



长江上游航道整治建筑物不同流量下的生态效果*

黄桂全¹, 李文杰², 万宇², 杜洪波², 张帅帅³

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 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;

3. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

摘要: 航道整治建筑物在长江上游广泛存在, 其在改变局部河段的水动力和水体理化特征的同时也会对浮游生物群落产生重要的影响。于寸滩站 11 000 m³/s 流量下开展顺坝和丁坝 2 座航道整治建筑物的水动力、水质及浮游生物生物量现场监测, 利用 MIKE21 软件建立流场, 进一步模拟不同流量下坝体前后水动力、水质、生物量的变化趋势。监测结果表明, 相较于坝前, 两坝体坝后流速减小, 溶解氧浓度、浮游植物密度、生物量增加, 其中顺坝和丁坝浮游植物密度分别增加 69.39% 和 62.18%, 生物量分别增加 77.42% 和 56.41%。基于现场监测数据建立模型得出, 4 500、11 000、39 200 m³/s 流量下航道整治建筑物前后水动力、水质及生物量差异性逐渐降低, 4 500 m³/s 流量下整治建筑物生态效果最好。研究成果可为航道整治工程区生物的保护和生态航道的建设提供理论依据。

关键词: 水动力; 浮游植物; 航道整治建筑物; 生态保护

中图分类号: U617.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0147-09

Ecological effects of waterway regulation buildings in upper reaches of the Yangtze River under different discharges

HUANG Guaiquan¹, LI Wenjie², WAN Yu², DU Hongbo², ZHANG Shuaishuai³

(1. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Transportation Engineering, Ministry of Education,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Inland Waterway Regulation Engineering Technology Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Changjiang Shipping Engineering Survey and Design Institute, Chongqing 401147, China)

Abstract: Waterway regulation structures exist widely in the upper reaches of the Yangtze River, which can change the hydrodynamic, physical and chemical characteristics of water body, and also have an important impact on the planktonic communities. In this study, on-site monitoring of hydrodynamics, water quality and plankton biomass is carried out in the longitudinal and spur dike at the flow rate of 11 000 m³/s at Cuntan station. Furthermore, the change trend of hydrodynamic, water quality and biomass upstream and downstream of the two dikes under various discharges is simulated using MIKE21 software. The monitoring results show that compared with the upstream of the two dikes, the flow velocity in the downstream of two dikes decreases, and the dissolves oxygen concentration,

收稿日期: 2023-05-20

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52279058); 重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-jqX0009); 长江航道局科研项目(KY2022-01); 水利水运工程教育部重点实验室开放基金资助项目(SLK2021B10)

作者简介: 黄桂全(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为航道整治生态效应。

通讯作者: 万宇(1986—), 男, 博士, 教授, 研究方向为生态航道。Email: wanyu_hhxy@cqjtu.edu.cn

phytoplankton density and biomass increase. The phytoplankton densities of the longitudinal and spur dike increase by 69.39% and 62.18% respectively, and the biomasses increase by 77.42% and 56.41% respectively. Based on the field monitoring data, the model is established. The differences in hydrodynamics, water quality, and biomass gradually decrease at 4 500, 11 000 and 39 200 m³/s flow, and the ecological effect of renovation buildings is the best at 4 500 m³/s flow. The research results can provide a theoretical basis for the protection of organisms and the construction of ecological waterways in waterway regulation project area.

Keywords: hydrodynamic; phytoplankton; waterway regulation buildings; ecological protection

为改善长江上游通航条件,修筑了大量整治建筑物,主要是顺坝和丁坝^[1],该类结构往往会导致附近水域水动力、水质和浮游生物的变化。大量学者基于生态理念提出了透水孔、L形勾头的丁坝、平顺水流的顺坝等航道整治建筑物结构形式^[2-3],其在改变周围水动力及水质的同时,也为浮游生物提供了更好的栖息环境。

