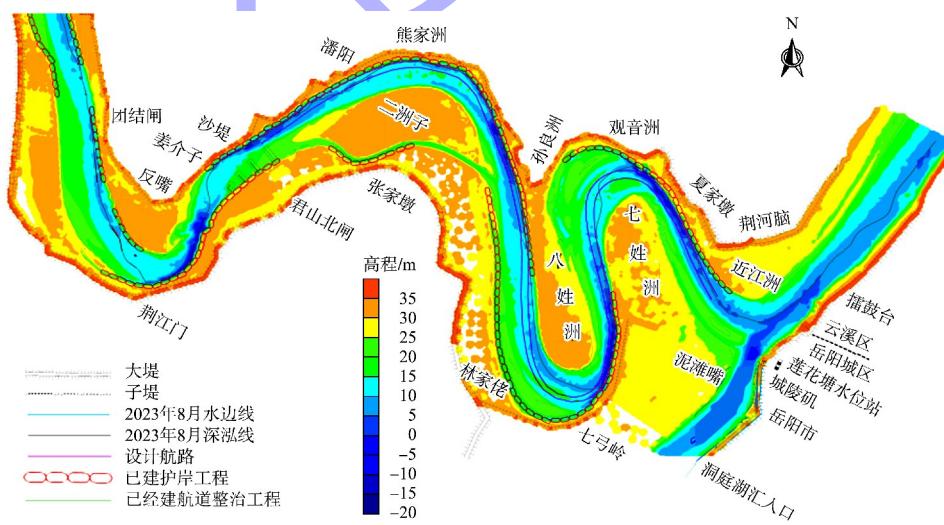


图 1 熊城河段近期河势

Fig. 1 Recent river conditions in Xiongcheng river section

2 熊城段演变特点及碍航特性

2.1 演变特点

三峡水库蓄水以前, 熊家洲—城陵矶河段的河床演变总体表现为弯道段凹岸冲刷、凸岸淤积、

弯顶下移, 整个弯道向下游蠕动。三峡水库蓄水后, 受中水历时延长、来沙大量减少的持续影响, 河段的河床演变总体表现为弯道上段的凸岸高滩崩塌、凸岸侧河床刷深, 凹岸侧河床淤积, 部分

弯道发生了切滩撇弯。

熊家洲弯道，呈现明显的“凸冲凹淤”，深泓总体偏靠凹岸侧，位置相对较稳定，受弯顶段凸岸侧河床冲刷的影响，河心浅滩淤积，枯水期 4.5 m 槽由单槽向双槽转化。

七弓岭弯道，自狭颈一带至凸岸弯顶高滩持续崩塌、前沿河床冲刷成槽，凹岸侧河床淤积，深泓于 2010 年汛后发生了撇弯，航槽移至凸岸侧，凹岸槽以倒套形式存在。

七洲弯道，凸岸边滩上冲下淤，凹岸边滩向河心展宽。窑嘴以上段深泓总体向凸岸侧摆动，深泓顶冲点下移，下段深泓变化较小。

沙嘴弯道，呈现明显的“凸冲凹淤”，凸岸侧高滩持续崩塌、前沿河床冲刷，下泥滩有所淤积，断面宽浅变化，深泓在凸岸侧和凹岸侧摆动频繁。

2.2 碍航特性

熊城河段存在的问题在于受“凸冲凹淤”影响的 4 个弯道段，且主要是河床“凸冲凹淤”过程中出现的高滩岸线的崩退、凸岸边滩冲刷以及凹岸侧深槽淤积，使得原凹岸槽航道水深不足、航槽位置不稳定、弯曲半径不足以水流流态较差。熊家洲弯道段近几年基本可以满足 4.5 m×200 m 航道尺度，但枯水期 4.5 m 槽由单槽向双槽转化，且小水年凸岸冲刷进一步加剧，弯顶处航槽进一步缩窄，航道条件有所变差；七弓岭弯道段过渡段深泓极不稳定，航宽长期不能达到 200 m，同时部分年份深泓偏靠凸岸侧时航槽弯曲半径不足 1 000 m；七洲弯道段虽然近几年可以满足 4.5 m×200 m 的航道尺度，但是弯顶处弯曲半径不能满足 1 050 m 的设计要求，且水流顶冲点下移到窑嘴后，该处水流流态较紊乱，影响船舶航行安全；沙嘴弯道段河道展宽，主流易摆动，近几年可维持 4.5 m×200 m 的航道尺度。

