



长江上游洛碛河段航道整治工程 对鱼类生境影响研究*

付旭辉, 龚慧玲, 何京霖, 唐荣岭, 张波
(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: 近年来, 随航运经济飞速发展, 长江流域内航道整治工程频繁, 虽然航道整治工程能改善水流条件, 但也对鱼类栖息地有一定影响。为探究不同航道整治工程对鱼类生境影响, 以长江上游洛碛河段为例, 采用数值模拟方法, 从生态与水力学角度对比分析洛碛段航道整治工程前后四大家鱼的鱼类生境适宜性变化情况。结果表明: 航道整治工程后, 鱼类栖息地非常适宜区间的面积占比最多增长了1.21%, 不适宜区间的面积占比最多降低了1.85%, 并且上洛碛副槽随水位和流量增加, 会产生适宜生存的栖息地环境。

关键词: 航道整治; 四大家鱼; 生境适宜性

中图分类号: U617; S931.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0110-09

Influence of waterway regulation project on fish habitat in Luoqi Reach of upper reaches of the Yangtze River

FU Xuhui, GONG Huiling, HE Jinglin, TANG Rongling, ZHANG Bo
(National Engineering Technology Research Center for Inland Waterway Regulation,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of shipping economy, waterway regulation projects are frequent in the Yangtze River basin. Although waterway regulation projects can improve flow conditions, they also have a certain impact on fish habitat. To explore the impact of different waterway regulation projects on fish habitat, we take Luoqi Reach of the upper reaches of the Yangtze River as an example, and use numerical simulation method to compare and analyze the changes of habitat suitability of Four Major Chinese Carps before and after the waterway regulation project from the perspective of ecology and hydraulics. The results show that after the waterway regulation project, the very suitable area ratio of fish habitat increases by 1.21% at most, and the unsuitable area ratio decreases by 1.85% at most. Moreover, with the increase of water level and flow, the sub channel upstream of Luoqi will produce a suitable habitat environment for survival.

Keywords: channel regulation; Four Major Chinese Carps; habitat suitability

航道整治是通过构造整治建筑物或其他工程等方法, 达到改善航道航行条件的目的。航道整治工程在施工期间, 不仅对水流流向、运动规律

等造成一定影响, 还会导致鱼类生态环境发生改变, 在施工完成一段时间后, 出现有利于鱼群生长的空间^[1]。常留红等^[2]根据数学模型和现场监

收稿日期: 2024-05-08

*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(KJCXZD2020030); 贵州省交通运输厅科技项目(GZJT2021-221-012); 长江航道局科研项目(CJHDJHT20211200041)

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。

测数据探讨丁坝群对鱼类生境影响;黄桂全等^[3]利用软件模拟不同流量下顺坝、丁坝坝体前后水动力、水质、生物量的变化趋势;李强等^[4]采用River2D软件进行鱼类栖息地的模拟,探讨丁坝对栖息地的改善作用;张新华等^[5]构建鱼类栖息地综合评价模型,研究淹没式丁坝(潜坝)布置形式对中华鲟栖息地的影响,结果表明适当的丁坝布置形式对整治河段内鱼类栖息地环境质量有明显改善作用;陈奕芬等^[6]对航道疏浚及筑坝固滩等工程河段鱼类分布进行探测;Thomsen et al.^[7]提供有关疏浚声音风险管理的指导,结果表明对疏浚声音风险有效指导并通过疏浚更有利于达到适合鱼类栖息的环境,同时丁坝修建后缓流区的形成有利于增加喜好缓流鱼类栖息面积;林育青等^[8]在探究拆坝对生态系统的影响时发现,拆坝使河流生境类型、河床地貌等发生改变,造成鱼类生境变化;Deng et al.^[9]通过三维水动力模型获得了丁坝周围的水力学信息,对鱼类生理特征、水力学变化和水生态系统要素变化的综合分析,揭示丁坝对感潮河段鱼类生境的影响机制,研究成果可为丁坝修复水生生态系统的环境保护提供充分依据。

综上所述,众多学者关于航道整治后对鱼类

的影响有一定的研究,不同的航道整治工程对鱼类生境的改善程度是不一致的,其中对长江三峡水域里因航道尺度提升的鱼类生境影响程度研究还较为基础。本文选取航道整治区和四大家鱼资源保护区的洛碛段为研究河段,开展航道整治工程对鱼类生境适宜性的影响研究,对洛碛段鱼类多样性的保护和河流生态系统的恢复具有重要的现实意义。

1 工程概况

1.1 河道概况

洛碛河段主要包含上、下洛碛,见图1。上洛碛将河道分为左右两槽,右槽较顺直,河底高程较高,在流量达 $1.5 \text{万 m}^3/\text{s}$ 时,才有少量分流。枯水时,左槽受黔滩挑流而形成水流坐弯,曲率半径较小,过渡短、水深浅;当流量增大至 $1 \text{万 m}^3/\text{s}$ 时,左岸黔滩挑流减弱,而南屏坝左侧大背龙、麻儿角等石梁伸入江中又将水流逼向左岸,使右岸凹岸形成回流区,流速较缓。河段中部上洛碛附近,河道微弯,碛翅突出江心,伸向右岸,与右岸褙褙石、野鸭梁等礁石形成浅窄弯槽,为枯水期著名的弯浅险槽。这些石梁的存在不但使得水流紊乱,同时也造成船舶出浅。