针对整治建筑物的生态效应,国内外研究表明整治建筑物有利于改善鱼类栖息地环境,同时坝后的回流区是鱼类栖息繁衍的重要场所^[4-6]。以上关于整治建筑物生态效应的研究多集中于鱼类等大型游泳生物,而对于浮游生物的影响同样不可忽视。常留红等^[7]基于数值模拟研究发现丁坝修建后可将河道来流导入到坝后区,使得浮游植物和有机质在坝后缓流区富集。然而,有些学者研究发现整治建筑物虽然能够降低坝后流速,但也增加了坝后水体的紊动强度,并会降低甲藻、哲水蚤等浮游生物的生长速率^[8-9]。而不同流量下整治建筑物对水动力及水体理化因子的影响也存在差异^[10]。因此,整治建筑物的生态效应目前尚无定论,研究不同水文时期航道整治建筑物的水动力和水质特征及生态作用更是鲜有报告。

本研究选择长江上游重庆段两类主要生态型建筑物(顺坝和丁坝)为研究对象,在现场监测的基础上,利用 MIKE21 模拟软件,对三峡库区不同水文流量时期航道整治建筑物所在水域流速、溶解氧、叶绿素 a 及浮游植物生物量进行模拟分析。其中流速直接影响浮游生物群落分布;溶解氧参与浮游生物的光合、分解、硝化作用等

过程;叶绿素 a 表明浮游植物现存量的多寡,是初级生产力的反映。因此,选取此 3 项指标开展现场监测和模拟分析,旨在为长江上游水生生物资源的保护和生态航道工程的建设提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

选取草鞋碛顺坝和洛碛丁坝 2 座生态型整治建筑物作为研究对象。其中草鞋碛顺坝位于长江上游航道里程 656 km 处,坝长 325 m,坝顶高程 160.31 m,坝体处水位 159.14 m。坝轴线与水流方向为 15°。洛碛丁坝位于长江上游航道里程 605 km,坝长 467 m,坝顶高程 153.08 m,坝体处水位 152.25 m。采用丁坝和顺坝结合形式,且与前后 2 个直角丁坝组成丁坝群,坝轴线与水流方向的夹角为 120°。实测当天坝体均处于未淹没状态。整治建筑物位置见图 1。

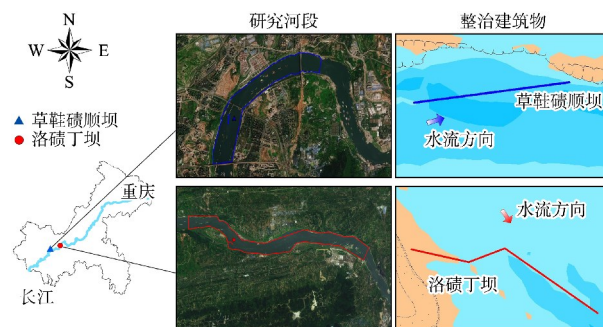


图 1 航道整治建筑物地理位置

1.2 现场监测

采集浮游植物定量样品时,用有机玻璃采水器取水样 1 L,现场加入 10 mL 鲁戈试剂固定,带

回实验室静置、沉淀 48 h 后,利用虹吸法将上清液吸除,定容至 30 mL,存放在样品瓶中。用光学显微镜 OLYMPUS-BX53 进行鉴定和计数。根据浮游植物样品实际观察到的数量,选用 100 视野计数。1 L 水样中浮游植物的密度为:

$$N = \frac{S_c}{S_f} \cdot \frac{P_n}{F_n} \cdot \frac{V}{V_0} \quad (1)$$

式中: N 为 1 L 水样中浮游生物的数量, cells/L; S_c 为计数框面积, mm^2 ; S_f 为视野面积, mm^2 ; F_n 为每片计数过的视野数; V 为 1 L 水经浓缩后的体积, mL; V_0 为计数框容积, mL; P_n 为计数的浮游植物个数。浮游植物密度接近 1 g/cm^{-3} , 可直接采用体积换算成湿重生物量。体积估算根据浮游植物的细胞形态,按最近似的几何形状测量其长度、高度、直径等,每一种类至少随机测定 30~50 个个体,计算体积平均值。此平均值乘 1 L 水中该浮游植物的数量,即得到 1 L 水中该浮游植物的生物量^[11]。

溶解氧、叶绿素 a 采用便携式多参数水质仪 (YSI ProQuatro) 测定。流速采用流速仪 (LS300-A) 测定。

1.3 数值模拟

1.3.1 控制方程

采用 MIKE21FM 水动力模块建立数学模型。MIKE21FM 水动力模块基于二维黏性不可压缩流体动量守恒的 Navier-Stokes 方程,且服从 Boussinesq 和静水压力假定。

