



望龙碛航道整治工程河段 鱼类栖息地水动力指标分布

古梦婷¹, 钟亮^{1,2}, 王世鹏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. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 栖息地水动力环境对鱼类生存繁殖具有重要影响。针对长江上游望龙碛河段, 采用三维水流数值模拟方法探讨航道整治工程对河段内胭脂鱼产卵栖息地水动力指标的影响。结果表明: 河道各断面流速分布沿河宽呈“中间高、两边低”; 工程后各断面适宜产卵流速区域向右偏移, 且偏移量随流量增大而增加, 最大偏移量 60 m。涡量沿水深成层分布, 总体呈“底层大、表层小”; 工程后涡量较大值集中出现在工程区域附近及河道断面中部, 涡量沿垂线分布变化明显, 随着流量增大涡量变幅增加, 最大变幅 0.05 s^{-1} ; 动能梯度沿水深分布与涡量相似, 沿河宽方向动能梯度分布特征与深水区域分布表现出较强的相关性; 流量增大后各断面动能梯度最大值增加。工程后形成的复杂水动力条件有利于鱼类生存繁殖。

关键词: 航道整治; 鱼类栖息地; 水动力指标; 分布特征

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0097-09

Distribution of hydrodynamic indexes of fish habitat in reach of Wanglongqi waterway regulation project

GU Mengting¹, ZHONG Liang^{1,2}, WANG Shipeng¹

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The hydrodynamic environment of habitat has an important influence on the survival and reproduction of fish. Aiming at Wanglongqi Reach which is in the upper reaches of the Yangtze River, we use three-dimensional flow numerical simulation method to discuss the influence of waterway regulation project on the hydrodynamic indexes of the spawning habitat of *Myxocyprinus asiaticus*. The results reveal that the velocity distribution of each section of the river is “high in the middle and low on both sides” along the river width. After the regulation project, the optimum spawning velocity area of each section shifts to the right, and the offset increases with the increase of the flow, with the maximum offset of 60 m. The vorticity is distributed in layers along the water depth, with a general pattern of “large in bottom layer and small in surface layer”. After the regulation project, large vorticity values are concentrated in the vicinity of the project area and in the middle of the river section, and the vorticity distribution is changed significantly along the vertical line. With the increase of the flow rate, the vorticity variation amplitude increased, and the maximum variation amplitude is 0.05 s^{-1} . The distribution of kinetic energy gradient along water depth is similar to that of vorticity, and the characteristics of kinetic energy gradient distribution along river width are strongly correlated with water depth. The maximum kinetic energy gradient of each section is increased with the increase of flow rate. The complex hydrodynamic conditions formed after the regulation project are conducive to the survival and reproduction of fish.

Keywords: waterway regulation; fish habitat; hydrodynamic index; distribution characteristics

收稿日期: 2023-06-28

作者简介: 古梦婷 (1999—), 女, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学方面的研究。

长江黄金水道建设对推进长江经济带发展具有重要作用。目前长江上游碍航险滩众多，严重影响河段通航能力。望龙碛滩段位于长江上游叉鱼碛水道与上白沙水道交界段，因其独特地理位置发展为碍航枯水险滩，该河段是长江上游珍稀特有鱼类胭脂鱼的产卵场^[1]。整治工程实施后，或将改变河道水力特性，对河道内鱼类栖息环境产生影响。开展航道整治工程对鱼类栖息地水动力指标分布研究、对长江上游地区鱼类资源保护及生态航道工程建设等具有重要意义。

河道中的水文、水动力、河流形态等生态因素构成了鱼类赖以生存的栖息地环境，其中水动力是关键因素。鱼类栖息地水动力特征指标包括流速、涡量及动能梯度等。李芳等^[2]通过研究发现，鱼类产卵行为与栖息地水动力指标之间有密切响应关系；钟亮等^[3]发现河道内鱼类适宜产卵区域分布受流速影响较大；Ban 等^[4]、李洋^[5]关于鱼类栖息地水动力特征的研究表明，涡量、流速梯度及动能梯度是影响鱼类栖息行为的重要因素。针对整治工程影响鱼类产卵栖息地水动力指标的研究，Zhang 等^[6]、曹艳敏等^[7]选择流速、水深等指标模拟工程后栖息地鱼类适宜性情况；董朝峰等^[8]、张俊等^[9]探讨航道整治后产卵栖息地低速涡流区变化对鱼群产卵行为影响。目前在整治工程影响鱼类栖息地水动力指标方面，学者们较少从流速、涡量及动能梯度指标开展研究。本文以长江上游望龙碛滩险整治工程为例，以长江上游珍稀特有鱼类胭脂鱼为代表，采用三维水流数值模拟方法，探讨鱼类栖息地水动力指标在航道整治工程前后的分布特征。研究成果有助于丰富鱼类栖息地水动力指标分布问题的认识，并为生态航道整治及鱼类栖息地保护等提供科学参考。

1 工程区域概况

1.1 滩段特性

望龙碛滩段位于长江上游，航道里程 861.9~860.1 km，滩段河势呈顺直微弯形态。望龙碛滩段属枯水浅险滩且为典型展宽河段，望龙碛上游

放宽段流速平缓且趋于均匀，枯水期上游水面宽浅且无主流集中冲刷而形成的稳定深槽，常出浅碍航；河道中下段受江心卵石滩壅水影响，水流流态紊乱且横流强盛，船舶在此航行时易出险。