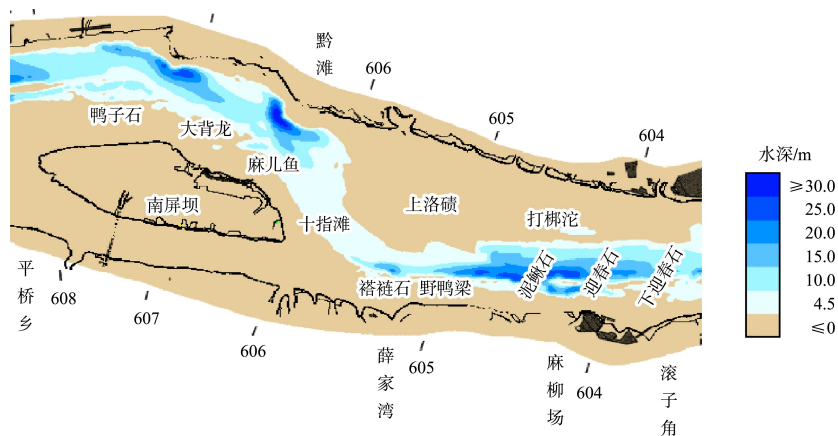


图1 洛碛水道河势

Fig. 1 River regime of Luoqi Reach

洛碛段碍航特性显著,航道整治工程频繁,2001—2002年,修建4座整治建筑物并进行浅区疏浚,满足了Ⅲ级航道尺度;2014年按照Ⅱ级航道尺度标准进行维护性疏浚,受地形影响,并没

有彻底改变洛碛航道状态。

1.2 航道整治工程

随航运经济发展,现阶段洛碛航运难以满足所需Ⅰ级航道尺度标准,特开展相应航道整治工

程, 见图 2。具体方案为对上洛碛右岸原有 1#、2#、4#(3#丁坝位于 2#丁坝顺坝掩护范围内)丁坝进

行加高延长, 形成 3 座新坝, 即 $L_1^{\#}$ 勾头丁坝、 $L_2^{\#}$ 丁顺坝、 $L_3^{\#}$ 勾头丁坝。

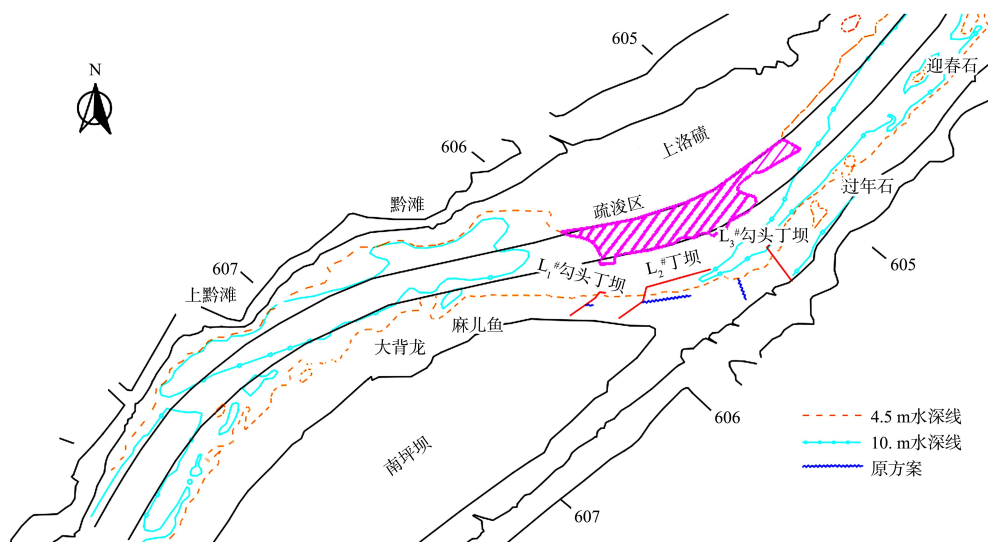


图 2 洛碛河段航道整治工程方案平面布置

Fig. 2 Plan layout of channel regulation project of Luoqi Reach

2 模型建立与验证

2.1 数学模型建立

本文利用 MIKE21 平面二维水动力模型建立太洪长江大桥施工期至虾子碛全长约 11.8 km 的数学模型。模型采用三角形非结构网格, 网格布置以控制地形为原则, 对地形变化较大、航道整治区进行局部加密。计算区域见图 3, 水尺、断面位置见图 4。