3 整治方案

3.1 整治思路

为将熊城河段航道尺度提高至 4.5 m×200 m×1 050 m（七弓岭弯道段航宽不低于 150 m），该工

程的航道整治思路为：基于已建工程，完善控制、局部调整、适当疏浚，即进一步加大关键滩体和岸线的守护力度及范围，对不满足整治目标尺度水道的滩槽形态进行适度调整，对航道条件不稳定水道的航道边界进行控制完善，并辅以疏浚（基建疏浚和不利年份维护性疏浚）措施，达到提高航道尺度的目的。

3.2 整治方案

熊城河段整治工程包括以下内容：

1) 熊家洲弯道凸岸护底工程。在熊家洲弯道凸岸侧修建 4 道护底带，护底带长度分别为 403 m（含勾头 200 m）、440 m（含勾头 200 m）、247 m、238 m，纵轴线坝体部分高程分别按设计最低通航水位下 3.5、4.5、6.5 和 7.5 m 控制，勾头段护底宽 180 m（轴线两侧均为 90 m）；对熊家洲弯道凸岸长 2 620 m 高滩岸线进行守护。

2) 熊家洲弯道乱石堆清理工程。对熊家洲弯道上段航道内及航道边缘两处乱石堆进行清理，设计底高程按设计水位下 6.5 m。

3) 熊家洲弯道凹岸护岸加固工程。对熊家洲弯道凹岸长 2 715 m 岸线进行水下加固。

4) 八姓洲狭颈护岸加固工程。对八姓洲狭颈段长 2 708 m 岸线进行水下加固。

5) 七弓岭弯道凸岸高滩守护工程。对七弓岭弯道上段凸岸长 3 453 m 的高滩岸线进行守护。

6) 七弓岭凹岸护岸加固工程。对七弓岭弯道凹岸长 1 130 m 护岸进行水下加固。

7) 疏浚工程。对熊家洲弯道下段浅区进行疏浚，保障 4.5 m 航槽畅通，疏浚面积约为 0.3 万 m²；对七弓岭弯道浅区进行疏浚，开槽引流，引导枯水水流向航槽集中，疏浚面积约为 40 万 m²；对七洲弯道浅区进行疏浚，疏浚面积约为 25 万 m²。疏浚底高程为设计最低通航水位下 4.5 m。

8) 窑嘴护岸改建工程。对七洲弯道凹岸窑嘴一带长 900 m 岸线进行守护，并对上段 300 m 的矶头进行削除，对中段 300 m 凹陷处水下进行生态修复。

4 整治方案动床模型建立

4.1 模型范围

模型试验范围为盐船套至螺山下游 4.5 km 处, 原型全长约 94 km。根据《河工模型试验规程》及试验内容要求, 该河段的动床模拟范围为盐船套至白螺断面, 原型长约 75 km。由于研究河段有洞

庭湖入汇, 洞庭湖汇流将直接影响到该河段的水流条件及河床冲淤变化, 因此模型对洞庭湖出口洪道进行模拟, 范围为南津港—莲花塘, 原型长约 14 km。动床模型范围为七里山—城陵矶, 原型长约 13 km。模型平面布置见图 2。