1.2 工程方案

望龙碛疏浚工程及两岸筑坝工程位置见图 1。方案拟对浅区部位进行挖槽疏浚，疏浚底高程为设计最低通航水位下 3.5 m，疏浚基线沿主航槽布置，控制基线长 1 230 m，疏浚区挖槽底宽约 80 m，以满足 3.5 m 等深线的宽度要求，同时辅以整治建筑物保持挖槽稳定；河道左侧布置丁顺坝，坝体总长 650 m，顺坝段长 310 m，丁顺坝用于调整水流流向，束水归槽增加主槽水流冲刷力度，同时减少消落期航槽淤积；河道右侧布置碛头坝，坝体长度为 750 m，碛头坝用于调整滩段比降，减弱横流，缓解枯水期险滩问题，确保船舶安全航行。

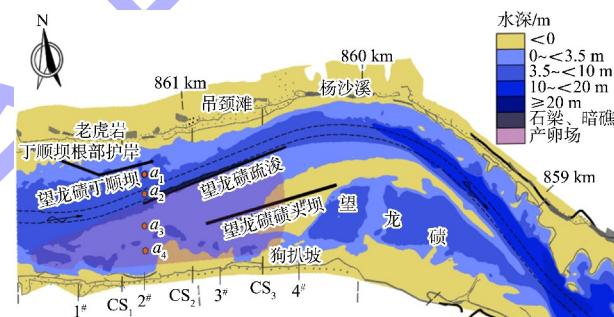


图 1 工程平面布置

1.3 目标鱼种

望龙碛河道内分布有多种珍稀鱼类，栖息于此河道的胭脂鱼为我国特有的珍稀鱼类。胭脂鱼属鲤形目胭脂鱼科，为国家二类水生野生保护动物，自然状态下分布于我国的长江和闽江，目前胭脂鱼种群在长江中的分布主要集中在长江上游宜宾—重庆段干流及部分支流、中下游葛洲坝下游一带^[10]，望龙碛整治工程河段的胭脂鱼产卵场位置见图 1。胭脂鱼为静水性鱼类，生长期喜好在水面宽阔、水流较缓且多河滩的江段摄食育肥；繁殖期多选择水流湍急、流态紊乱多砾石的江段进行产卵^[11]。胭脂鱼产卵适宜流速为 0.9~1.6 m/s。

2 研究方法

2.1 模型建立

本文采用三维水流数学模型开展研究, 该模型基于三维不可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 方程的解, 并服从静水压力和 Boussinesq 湍黏性假设, 紊流模型引入了湍黏系数, 一般分为垂向湍黏系数和水平湍黏系数。空间离散采用有限体积法, 时间积分考虑半隐式。

1) 控制方程。连续性方程为:

$$S = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1)$$

动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} &= fv + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z}\right) + Su_s + \\ F_u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) - g \frac{\partial \eta}{\partial x} & \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} &= -fu + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial z}\right) + Sv_s + \\ F_v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) - g \frac{\partial \eta}{\partial y} & \end{aligned} \quad (3)$$

式中: S 为点源源项; t 为时间; x 、 y 、 z 为笛卡尔坐标的 3 个方向; η 为水面高程, 即水位; h 为总水深, 其值为 η 与 d 之和, d 为静水深; u 、 v 、 w 为沿 x 、 y 、 z 方向的流速分量; f 为柯氏力参数, 其值为 $2W\sin\varphi$ (W 为自转角速度, φ 为地理维度); ρ 为水的密度; p_a 为大气压强; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为波浪辐射应力张量的分量; u_s 、 v_s 分别为源项流向外界的 x 、 y 方向流速分量; F_u 、 F_v 为 x 、 y 方向的应力分量; ν_t 为垂向湍黏系数。

2) 紊流模型。由对数定律推导, 垂向湍黏系数 ν_t 为:

$$\nu_t = hU_\tau \left[c_1 \cdot \frac{d+z}{h} + c_2 \left(\frac{d+z}{h} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$U_\tau = \max(U_{\tau s}, U_{\tau b}) \quad (5)$$

式中: $U_{\tau s}$ 、 $U_{\tau b}$ 分别为水面、河底的摩阻流速, c_1 、 c_2 为常数。

水平湍黏系数 A 的公式为:

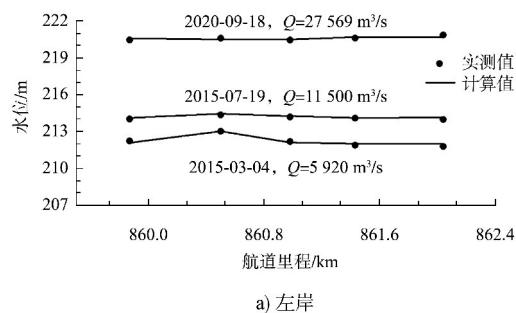
$$A = l^2 c_s^2 \sqrt{2S_{ij} S_{ij}} \quad (6)$$