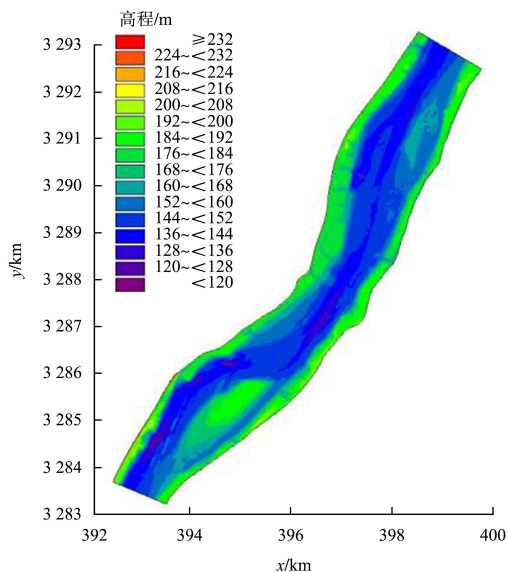


图 3 计算区域

Fig. 3 Calculation area

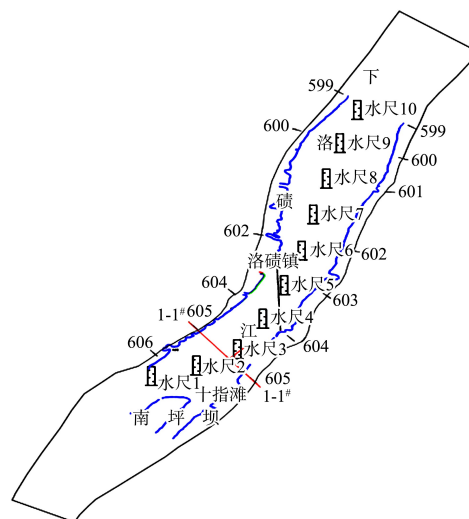


图 4 水尺、断面位置

Fig. 4 Position of staff gauges and section

2.2 数学模型验证

该河段实测水文资料见表 1, 水位、流速验证结果见表 2、图 5。

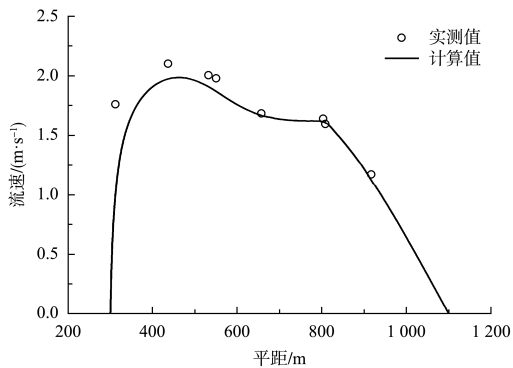
表 1 平面二维水流模型进出口边界条件

Tab. 1 Import and export boundary conditions of planar two-dimensional flow model

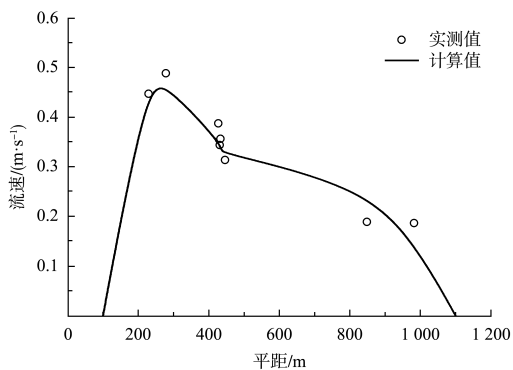
时间	时期	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	水位/m
2014 年 9 月	洪水期	19 600	165.00
2014 年 12 月	蓄水期	5 420	173.16
2015 年 3 月	消落期	4 800	163.47

表 2 水位验证结果
Tab. 2 Water level verification results

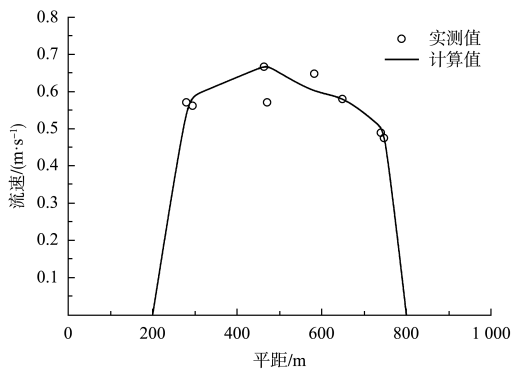
水尺	$Q=19\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$			$Q=5\ 420\ \text{m}^3/\text{s}$			$Q=4\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$		
	实测水位/m	计算水位/m	水位差/m	实测水位/m	计算水位/m	水位差/m	实测水位/m	计算水位/m	水位差/m
1#	165.34	165.32	-0.02	173.13	173.12	-0.02	163.47	163.47	0.00
2#	165.31	165.27	-0.05	173.11	173.12	0.00	163.47	163.47	0.00
3#	165.29	165.25	-0.04	173.12	173.12	0.00	163.48	163.47	-0.01
4#	165.27	165.25	-0.02	173.12	173.12	0.00	163.49	163.48	-0.01
5#	165.20	165.20	-0.01	173.15	173.13	-0.02	163.48	163.47	-0.01
6#	165.15	165.15	-0.01	173.14	173.13	-0.01	163.48	163.47	-0.01
7#	165.13	165.13	0.00	173.14	173.14	0.00	163.47	163.47	0.00
8#	165.10	165.12	0.02	173.14	173.15	0.01	163.46	163.47	0.01
9#	165.08	165.12	0.04	173.11	173.16	0.05	163.46	163.47	0.01
10#	165.06	165.11	0.05	173.10	173.17	0.07	163.46	163.47	0.01