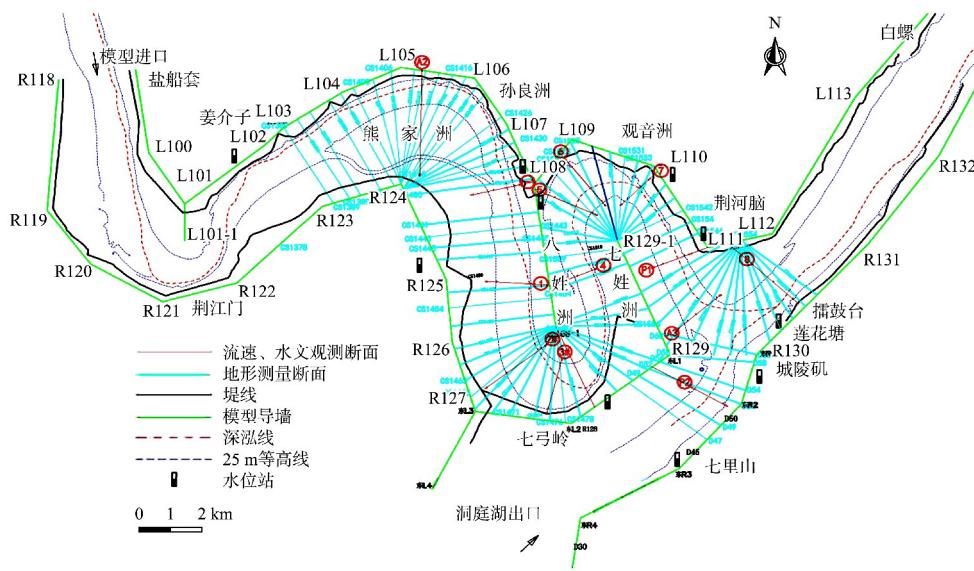


图 2 熊城河段模型试验平面布置
Fig. 2 Plan layout of model test of Xiongcheng river section

4.2 模型设计

保持与原型几何相似、水流运动相似以及泥沙运动相似的原则, 同时根据试验研究目的、试验场地条件及试验大厅以往河工模型试验的经验, 确定模型几何相似中的平面比尺为 400, 垂直比尺为 100, 现状条件下, 研究河段枯水期航道内水深一般大于 2.5 m, 平均流速约 1.2 m/s, 按上述拟定的模型几何比尺, 模型的最小雷诺数 $Re_m = 2147 > 1000 \sim 2000$ 。模型最小水深 2.5 cm > 1.5 cm 能够满足要求, 同时根据以往变态模型的试验成果与原型资料对比, 以及长江科学院已完成的变率 e 为 1、2、4、6、8、10 的定床与动床系列模型试验研究成果表明, 在变率不大于 4 且模型宽深比大于 5 的条件下, 变态模型与正态模型的水流动力轴线、深泓线、冲淤部位和冲淤量基本一致。综上所述, 以上选定的模型几何比尺合理, 可满足试验要求。

水流运动相似中的流速比尺为 10, 粗糙率比尺为 1.08, 流量比尺为 400 000, 水流时间比尺为 40;

泥沙运动相似中的起动流速比尺为 10, 粒径比尺为 0.9, 沉速比尺为 2.5, 含沙量比尺为 0.75, 河床变形时间比尺为 194, 根据模型验证后调整为 135。选择 2023 年 3 月河床地形(1:10 000)作为动床模型试验的初始地形。

4.3 模型验证

本次动床模型验证试验中初始地形根据 2022 年 2 月实测的 1:10 000 河道地形图制作, 终止地形选用 2023 年 3 月实测的河道地形。根据模型所在河段河岸边界条件及历年的冲淤变化情况, 将河床高程 25 m 以上及有护岸工程处制作为定床, 以反映工程上下游河道的河势及冲淤变化特点。在模型中施放 2022 年 2 月—2023 年 3 月的天然水沙过程, 以复演 2023 年 3 月河道地形变化情况。在验证试验过程中, 河段采用长江干流监利站、洞庭湖出口七里山站实测水沙概化过程。模型验证试验结果表明, 2022 年 3 月—2023 年 3 月, 熊家洲弯道段原型以冲刷为主, 冲刷量为 717 万 m^3 ,

模型同期冲刷量 656 万 m^3 , 误差 8.5%; 七弓岭弯道段原型淤积量为 366 万 m^3 , 模型淤积量 326 万 m^3 , 误差 10.9%; 七洲弯道段以淤积为主, 原型淤积量 1 347 万 m^3 , 模型淤积量 1 250 万 m^3 , 误差 7.2%; 沙嘴弯道段原型淤积量 184 万 m^3 , 模型淤积量 166 万 m^3 , 误差 9.7%; 模型河段总体冲淤总量与原型基本接近, 误差为 7.9%。因此, 模型设计、选沙及各项比尺的确定合理, 能够保证模型的相似可靠性。

4.4 典型年水沙条件选取

三峡工程蓄水运用后, 蓄水前的水沙过程难以再现, 因此, 为符合今后的实际情况, 典型年应重点选取蓄水以后的年份, 尤其是 2014 年以来三峡工程等上游梯级水库群运行以来的年份。