式中: c_s 为常数, l 为特征长度, S_{ij} 为应变率。

2.2 模型计算与验证

以航道里程 860~863 km 河段为计算区域, 采用无结构三角形网格对计算河段进行网格剖分, 网格间距 20 m, 总体网格数为 15 433 个, 并对整治区域进行加密处理。进口流量采用朱沱水文站实测资料; 出口水位根据朱沱水文站及合江水文站实测资料, 采用一维水流数学模型推算得到; 固壁边界取法向流速为 0 m/s。根据本河段洪、中、枯 3 级流量下的实测水面线资料, 推算得到河段糙率在 0.029~0.035。

模型验证基于 2020 年 9 月、2015 年 7 月及 2015 年 3 月实测水面线资料及流速流向资料, 验证内容包括水位、流速和浮标流向分布。洪、中、枯 3 级流量下 ($27\ 569$ 、 $11\ 500$ 、 $5\ 920\ m^3/s$) 望龙碛滩段左岸及右岸水面线计算值与实测值比较见图 2, 水面线走势吻合度较高且水位偏差绝对值 0.10 m 以内。本文仅摘取 2020 年 9 月测次的部分断面流速进行对比分析, 望龙碛滩段断面流速实测值与计算值的比较见图 3, 流速的计算值与实测值较为一致, 两者偏差绝对值在 5% 以内; 实测 2# 断面的纵向流速垂线分布验证情况见图 4, 计算与实测流速大小偏差基本小于 0.01 m/s; 此外数学模型计算的流场流向与实测浮标迹线走向基本一致^[12]。以上验证结果满足 JTS/T 231-4—2018《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》^[13] 要求, 即本文采用的数学模型较为合理, 可用于下一步研究。



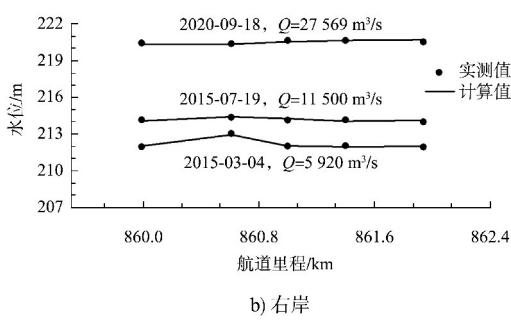


图 2 水位计算值与实测值比较

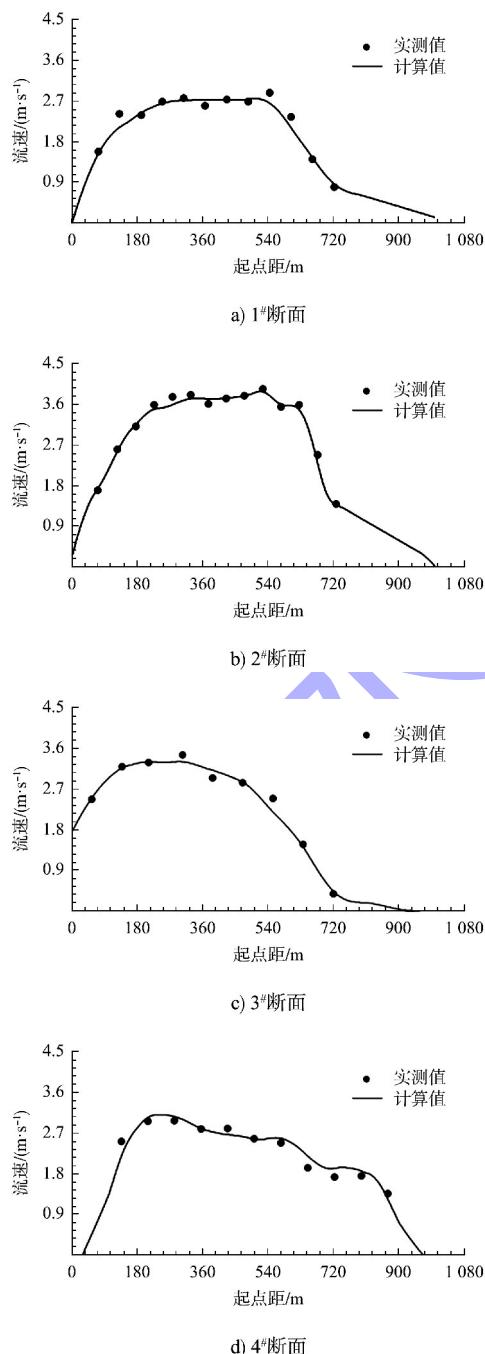


图 3 断面流速计算值与实测值比较

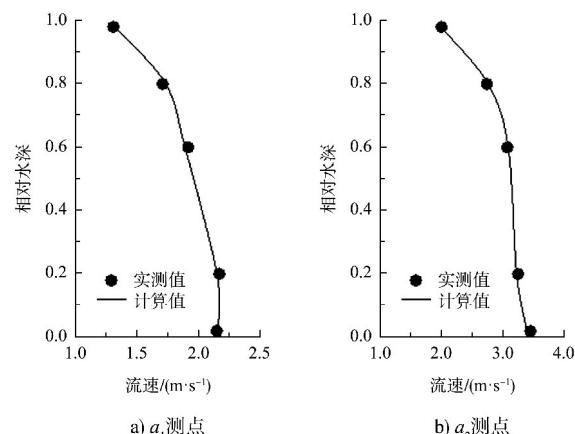


图 4 纵向流速垂线分布计算值与实测值比较

3 结果与讨论

胭脂鱼产卵时段集中在每年的3月下旬—4月上旬，此时长江正处于枯水期。考虑到高流量下此河段胭脂鱼不进行产卵行为，因此本文的数学模型计算仅选取此时段低流量和中流量(5 920 和 11 500 m^3/s)，计算工况见表 1。