a) $Q=19\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$



b) $Q=5\ 420\ \text{m}^3/\text{s}$



c) $Q=4\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$

图 5 1-1#断面流速验证结果

Fig. 5 Flow velocity verification results of section 1-1#

由表 2 可知, 模拟计算的沿程水位与实测水尺的水位差全部控制在 $\pm 0.1\ \text{m}$ 内, 说明本文研究区域所构建的平面二维水动力模型能较为准确的反映该河段的水位变化特性。由图 5 可知, 流速值最大误差大部分控制在 $\pm 0.10\ \text{m/s}$ 以内, 个别误差较大的测流断面不超过 $\pm 0.20\ \text{m/s}$, 计算的流速相对偏差基本控制在 $\pm 5\%$ 以内。

2.3 栖息地适宜性指数及其等级分区

栖息地适宜性指数 I_{HS} 直接由栖息地模型输出, 可应用栖息地适宜度评价, 取值范围为 $0\sim 1$, 计算公式为:

$$I_{\text{HS}} = (H_i V_i)^{0.5} \quad (1)$$

式中: H_i 为栖息地特征的重要性权重, 代表不同栖息地条件对物种适宜性的影响程度; V_i 为栖息地特征值, 即特定栖息地条件下物种所观察到的实际数值。

根据 I_{HS} 划分不同等级生境空间, 用以评价生境变化情况, 见表 3。

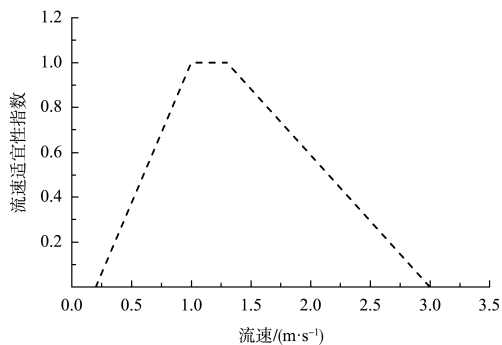
表 3 适宜性指数分级

Tab. 3 Suitability index classification					
程度	不适宜	较不适宜	基本适宜	适宜	非常适宜
I_{HS} 范围	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1]

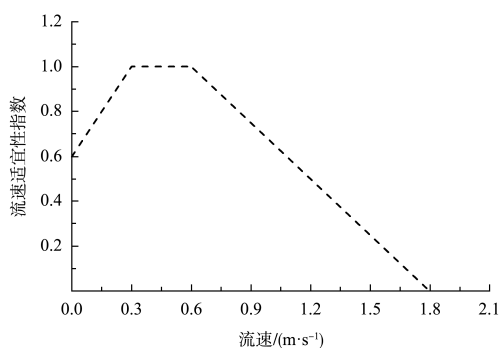
2.4 四大家鱼流速、水深适宜度曲线

四大家鱼流速、水深适宜度曲线见图 6。可以看出, 消落期和洪水期流速范围主要是在 $1\sim 3\ \text{m/s}$; 蓄水期流速基本分布在 $0.8\ \text{m/s}$ 以内。综合前人得出的影响适宜曲线^[10-11], 确定鱼类在消落期、洪水期的喜好流速为 $1.0\sim 1.3\ \text{m/s}$, 见图 6a); 蓄水期时的喜好流速为 $0.3\sim 0.6\ \text{m/s}$, 见图 6b); 消落

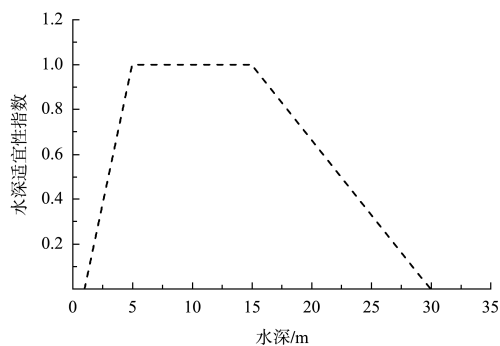
期和洪水期水深范围主要是在 3~30 m, 喜好水深 5~15 m, 见图 6c); 蓄水期水深最大可达 45 m, 喜好水深为 20 m 以上, 见图 6d)。



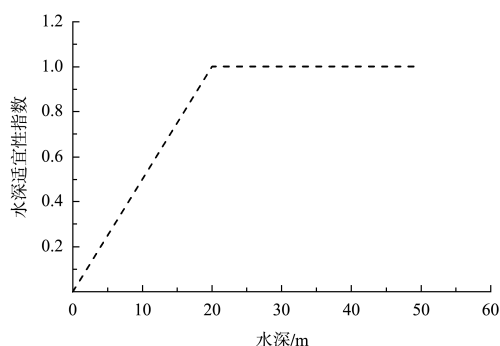
a) 消落期和洪水期流速适宜性指数



b) 蓄水期流速适宜性指数



c) 消落期和洪水期水深适宜性指数



d) 蓄水期水深适宜性指数

图 6 四大家鱼流速、水深适宜度曲线

Fig. 6 Flow velocity and depth suitability curves of Four Major Chinese Carps

3 数值模拟计算成果分析

3.1 计算工况

选定消落期、蓄水期和洪水期 3 种典型流量为本文研究的计算工况, 数值模拟的计算工况见表 4。

表 4 洛碛河段适宜性模拟计算工况
Tab. 4 Simulation calculation condition for suitability of Luoqi Reach