考虑到荆江河段汛淤枯冲变化特点较为显著, 最近发生的大洪水年份是 2020 年, 从 2020 年 4 月—2021 年 3 月, 熊家洲弯道、七弓岭弯道、七姓洲弯道航道条件均向不利方向变化。同时大水年对工

程区滩体稳定性不利。因此, 典型年选择 2020 年。水沙条件概化过程见表 1、图 3。

表 1 2020 年典型年模型试验参数

Tab. 1 Model test parameters for typical year 2020

流量级	原型流量/(万 $m^3 \cdot s^{-1}$)	原型历时/d	模型历时/min	模型流量/(L $\cdot s^{-1}$)	尾门水位/cm	加沙量/kg
1	0.764 7	59	629	19.12	18.66	20.7
2	0.981 8	95	1 013	24.55	20.92	41.8
3	1.342 3	13	139	33.56	24.05	9.0
4	1.860 0	7	75	46.50	25.43	16.7
5	2.410 0	7	75	60.25	27.12	24.9
6	2.893 3	9	96	72.33	29.30	45.0
7	2.265 0	10	107	56.63	31.13	22.9
8	3.272 1	14	149	81.80	31.43	69.5
9	2.794 2	12	128	69.85	30.17	49.7
10	3.256 0	5	53	81.40	29.50	22.5
11	3.703 8	8	85	92.59	29.93	131.4
12	2.710 0	8	85	67.75	29.74	129.0
13	2.160 4	23	245	54.01	28.03	67.9
14	1.848 2	22	235	46.20	27.16	36.6
15	1.446 1	23	245	36.15	24.37	23.0
16	1.109 7	10	107	27.74	20.58	7.6
17	0.822 5	41	437	20.56	18.31	23.2

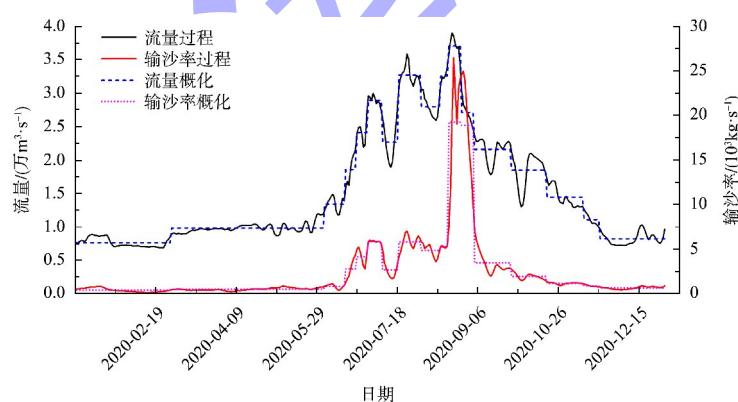


图 3 2020 年水文过程概化图

Fig. 3 Generalized hydrological process diagram in 2020

4.5 系列年水沙条件选取

2013 年为上游向家坝、溪洛渡等水库群纳入三峡水库蓄水调度的开始年份, 因此在 2013 年以后的水沙年份中选择系列年将具有更好的代表性。

监利站系列年水文特征见表 2, 由表可知, 2014 和 2018 年的径流量较 2013—2023 年的年均径流量偏大, 特别是 2020 年来水最大; 2013、

2015、2022、2023 年为小水年。年均输沙量随径流量发生波动, 总体呈下降趋势。除 2018、2020 年大水年年均输沙量偏大外, 其他年份年均输沙量总体较小。另外, 2018、2020 年为典型的大水中沙年, 2017、2019 年为中水小沙年, 2022 年为小水小沙年。