表 1 数学模型计算工况

工况	朱沱 流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	赤水河 流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	朱沱 水位/ m	合江 水位/ m	进口 流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	出口 水位/ m	流量 特征
1	5 920	270	197.67	207.56	5 650	209.12	低流量
2	11 500	380	200.57	210.07	11 120	210.98	中流量

注：低流量为整治流量，参考了该河段的航道整治设计选取的枯水代表流量。

产卵场水动力指标包括流速、涡量、动能梯度。流速表征水体流动快慢，影响鱼类产卵行为，公式为：

$$v' = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (7)$$

横断面涡量 ω_x 表征水流的紊乱程度, 影响鱼类受精率, 公式为:

$$\omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (8)$$

当涡旋顺时针转动时, 涡量为负值; 当涡旋逆时针转动时, 涡量为正值。

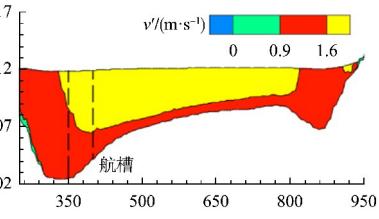
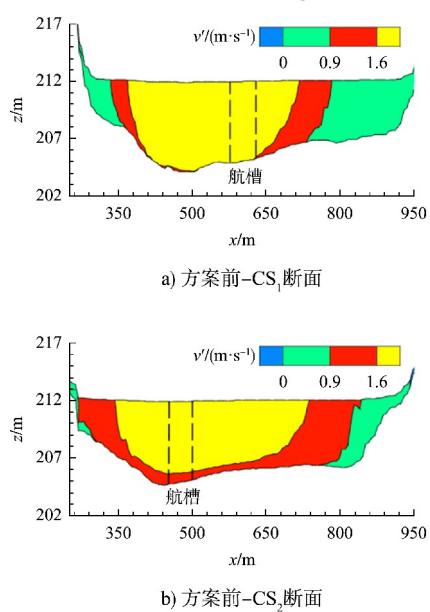
动能梯度 M 表征鱼类空间位置变化的能量消耗, 影响鱼类对产卵场适应性, 公式为:

$$M = \bar{v} \left| \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta s} \right| \quad (9)$$

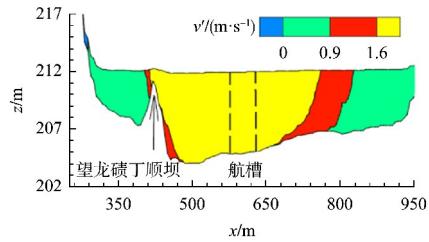
注: \bar{v} 为相邻两垂线的平均流速, v_i 、 v_{i+1} 分别为 i 、 $i+1$ 垂线的流速, Δs 为相邻两垂线的间距。

3.1 流速

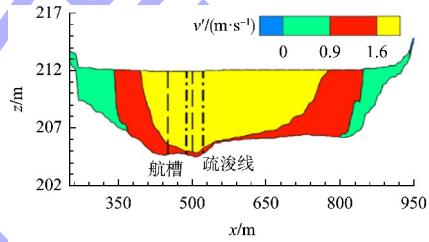
流速是反映水体流动快慢的指标, 适当的流速能刺激鱼类产卵行为, 胭脂鱼的产卵适宜流速为 0.9~1.6 m/s。本文沿程布置 $CS_1 \sim CS_3$ 共 3 个统计分析断面(图 1), 断面间距约 400 m, 其中 CS_1 断面位于丁顺坝坝头 260 m 处, CS_2 断面涉及疏浚工程, CS_3 断面涉及疏浚工程及望龙碛碛头坝工程。低、中流量下航道整治前后沿程各断面流速分布见图 5、6, 其中 x 为河道横向宽度, 沿河道左岸起算为 x 轴正方向, 航槽边线以右为胭脂鱼产卵场范围, z 为高程。