二维水流连续性方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (2)$$

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} -$$

$$\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + hu_s S \quad (3)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} -$$

$$\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} + hv_s S \quad (4)$$

式中: \bar{u} 、 \bar{v} 分别为 x 、 y 方向上的平均水深流速, u 、 v 为 x 、 y 方向的速度分量, η 为底高程, d 为静水深, $h = \eta + d$ 为总水深, t 为时间, τ_b 为流体底部切应力, τ_s 为流体表面切应力, f 为科氏力系数, ρ 、 ρ_0 分别为水体密度和水体相对密度, g 为重力加速度, P_a 为当地大气压应力, S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} 为辐射应力分量, S 为点源强度, u_s 、 v_s 为点源速度在 x 、 y 方向的分量。

1.3.2 边界条件

以长江上游寸滩站处为入口边界,进口给定流量,出口给定相应水位,考虑枯水期、丰水期不同水文条件,设置 2 种工况,分别对应设计通航流量 $4\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、汛期常遇流量 $39\,200 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[12],分别代表两坝体未淹没和淹没状态。

1.3.3 网格模型

整治建筑物修建后,对周围水体水动力条件有着直接影响。本文采用二维模型完全可以满足实际工程的需要。水动力模型采用 MIKE21 系列软件中的三角形网格水动力模块(FM 模块)。水质及生物量模型采用 MIKE21 系列软件中的 ECO lab 模块。根据 2020 年 11 月实测 1:2 000 地形数据,提取边界和水位地形后导入 MIKE21 网格生成器,对整治建筑物所在位置及其附近网格加密并光滑,网格地形插值结果见图 2。

河道参数、初始条件及模拟时间等根据模型网格大小、水深条件动态调整,模型计算时间步长选择应保证流体通过网格单元的时间步长与网格单元的尺寸之比即 CFL (Courant-Friedrich-Lewy) 数满足模型稳定的要求,使 CFL 数小于 0.8,时间步长取 30 s,模拟时间步数 1 000,模拟时长 8 h。基于 2022 年 6 月对 2 座坝体实测流速、

水质、生物量资料进行计算。模型底床摩擦力计算取曼宁系数为 $32\text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ，涡黏系数等其他参数采用推荐值。计算不考虑风力、冰层覆盖、潮汐势和波浪辐射等影响因素。