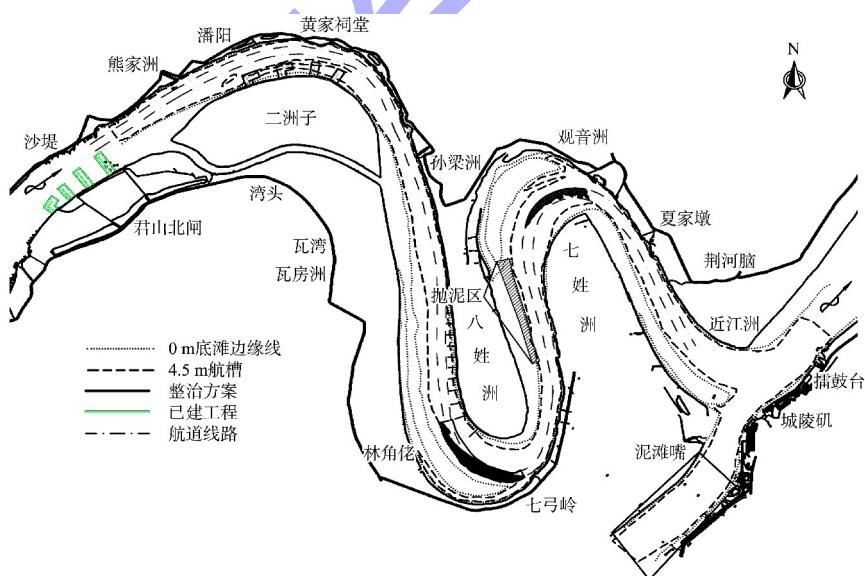
因此, 选取 2017—2022 年开展模型试验, 分

析熊城河段河床冲淤、滩槽格局等变化, 预测河床演变趋势。所选取的系列年基本涵盖大(2018、2020、2021 年)、中(2017、2019 年)、小(2022 年)水年, 具有一定代表性。

表 2 监利站系列年水文特征

Tab. 2 Multi-year hydrological series characteristics of the Jianli Station

年份	水沙状态	年均径流量/ 亿 m ³	年均输沙量/ 亿 t
2013	小水中沙	3 467	0.564
2014	中水中沙	3 990	0.527
2015	小水小沙	3 590	0.331
2016	中水小沙	3 853	0.329
2017	中水小沙	3 953	0.290
2018	大水中沙	4 176	0.732
2019	中水小沙	3 942	0.425
2020	大水中沙	4 750	0.751
2021	大水小沙	4 228	0.423
2022	小水小沙	3 368	0.195
2023	小水小沙	3 309	0.226
2013—2023		3 875	0.436

图 4 整治方案实施后典型年航深
Fig. 4 Navigable depth for typical years after regulation project implementation

5.2 系列年整治效果分析

5.2.1 河道冲淤变化

根据整治方案系列年模型试验 4、6、10 a 末

5 整治效果预测

5.1 典型年整治效果分析

典型年试验年末河床变化情况见图 4, 试验结果表明, 整治方案实施后, 熊城河段滩槽格局基本稳定, 河势未发生明显调整。

熊家洲弯道凹岸深槽有一定冲刷, 改善了熊家洲弯道枯水时水流分散、双槽分流的不利局面, 航道尺度可以达到 $4.5\text{ m} \times 200\text{ m}$, 熊家洲弯道凸岸高滩岸线及护底带之间发生淤积, 淤积高度不超过 2 m, 且 0 m 低滩边缘线基本不变。

七弓岭弯道凸岸高滩守护工程抛石棱体头部与河道中部冲刷, 4.5 m 航槽右移并有所展宽, 弯道进口弯曲半径得到改善(较初始地形增加约 80 m), 弯道段由于疏浚工程的实施, 4.5 m 航槽最窄处超过 150 m, 可保障 4.5 m 航槽贯通, 但八姓洲西侧顺直过渡段实施的高滩守护工程中多个抛石棱体头部出现不同程度冲刷坑。

七洲弯道段通过疏浚可保障 $4.5\text{ m} \times 200\text{ m}$ 航槽贯通(局部 250 m), 窑嘴护岸改建后七洲弯道出口回流减小, 局部流态改善。

的河道冲淤量来看, 试验河段在未来 10 a 处于冲刷状态, 且为滩槽均冲, 以枯水河槽冲刷为主, 其中 4 a 末冲刷强度最大。由于整治工程的实施, 八

姓洲西侧顺直过渡段冲刷强度较无工程有所减弱, 熊家洲、七弓岭等弯道段冲刷强度较无工程有所增强。具体来看, 枯水流量下熊城河段 4、6、10 a 末累计分别冲刷 3 814 万、4 487 万、7 634 万 m^3 , 枯