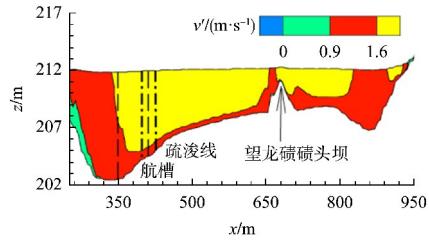
c) 方案前- CS_3 断面



d) 方案后- CS_1 断面

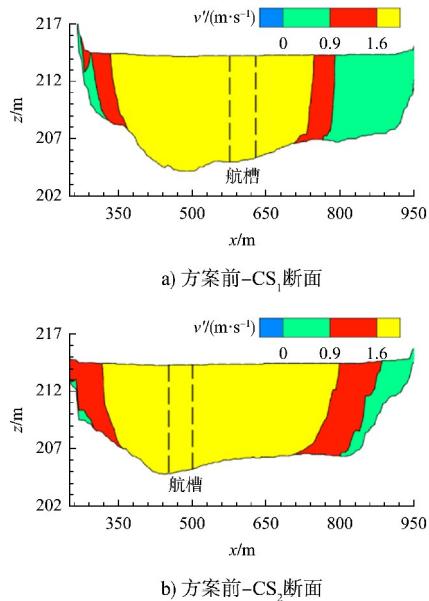


e) 方案后- CS_2 断面



f) 方案后- CS_3 断面

图 5 低流量时断面流速分布



a) 方案前- CS_1 断面

b) 方案前- CS_2 断面

b) 方案前- CS_3 断面

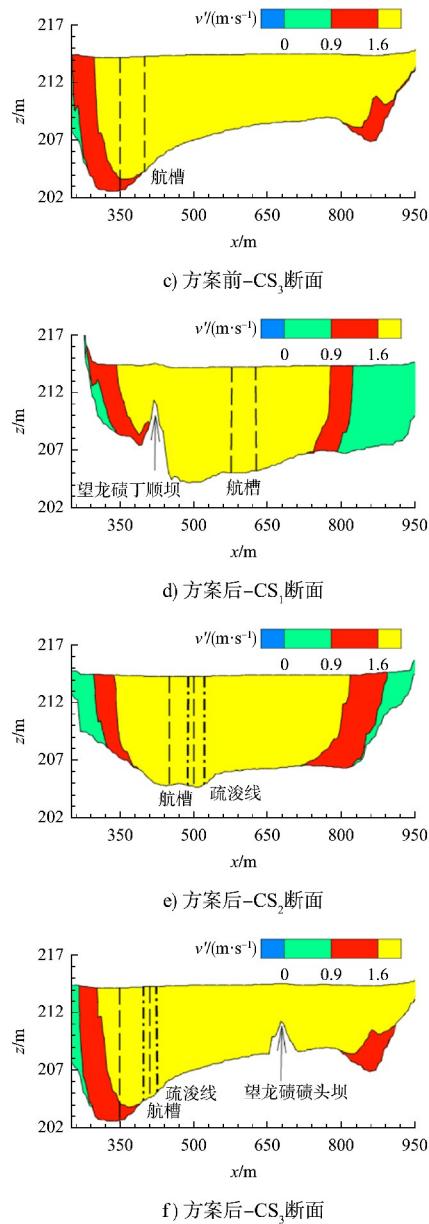


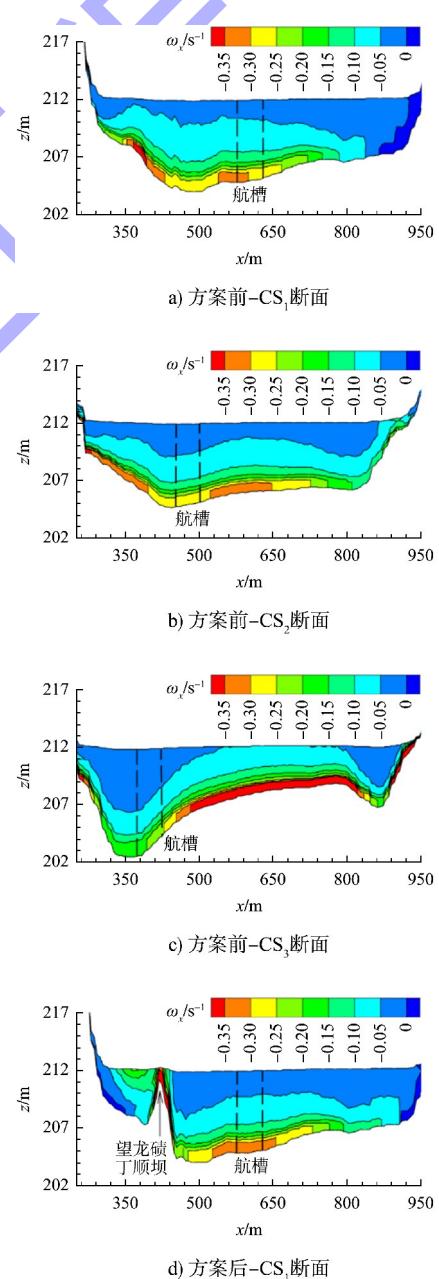
图 6 中流量时断面流速分布

可以看出：1) 低流量下望龙碛滩段水浅河宽，仅航槽及其附近区域有较大过流，流速较大值集中在断面中部，河道各断面流速分布呈“中间高、两边低”；流量增大后，河道流速明显变大，流速较大区域向河道两侧扩散。2) 工程降低河道各断面左侧流速。CS₁、CS₂ 断面左侧丁顺坝壅水，过流断面增大流速降低，CS₃ 断面处碛头坝调削弱左岸横流，减缓水流速度；当流量增大后，坝体对左岸流速影响减弱。3) 各断面右侧均存在产卵适宜流速区域，当来流量一定时，受航槽右侧丁顺坝导流、左岸丁顺坝分流的共同作用，各断面适宜产卵流速区域整