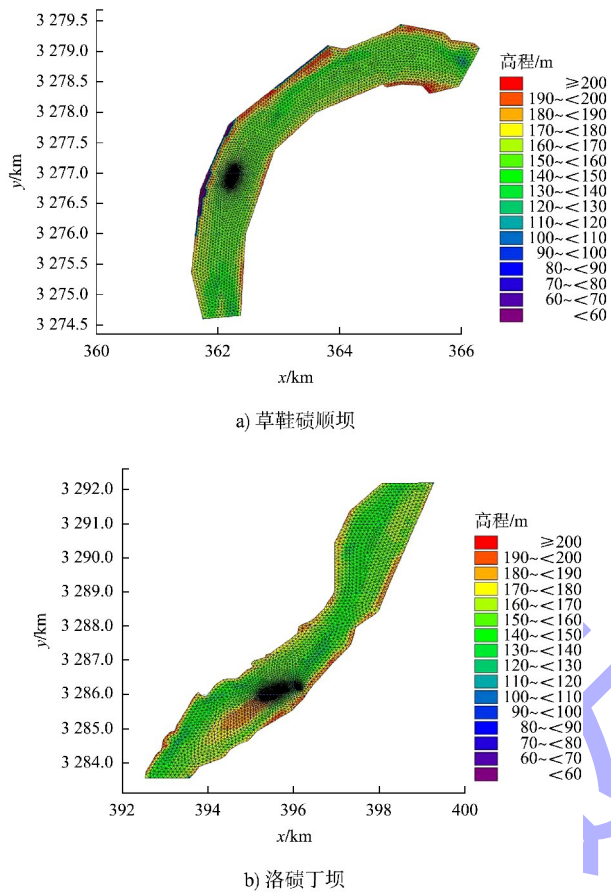


图 2 计算网格

2 结果与分析

2.1 现场监测分析

2.1.1 水体理化因子

实测水体理化因子如表 1 所示。11 000 m^3/s 流量下航道整治建筑物坝后相较于坝前流速减少，顺坝和丁坝分别减少 9.93% 和 54.33%；这是因为相较于挡水型整治建筑物丁坝，顺坝对水流更多是分流作用。两坝体坝后溶解氧相较于坝前增加，顺坝和丁坝分别增加 4.32% 和 5.58%；其原因主要是由于水流受坝体阻挡后产生的流速波动和水体扰动使得水体复氧。有学者研究发现水体流经丁坝后，溶解氧含量与天然状态相比增加了 7%^[13]。顺坝坝后较坝前叶绿素 a 减少 7.81%，丁

坝则增加 12.50%，但变化量不大，说明整治建筑物对叶绿素 a 影响较小。

表 1 坝体前后水动力及水质指标变化趋势

位置	溶解氧浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	叶绿素 a 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
顺坝前	8.10 ± 0.05	0.064 ± 0.001	2.72 ± 0.21
顺坝后	8.45 ± 0.07	0.059 ± 0.001	2.45 ± 0.14
丁坝前	7.88 ± 0.03	0.032 ± 0.002	2.89 ± 0.16
丁坝后	8.32 ± 0.11	0.036 ± 0.001	1.32 ± 0.10

注：均值±方差。

2.1.2 浮游植物生物因子

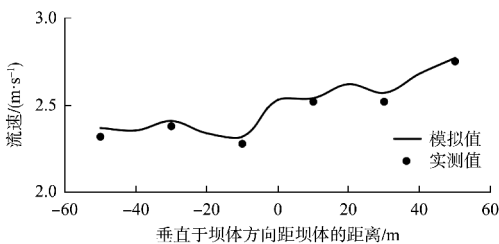
实测浮游植物密度及生物量如表 2 所示，11 100 m^3/s 流量下航道整治建筑物坝后较坝前浮游植物密度和生物量增加，顺坝和丁坝浮游植物密度分别增加 69.39% 和 62.18%，而生物量分别增加 77.42% 和 56.41%。此外，丁坝处整体浮游植物密度和生物量高于顺坝。刘娅琴等^[14]对比丁坝建立前后浮游植物生物群落发现，坝体建立后流速和污染物显著减少，浮游植物生物量与多样性更高。

表 2 坝体前后生物指标变化趋势

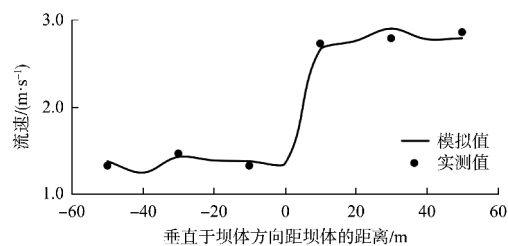
位置	浮游植物密度/ (万个 $\cdot \text{L}^{-1}$)	浮游植物生物量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
顺坝前	5.358 ± 0.122	0.093 ± 0.001
顺坝后	9.076 ± 0.145	0.165 ± 0.007
丁坝前	5.944 ± 0.168	0.117 ± 0.004
丁坝后	9.640 ± 0.108	0.183 ± 0.008

2.2 模型验证

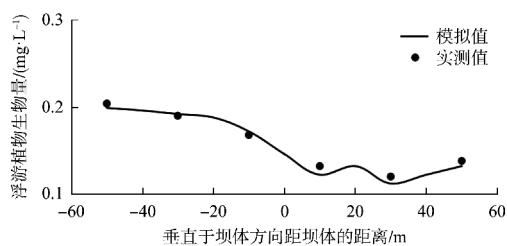
11 000 m^3/s 流量下对草鞋碛顺坝和洛碛勾头丁坝中心处前后各 50 m 进行水动力及水质验证。如图 3~6 所示，各模拟指标与实测指标的对比结果较好，误差在±20%内，说明模型效果较好，满足精度要求，可进行后续分析。