工况	时期	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	消落期	4 500
2	蓄水期	13 500
3	洪水期	39 200

3.2 水深适宜性变化

消落期、蓄水期和洪水期水深适宜性指数分布见图 7~9。可以看出, 该河段在消落时期, 水深适宜性指数在 0.8~1.0, 主要分布在河道中心, 航道整治工程实施后, 水深适宜性指数有一定程度提高; 该河段在蓄水期水深较大, 河道过水面积增大, 图示圆圈处基本没有变化, 除高程较高地区的水深适宜性指数在 0.2~0.6, 整个河段适宜性指数为 0.8~1.0 的范围分布最多; 该河段在洪水期河道中心较深, 整个水深适宜性指数由河道中心向两岸转移, 且分布较不均匀, 而上洛碛南屏坝右岸副槽与主航槽连通性有进一步增加, 能满足水深适宜性指数在 0.8~1.0。

不同流量下, 工程前后各水深适宜性指数区间河道面积占河道总面积的百分比见图 10, 其中曲线 $S_1(Q=4\,500\text{ m}^3/\text{s})$ 、 $S_3(Q=13\,500\text{ m}^3/\text{s})$ 、 $S_5(Q=39\,200\text{ m}^3/\text{s})$ 为整治前, $S_2(Q=4\,500\text{ m}^3/\text{s})$ 、 $S_4(Q=13\,500\text{ m}^3/\text{s})$ 、 $S_6(Q=39\,200\text{ m}^3/\text{s})$ 为整治后。可以看出, 因上洛碛航道整治工程的实施, 在消落期工程后的不适宜的面积占比有小幅下降, 非常适宜的面积占比增加最多约 0.87%, 这种趋势随着流量和水位的增加面积占比逐渐减小; 在洪水期工程后不适宜面积占比增加约 0.03%, 非常适宜的面积占比降低 0.57%。这些表明, 航道整治工程对水深适宜性指数的影响较小, 在消落期有小幅正面提升作用。

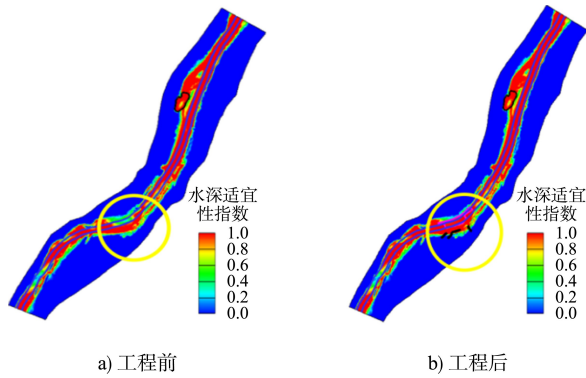


图 7 消落期水深适宜性指数分布
Fig. 7 Water depth suitability index distribution during subsiding period

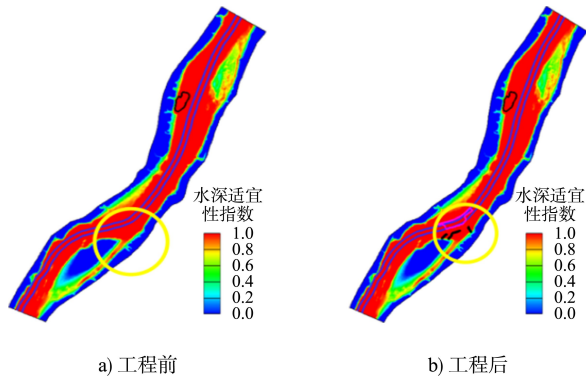


图 8 蓄水期水深适宜性指数分布
Fig. 8 Water depth suitability index distribution during storage period

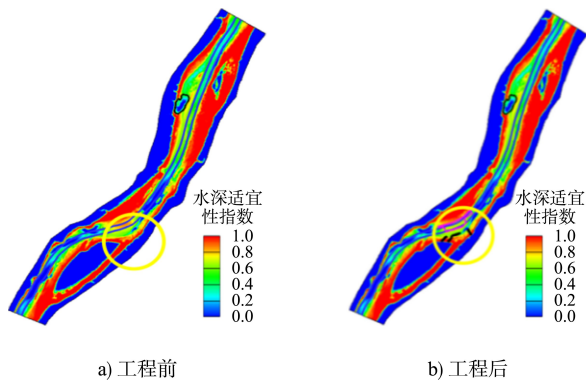


图 9 洪水期水深适宜性指数分布
Fig. 9 Water depth suitability index distribution in flood period