水河槽平均冲深 0.30、0.23、0.24 m/a; 4、6、10 a 末枯水河槽累计冲深 1.19、1.40、2.38 m, 冲刷量及冲刷强度较无工程趋势预测系列年各年末均有所增大, 熊城河段冲淤统计见表 3。

表 3 熊城河段冲淤

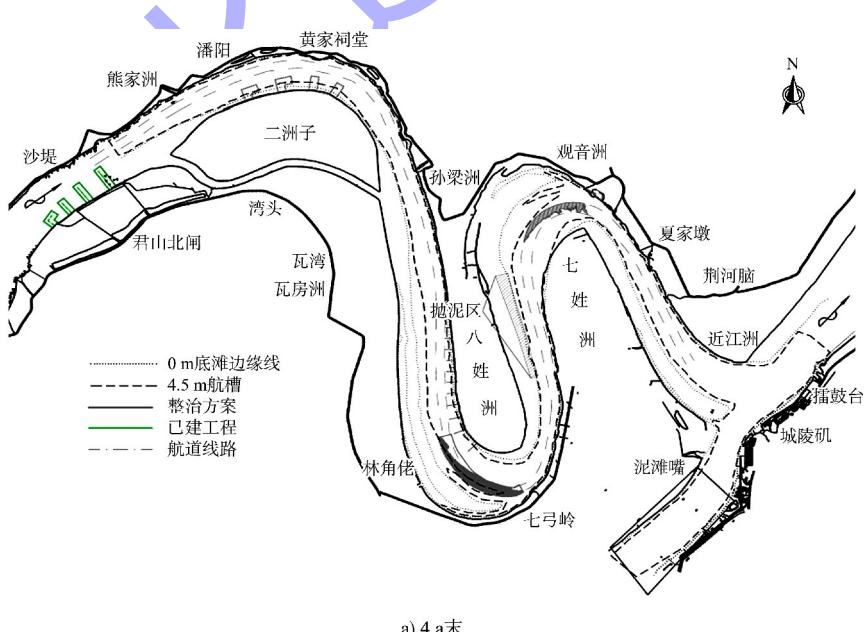
Tab. 3 Scour and siltation of the Xiongcheng river section

时段	起始断面	长度/km	冲淤量/万 m^3			枯水河槽冲深/(m·a ⁻¹)	
			枯水河槽	基本河槽	平滩河槽	平均	累计
4 a 末			-3 814	-4 217	-4 082	-0.30	-1.19
6 a 末	CS1400—CS1571	32	-4 487	-4 715	-4 686	-0.23	-1.40
10 a 末			-7 634	-8 215	-8 070	-0.24	-2.38

5.2.2 滩槽格局及航道条件变化

系列年结果见图 5, 整治方案实施后研究河段河床有所冲刷, 滩槽格局变化不大。熊家洲弯道水流分散有所改善, 航道尺度可以达 4.5 m×200 m, 不同区域规划航槽内 4.5 m 最小航宽统计见表 4, 但弯道凸岸侧倒套仍存在, 10 a 末熊家洲弯道中下部凸岸高滩淤积。八姓洲西侧顺直过渡段抛石棱体头部受水流冲刷均有一定程度破坏, 系列年第 4、6、10 a 末抛石棱体头部局部冲刷坑始终存

在。七弓岭弯道段疏浚区域各年末均有一定幅度回淤, 其中 4 a 末最大, 回淤量约 30 万 m^3 , 6、10 a 末七弓岭弯道弯顶区域规划航槽内也存在局部碍航浅区, 需要进行维护疏浚才能保障畅通。七洲弯道段上游顺直过渡段主流贴岸, 岸线崩退明显, 弯顶附近拟疏浚区域各年末均有一定幅度回淤, 4 a 末回淤最大, 回淤量超 20 万 m^3 , 为满足 4.5 m 航道尺度, 需进行维护疏浚。窑嘴护岸改建后各年末七洲弯道出口回流明显减弱, 局部流态得到改善。