a) 流速，顺坝



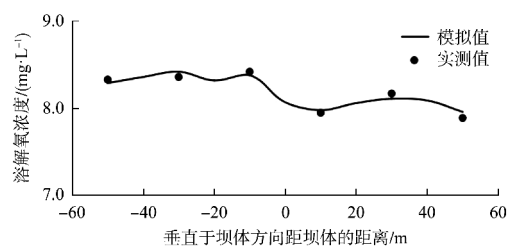
b) 流速, 丁坝



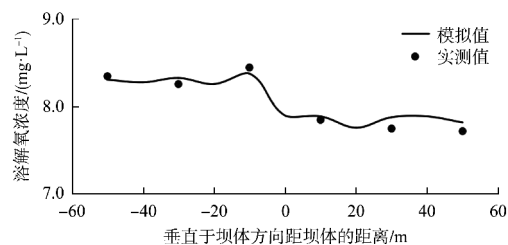
h) 浮游植物生物量, 丁坝

注: 正值代表坝前, 负值代表坝后。

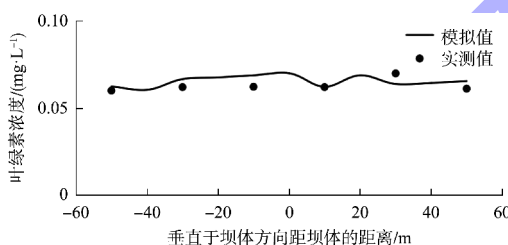
图3 各指标模拟值与实测值对比



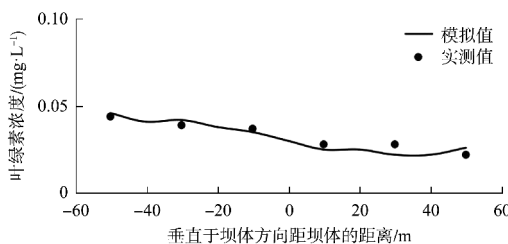
c) 溶解氧, 顺坝



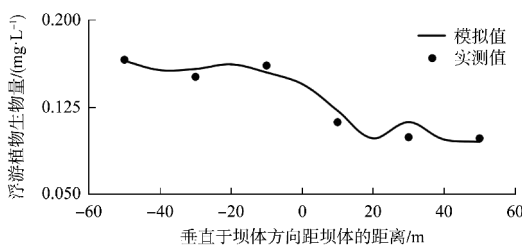
d) 溶解氧, 丁坝



e) 叶绿素a, 顺坝



f) 叶绿素a, 丁坝



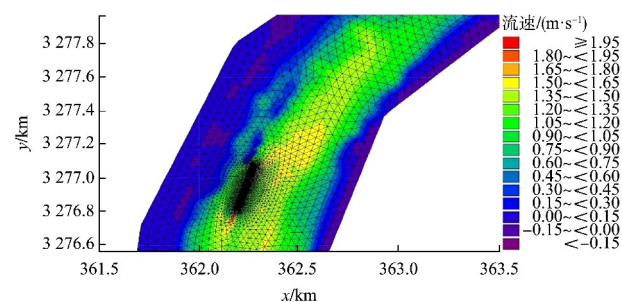
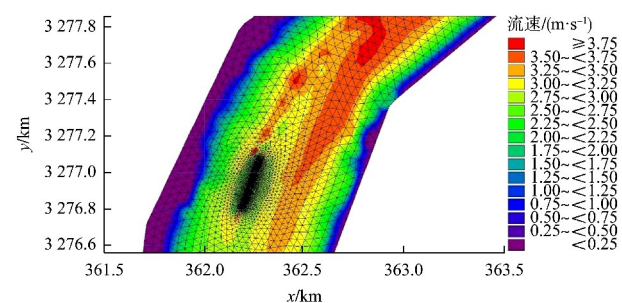
g) 浮游植物生物量, 顺坝

2.3 坝体前后生态效果模拟分析

2.3.1 水动力变化

顺坝流速模拟如图 4a)、4b) 所示, 4 500 m³/s 流量下, 坝前流速在 0.75 ~ 1.65 m/s, 坝后为 0.30 ~ 1.35 m/s; 39 200 m³/s 流量下, 坝前流速在 2.00 ~ 3.75 m/s, 坝后为 1.75 ~ 3.50 m/s。4 500、11 000、39 200 m³/s 流量下, 顺坝前后流速差距减少, 逐渐趋于一致。