体向河道右岸偏移；随着流量增大，偏移量增加，最大偏移量 60 m。4) 中流量下各断面栖息地适宜产卵面积较低流量时缩小，此时产卵栖息地来流量高于产卵时段最佳流量，与文献[1]得到胭脂鱼产卵场存在最适宜流量条件的结论吻合。

3.2 涡量

涡量是反映水流的复杂程度的水动力指标，适宜的涡量提高水体系乱程度使受精卵均匀分布在河床上以提升生存率，对鱼类繁殖生长有着重要作用。本文研究的胭脂鱼产卵亲本更偏向于涡量大的水域作为产卵区域，低、中流量下横断面涡量 ω_x 分布云图见图 7、8。



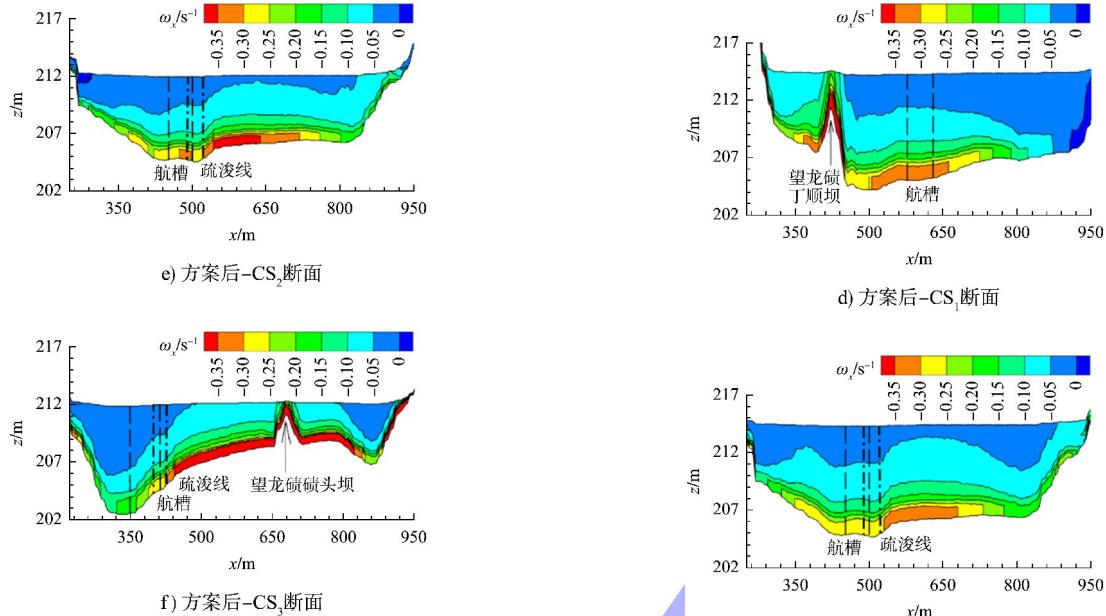


图7 低流量时断面涡量分布

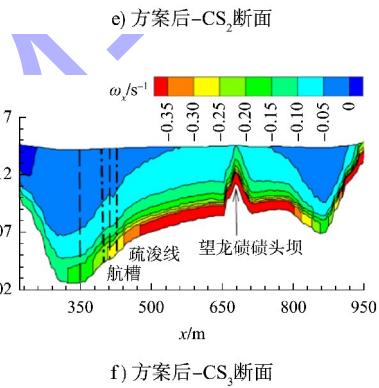
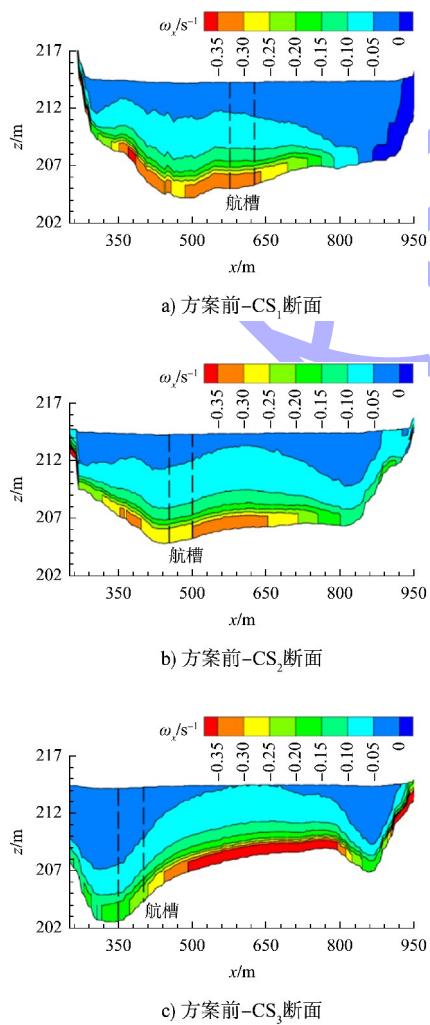