a) 4 a 末

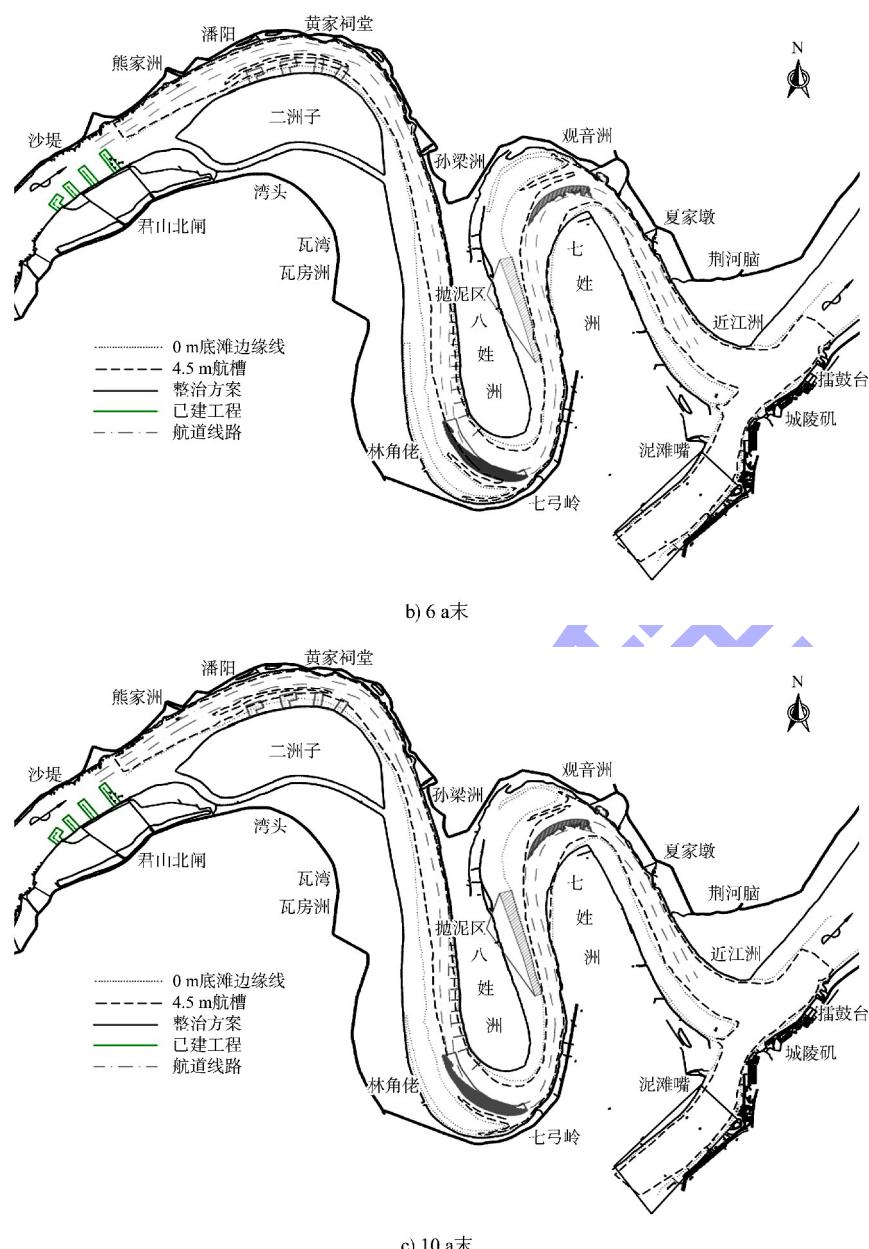


图 5 整治方案实施后系列年航深
Fig. 5 Multi-year navigable depth series after regulation project implementation

表 4 整治方案实施后不同区域规划航槽内 4.5 m 最小航宽

Tab. 4 4.5 m minimum channel width within planned navigation channel in different regions after regulation project implementation

时段	熊家洲弯道	七弓岭弯道	七姓洲弯道	m
2023 年 3 月 初始地形	130	断开(存在碍航浅区)	140(存在多处碍航浅区)	
第 1 a 末	200	150(存在碍航浅区)	182(存在碍航浅区)	
第 4 a 末	200	71(存在碍航浅区)	150(存在碍航浅区)	
第 6 a 末	200	84(存在碍航浅区)	156(存在碍航浅区)	
第 10 a 末	200	109(存在碍航浅区)	168(存在碍航浅区)	

6 结论

1) 在验证动床试验过程中, 熊城河段采用长江干流监利站、洞庭湖出口七里山站实测水沙概化过程。模型验证试验结果表明, 模型设计、选沙及各项比尺的合理确定, 能够保证模型的相似可靠性。