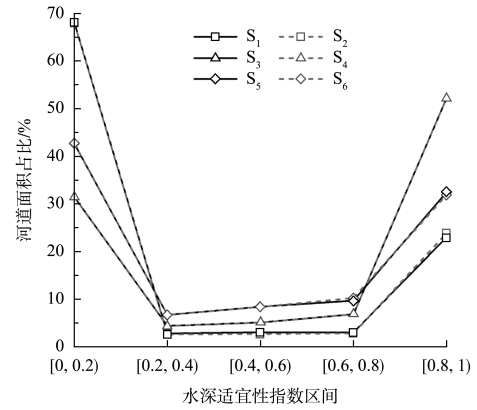


图 10 洛碛段工程前后各水深适宜性指数区间的河道面积占比
Fig. 10 Riveway area ratio of each water depth suitability index partition before and after Luoqi Reach project

3.3 流速适宜性变化

消落期、蓄水期、洪水期工程前后流速适宜性指数分布见图 11~13。可以看出, 航道整治工程实施后, 上洛碛的礁石区处因流速一定幅度提升而增加了流速适宜性指数; 圆圈处基本没有变化, 除高程较高地区的水深适宜性指数在 0.2~<0.6, 整个河段适宜性指数为 0.8~1.0 的范围分布最多; 该河段在洪水期, 随流量水位增大, 航槽中心的流速适宜性指数基本为 0~<0.2 的非常不适宜区间内, 上洛碛南屏坝右岸副槽与主航槽连通性进一步加强, 副槽流速适宜性指数在 0.8~1.0。

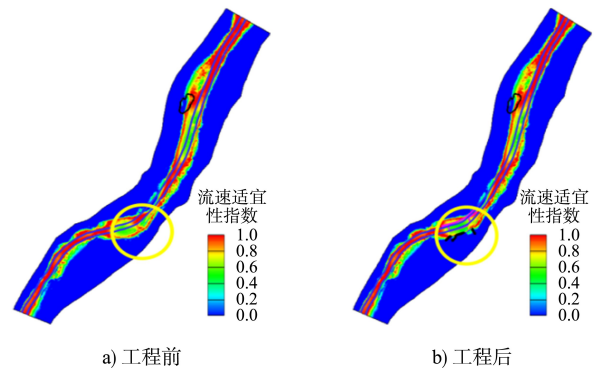


图 11 消落期流速适宜性指数分布
Fig. 11 Flow velocity suitability index distribution during subsidence period

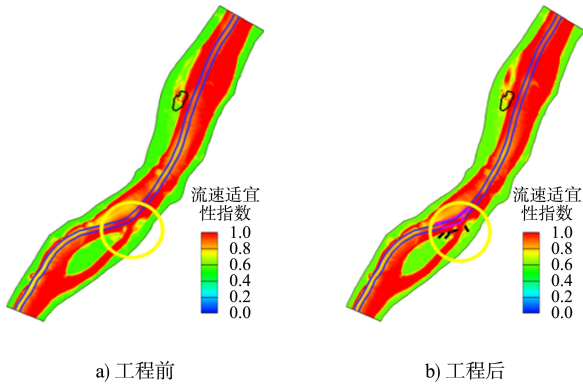


图 12 蓄水期流速适宜性指数分布
 Fig. 12 Flow velocity suitability index distribution during water storage period

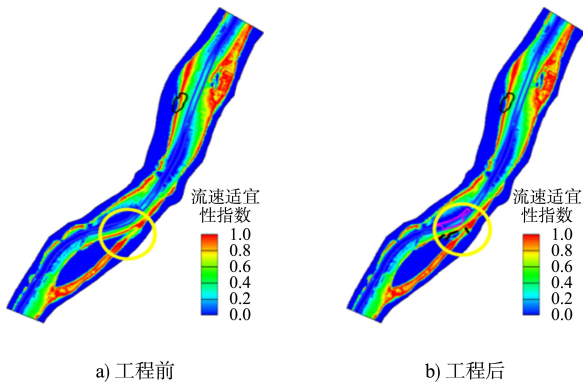


图 13 洪水期流速适宜性指数分布
 Fig. 13 Flow velocity suitability index distribution during flood period

不同流量下，工程前后各个流速适宜性区间河道面积占河道总面积的百分比见图 14。因上洛碛航道整治工程的实施，航槽内流速得以提升，流速适宜性指数也有一定的改善，在 $Q=4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，工程后的不适宜的面积占比降低了 1.5%，非常适宜的面积占比增加了 0.86%；在洪水期流量 $Q=39\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，不适宜的面积占比降低了 2.43%，非常适宜的面积占比增加了 2.26%，在蓄水期 $Q=13\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，非常适宜的面积占比由工程前 61.77% 增至工程后 62.31%，增幅不大。说明，航道整治工程对流速适宜性方面有正面影响。