丁坝流速模拟如图 4c)、4d) 所示, 4 500 m³/s 流量下, 坝前流速在 1.20 ~ 1.30 m/s, 坝后为 0.10 ~ 0.40 m/s; 39 200 m³/s 流量下, 坝前流速在 1.75 ~ 3.25 m/s, 坝后则为 1.00 ~ 1.50 m/s。4 500、11 000、39 200 m³/s 的流量下, 丁坝坝后均维持相对坝前偏低的流速。

a) 顺坝, $Q=4\,500\text{ m}^3/\text{s}$ b) 顺坝, $Q=39\,200\text{ m}^3/\text{s}$

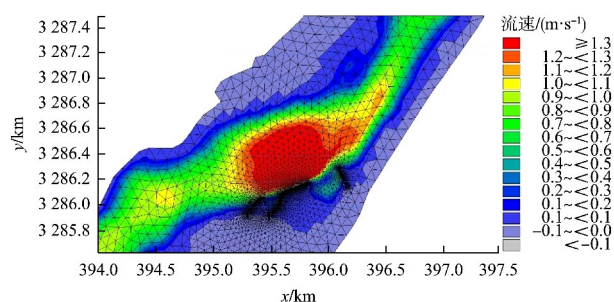
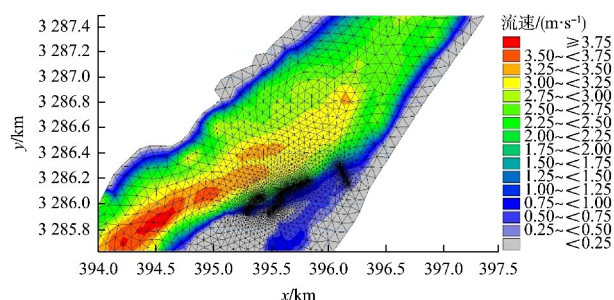
c) 丁坝, $Q=4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ d) 丁坝, $Q=39\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$

图4 不同流量下两坝处流速分布

2.3.2 水质变化

顺坝水质模拟如图5所示, $4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 流量下, 顺坝坝前溶解氧浓度在 $8.10\sim 8.25\ \text{mg/L}$, 坝后则为 $8.10\sim 8.75\ \text{mg/L}$; 坝前叶绿素 a 浓度大于 $0.063\ \text{mg/L}$, 坝后则为 $0.061\sim 0.063\ \text{mg/L}$ 。 $39\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 流量下, 顺坝前后溶解氧浓度在 $8.00\sim 8.25\ \text{mg/L}$, 叶绿素 a 浓度在 $0.062\sim 0.063\ \text{mg/L}$, 无明显改变。