2) 动床试验结果表明, 整治方案实施后研究河段河床有所冲刷, 滩槽格局变化不大, 航道条件明显改善, 可达到整治目标。但八姓洲西侧顺直过渡段抛石棱体头部局部冲刷坑较明显, 七弓

岭弯道段局部区域各年末均有一定幅度回淤，其中 4 a 末最大，需要进行维护疏浚才能保障畅通。

3) 建议工程实施后加强七弓岭、七姓洲弯道观测，若出现不利变化或碍航问题需及时采取维护措施保障航道通畅。

参考文献：

- [1] LIU T. Internal logic of water level and shipping logistics system based on system dynamics[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering. Dordrecht: Atlantis Press, 2015: 349-355.
- [2] 刘玉, 李景保, 李欢, 等. 三峡水库调洪调度对江湖汇流区洪水相互顶托的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 114-121, 129.
LIU Y, LI J B, LI H, et al. Effect of the Three Gorges Reservoir operation on flood inter-jacking in the confluence section of rivers and lakes [J]. Journal of water resources and water engineering, 2019, 30(2): 114-121, 129.
- [3] 渠庚, 郭小虎, 朱勇辉, 等. 三峡工程运用后荆江与洞庭湖关系变化分析[J]. 水力发电学报, 2012, 31 (5): 163-172.
QU G, GUO X H, ZHU Y H, et al. Change in relationship of Jingjiang river and Dongting lake after operation of Three Gorges Project [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2012, 31(5): 163-172.
- [4] 余康. 荆江-洞庭湖系统水动力特征与鱼卵漂流规律模拟[D]. 北京: 清华大学, 2019.
YU K. Simulation of hydrodynamics of the Jingjiang-Dongting river-lake system and drifting and transport of Yangtze's carp eggs[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [5] 易放辉, 彭赤彬, 李觅, 等. 下荆江七弓岭弯道裁弯的水情效应研究[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(5): 15-21.
YI F H, PENG C B, LI M, et al. Hydrological regime effect of Qigongling bend cut-off in the lower Jingjiang River [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(5): 15-21.
- [6] 袁帅. 下荆江七弓岭弯道崩岸与颈口裁弯水动力模拟[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
YUAN S. Bank Collapse process of Qigongling bend and its hydrodynamic numerical simulation of given neck cutoff in the lower Jingjiang River [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [7] 刘胜琪, 夏军强, 邓珊珊, 等. 下荆江急弯段河床形态调整对水流特性的影响[J]. 泥沙研究, 2023, 48(2): 9-16.
LIU S Q, XIA J Q, DENG S S, et al. Influence of riverbed geomorphic adjustment on flow characteristics in a sharp bend of the Lower Jingjiang Reach[J]. Journal of sediment research, 2023, 48(2): 9-16.
- [8] 雷雪婷, 李瀛, 单敏尔, 等. 长江中游熊城段水流特性研究[J]. 水运工程, 2024(4): 114-118.
LEI X T, LI Y, SHAN M E, et al. Flow characteristics of Xiongcheng reach in middle reaches of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2024 (4): 114-118.
- [9] 赵占超, 姚仕明, 唐峰, 等. 冲刷条件下熊城河段河床演变规律及趋势[J]. 水运工程, 2019(8): 134-140.
ZHAO Z C, YAO S M, TANG F, et al. Evolution law and trend of river bed in Xiongjiazhou to Chenglingji reach under erosion condition[J]. Port & waterway engineering, 2019(8): 134-140.
- [10] 游强强. 湖广—罗湖洲河段 6 m 水深航道整治工程动床物理模型试验研究[J]. 水运工程, 2019 (6): 111-118, 185.
YOU Q Q. Experimental study on dynamic bed physical model of Huguang: Luohuzhou river section of the 6 m depth channel regulation project [J]. Port & waterway engineering, 2019(6): 111-118, 185.
- [11] 方佳敏, 田栋. 长江下游贵池水道航道治理工程方案[J]. 水运工程, 2022(1): 144-149.
FANG J M, TIAN D. Waterway regulation scheme for Guichi waterway in the lower reach of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2022 (1): 144-149.

(本文编辑 赵娟)