图8 中流量时断面涡量分布

可以看出: 1) 各断面涡量沿水深方向接近成层分布, 涡量由表层向底层逐层增大, 越靠近底层受河床糙率影响加大, 水体紊乱越明显, 涡量随之增大, 整体分布呈“底层大、表层小”; 2) 来流量一定, 涡量沿程增大, 水流流经河道下游受卵石边滩挤压, 水流横向发展且流速较大, 流态紊乱程度增大, 涡量随之增大; 3) 工程后丁坝附近涡量沿垂线分布变化明显, 水流在坝体附近水体剧烈掺混, 低流量下涡量变化范围为 $0 \sim 0.35 \text{ s}^{-1}$, 中流量下变化范围为 $0 \sim 0.05 \text{ s}^{-1}$; 随着流量的增大, 水流受坝体扰动作用降低, 涡量变化范围减小。

3.3 动能梯度

低、中流量时各断面动能梯度沿河宽方向分布云图见图 9、10。可以看出：1) 断面动能梯度沿水深方向接近成层分布，动能梯度由表层向底层增大，越靠近底层水体流速梯度越大，水流紊乱越明显，动能梯度随之增大，整体分布呈“底层大、表层小”。2) 沿河宽方向，动能梯度呈“中间大、两侧小”，动能梯度较大区域与水深较大区域基本一致，动能梯度的大小与深水区域分布表现出较强的相关性。3) 各断面动能梯度随流量增大成层增加，其中断面近底层水体动能梯度受流量影响最大，动能梯度最大值随来流量同步增加，中流量下水流流速及流速梯度增大，导致动能梯度增大。4) 工程后坝体附近动能梯度显著增大，坝体周围存在绕流，水流发生剧烈掺混，流速梯度增大；流量增大后，同时水体紊乱程度增加，坝体区域受影响范围增大。

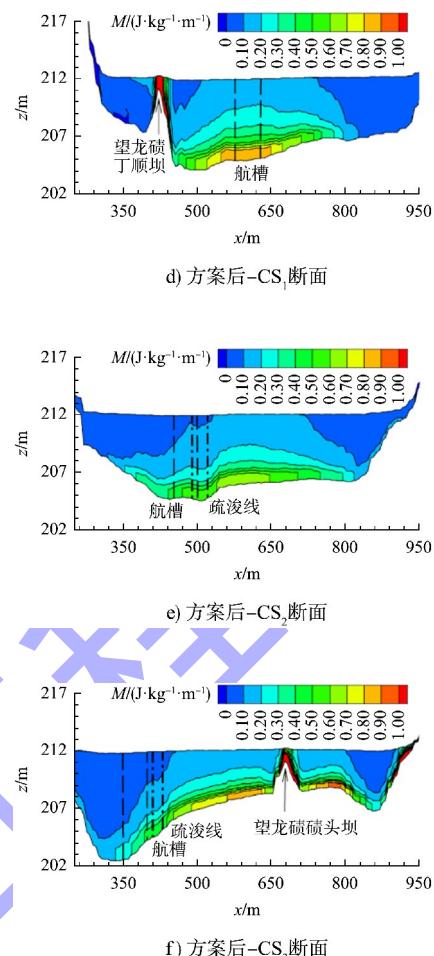
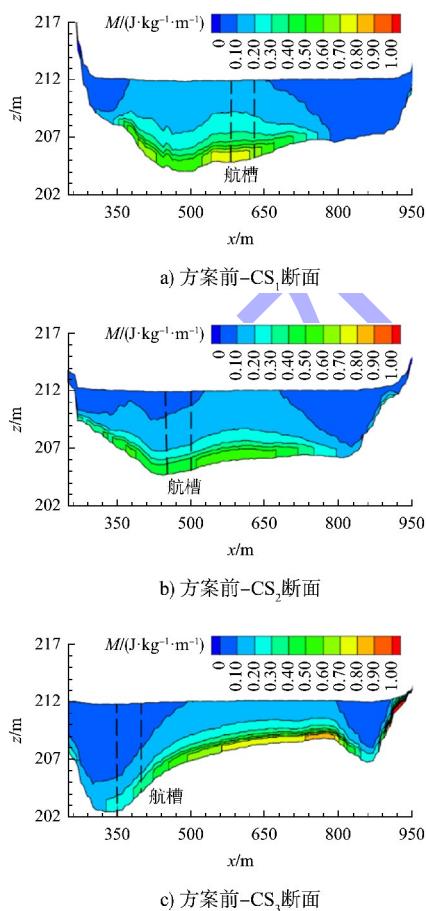
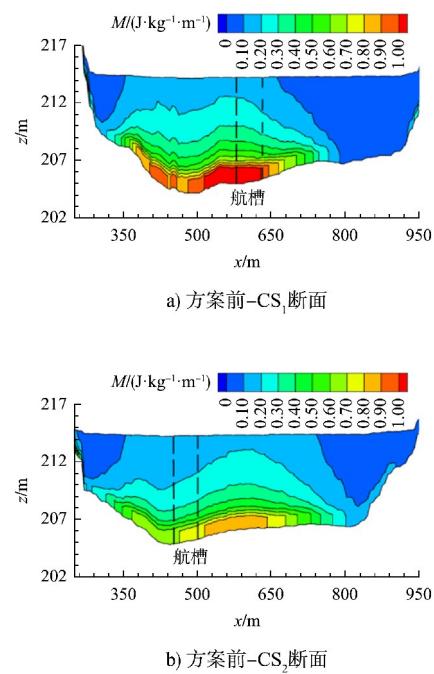