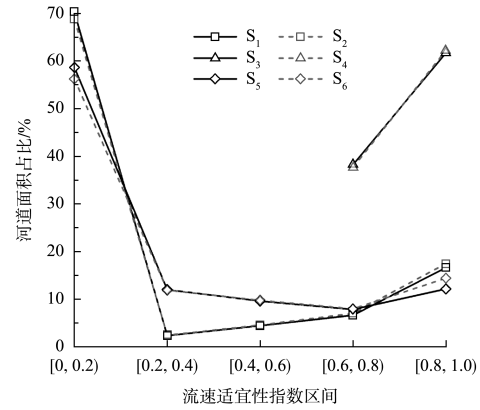


图 14 洛碛段工程前后各流速适宜性指数区间的河道面积占比
 Fig. 14 Riverway area ratio of each flow velocity suitability index partition before and after Luoqi Reach project

3.4 栖息地适宜性变化

消落期、蓄水期、洪水期工程前后栖息地适宜性指数分布见图 15~17。可以看出，该河段在消落期栖息地适宜性指数分布情况与流速适宜性指数分布特征基本相似，除蓄水期外，各区间的指数分布较为零散，存在不连续性。航道整治工程实施后，上洛碛的礁石区处因流速一定幅度提升而增加了流速适宜性指数；该河段在蓄水期水深较大，河道过水面面积增大，圆圈处基本没有变化，除高程较高地区的栖息地适宜性指数在 $0.2 \sim < 0.6$ ，整个河段适宜性指数在 $0.8 \sim 1.0$ 的范围分布最多；该河段洪水期深潭内的栖息地适宜性指数基本没有分布在 $0.8 \sim 1.0$ 区间的值，上洛碛南屏坝右岸副槽栖息地适宜性指数在 $0.8 \sim 1.0$ 之间，洛碛河段整体也是两岸分布适宜性指数大于河道中心适宜性指数。

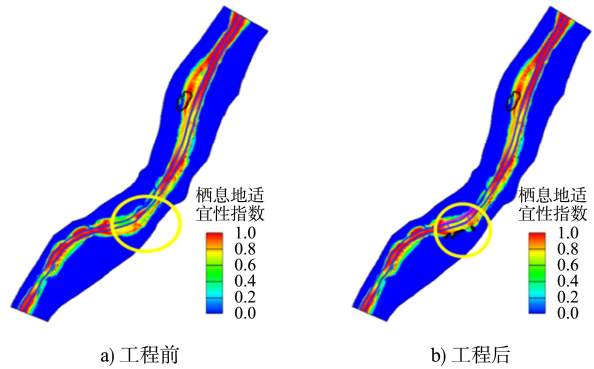


图 15 消落期栖息地适宜性指数分布
 Fig. 15 Habitat suitability index distribution during subsidence period

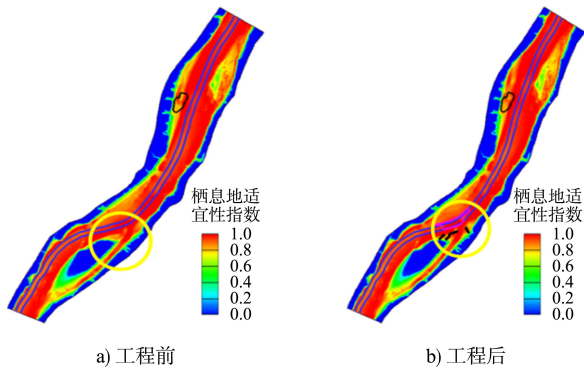


图 16 蓄水期栖息地适宜性指数分布
Fig. 16 Habitat suitability index distribution during water storage period

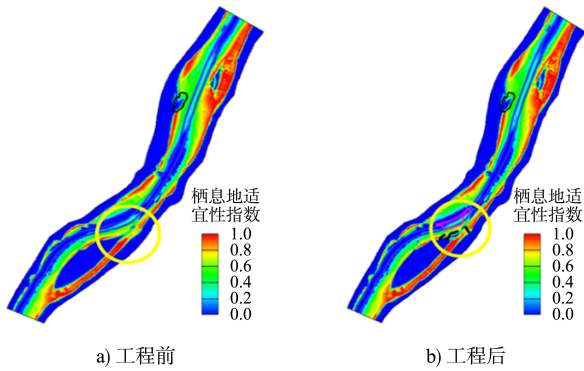


图 17 洪水期栖息地适宜性指数分布
Fig. 17 Habitat suitability index distribution during flood period

不同流量下, 工程前后各个栖息地适宜性指数区间河道面积占河道总面积的百分比见图 18。可以看出, 不适宜区间的面积占比在工程后基本有所降低, 最多降低了 1.85%, 较不适宜和基本适宜区间的面积占比变幅基本不大, 适宜区间的面积占比有增有降, 但总体增幅大于降幅, 而非非常适宜区间的面积占比最多增长了 1.21%。说明整个洛碛河段受航道整治工程的影响, 适宜生存的栖息地面积有一定改善。