图 9 低流量时断面动能梯度分布



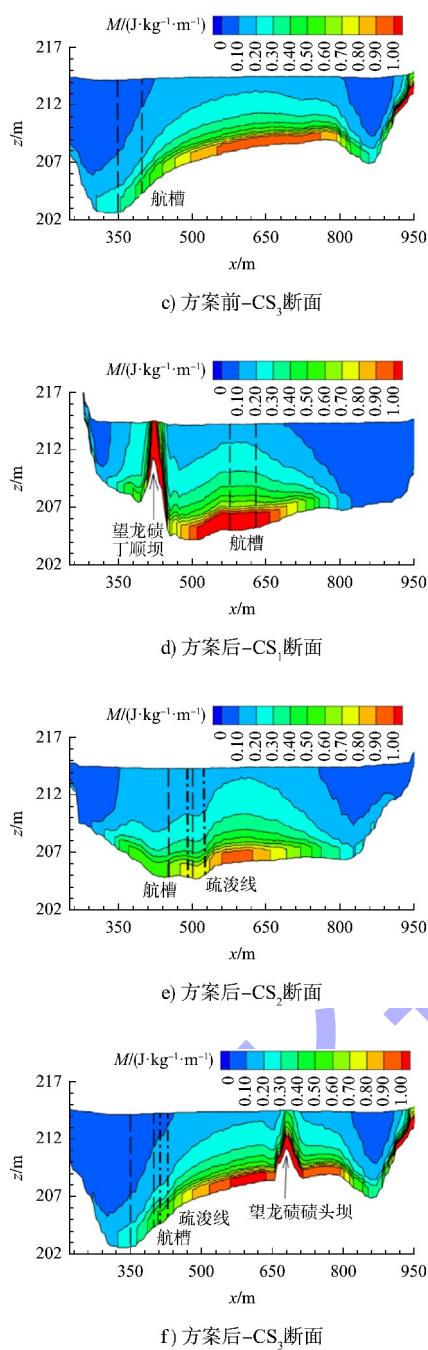


图 10 中流量时断面动能梯度分布

4 结论

- 1) 断面适宜产卵流速区域呈“中间高、两边低”，工程后适宜产卵流速区域整体向右岸偏移，偏移量随来流量增大而增加，最大偏移量 60 m。
- 2) 涡量沿程增大，各断面沿水深方向接近成层分布，总体呈“底层大、表层小”；整治后涡量较大值集中出现在坝体附近及断面底层中部区域，涡量沿垂线分布变化明显，涡量最大变幅 0.05 s^{-1} 。
- 3) 动能梯度沿水深分布和涡量相似；沿河宽

方向动能梯度分布特征与水深分布表现出较强的相关性；工程仅影响坝体附近及断面底层区域，随流量增大，各断面动能梯度最大值增加。

参考文献：

- [1] 任杰, 彭期冬, 林俊强, 等. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区重要鱼类繁殖生态需求[J]. 淡水渔业, 2014, 44(6): 18-23.
- [2] 李芳, 安瑞冬, 马卫忠, 等. 鱼类坝下集群效应对水力学条件的响应规律研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(10): 87-91, 117.
- [3] 钟亮, 戴思遥, 廖尚超. 山区弯曲河道鱼类产卵栖息地适宜度的分布特征[J]. 水运工程, 2020(7): 26-33.
- [4] BAN X, GAO X, PANAYIOTIS D, et al. Suitability analysis of three dimensional hydraulic factors for spawning habitat of Chinese Sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. Advances in water science, 2018, 29(1): 80-88.
- [5] 李洋. 筑坝河流鱼类产卵生态流量研究: 以锦屏大河湾为例[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [6] ZHANG W, YAO W W, LI L, et al. Using an eco-hydrodynamic model to simulate the impact of trunk dam construction on Kraal River fish habitat and community[J]. International journal of environmental research, 2016, 10(2): 227-236.
- [7] 曹艳敏, 王崇宇, 乾东岳. 梯级开发对家鱼产卵场高低流量过程的影响[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(3): 18-26.
- [8] 童朝锋, 周云, 孟艳秋. 航道清礁对西江鱼类保护区紊流体的影响[J]. 水运工程, 2018(11): 138-144, 218.
- [9] 张俊, 车轩, 贾广臣, 等. 人工坝体对长江上游鱼类栖息地流域水动力学特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 140-146.
- [10] 陈春娜. 我国胭脂鱼的研究进展[J]. 水产科技情报, 2008(4): 160-163.
- [11] 张春光, 赵亚辉. 长江胭脂鱼的洄游问题及水利工程对其资源的影响[J]. 动物学报, 2001, 47(5): 518-521.
- [12] 王世鹏. 长江上游望龙碛滩险河段航道整治及其鱼类生境影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [13] 交通运输部天津水运工程科学研究院. 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程: JTS/T 231-4—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(本文编辑 王璁)