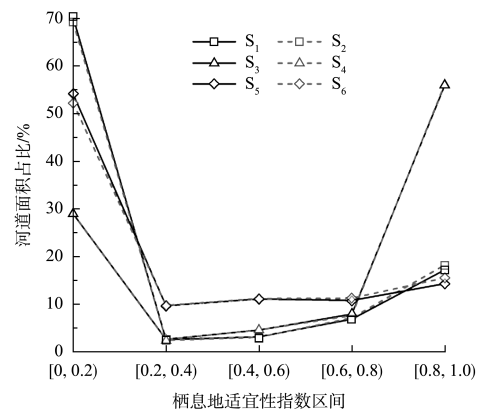


图 18 洛碛段工程前后各栖息地适宜性指数区间的河道面积占比
Fig. 18 Riverway area ratio of each habitat suitability index partition before and after Luoqi Reach project

4 结论

1) 在水深变化方面, 航道整治工程前后对水深适宜性指数基本没有影响, 在消落期时水位不高的情况下, 整治工程附近水深适宜性指数有一定程度的提升。

2) 在流速变化方面, 航道整治工程后, 航槽流速增大, 除蓄水期外的各个流量情况下, 航槽内流速适宜性指数均有所增加, 航道整治工程对流速适宜性有正面影响。

3) 在栖息地变化方面, 受水深、流速两个影响因子的综合影响, 上洛碛副槽随水位和流量增加, 产生了适宜生存的栖息地环境。

参考文献:

[1] 蒋宁, 蒋波, 雷国平. 航道整治对东流水道四大家鱼栖息地适宜度的影响[J]. 人民长江, 2019, 50(5): 5-9, 14.
JIANG N, JIANG B, LEI G P. Influence of waterway regulation project on habitat suitability index of Four Major Chinese Carps in Dongliu channel in lower Yangtze River[J]. Yangtze River, 2019, 50(5): 5-9, 14.

- [2] 常留红, 徐斌, 张鹏, 等. 深水航道整治丁坝群对鱼类生境的影响[J]. 水利学报, 2019, 50(9): 1086-1094.
CHANG L H, XU B, ZHANG P, et al. The influence of spur dikes for deep-water channel regulation on fish habitat[J]. Journal of hydraulic engineering, 2019, 50(9): 1086-1094.
- [3] 黄桂全, 李文杰, 万宇, 等. 长江上游航道整治建筑物不同流量下的生态效果[J]. 水运工程, 2024(2): 147-155.
HUANG G Q, LI W J, WAN Y, et al. Ecological effects of waterway regulation buildings in upper reaches of the Yangtze River under different discharges [J]. Port & waterway engineering, 2024(2): 147-155.
- [4] 李强, 刘锐, 李冰冻, 等. 航道整治丁坝对城区中小河流鱼类栖息地的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(19): 57-62.
LI Q, LIU R, LI B D, et al. Effect of spur dikes for waterway regulation on fish habitat in the small to middle scale municipal rivers [J]. Science technology and engineering, 2016, 16(19): 57-62.
- [5] 张新华, 邓晴, 文萌, 等. 弯曲分汊浅滩潜坝对洄游鱼类栖息地的影响研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(1): 18-28.
ZHANG X H, DENG Q, WEN M, et al. Impact of submerged spur dike on migrating fish habitat in bending branched shoal[J]. Advanced engineering sciences, 2020, 52(1): 18-28.
- [6] 陈奕芬, 黄春华, 王建平. 航道疏浚及筑坝固滩工程对东江河段鱼类栖息地影响研究[J]. 人民珠江, 2023, 44(S1): 84-88, 94.
CHEN Y F, HUANG C H, WANG J P. Study on the influence of channel dredging and dam strengthening on fish habitat in Dongjiang River reach [J]. People's Pearl River, 2023, 44(S1): 84-88, 94.
- [7] THOMSEN F, BORSANI F, CLARKE D, et al. WODA technical guidance on underwater sound from dredging[J]. Advances in experimental medicine and biology, 2016, 875: 1161-1166.
- [8] 林育青, 马君秀, 陈求稳. 拆坝对河流生态系统的影响及评估方法综述[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5): 9-15, 21.
LIN Y Q, MA J X, CHEN Q W. Research on effects of dam removal on river ecosystem and review of its assessment methods [J]. Advances in science and technology of water resources, 2017, 37(5): 9-15, 21.
- [9] DENG Y, CAO M X, MA A X, et al. Mechanism study on the impacts of hydraulic alteration on fish habitat induced by spur dikes in a tidal reach[J]. Ecological engineering, 2019, 134: 78-92.
- [10] 杨云平, 王建军, 刘万利, 等. 基于“四大家鱼”生境水力学指标的戴家洲河段航道工程生态效应模拟研究[J]. 长江技术经济, 2021, 5(4): 57-66.
YANG Y P, WANG J J, LIU W L, et al. Simulation study on the ecological effects of Daijiazhou Reach channel engineering based on the habitat hydraulic indexes of “Four Home Fishes” [J]. Technology and economy of Changjiang, 2021, 5(4): 57-66.
- [11] 王煜, 唐梦君, 戴会超. 四大家鱼产卵栖息地适宜度与大坝泄流相关性分析[J]. 水利水电技术, 2016, 47(1): 107-112.
WANG Y, TANG M J, DAI H C. Analysis on correlation between suitability of spawning habitat for Four Major Chinese Carps and discharge from dam [J]. Water resources and hydropower engineering, 2016, 47(1): 107-112.

(本文编辑 王聰)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部