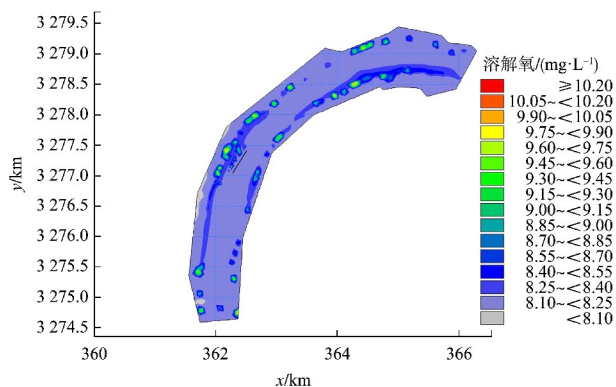
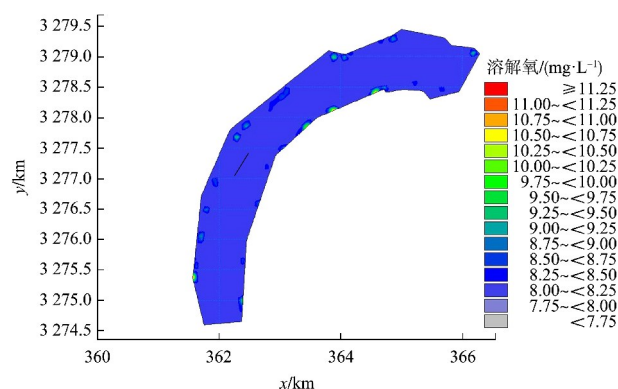
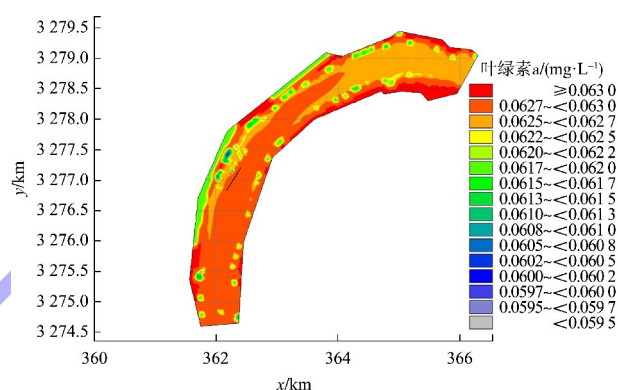
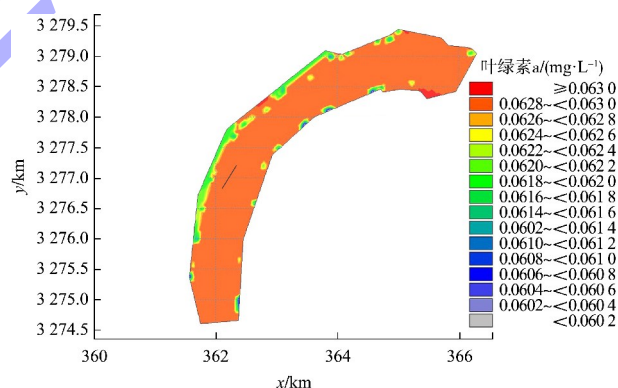
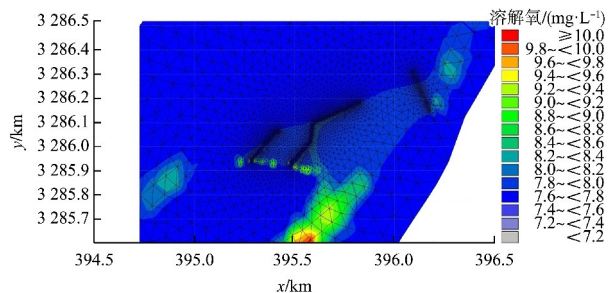
a) $Q=4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$, 溶解氧b) $Q=39\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$, 溶解氧c) $Q=4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$, 叶绿素ad) $Q=39\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$, 叶绿素a

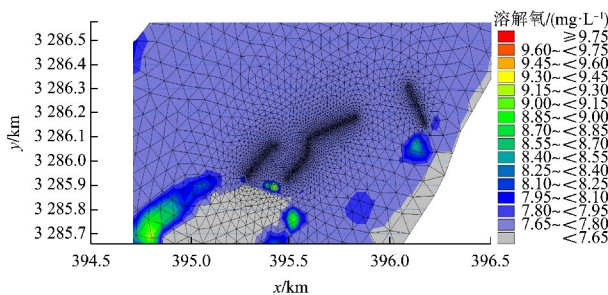
图5 不同流量下顺坝处水质指标分布

丁坝水质模拟如图6所示, $4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 流量下, 坝前溶解氧浓度在 $7.40\sim 7.80\ \text{mg/L}$, 坝后则在 $7.80\sim 8.60\ \text{mg/L}$; 坝前叶绿素 a 浓度在 $0.005\sim 0.001\ \text{mg/L}$, 坝后则在 $0.001\sim 0.055\ \text{mg/L}$ 。

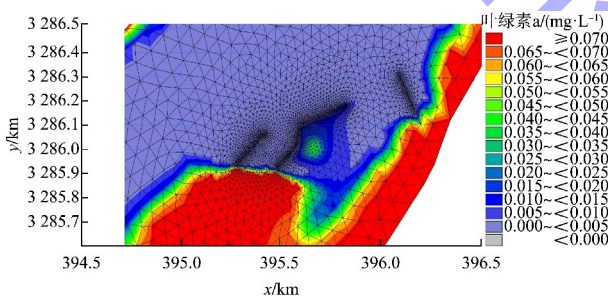
39 200 m³/s 流量下, 丁坝前后溶解氧在 7.65 ~ 7.80 mg/L, 叶绿素 a 浓度在 0.005 ~ 0.010 mg/L, 无明显改变。



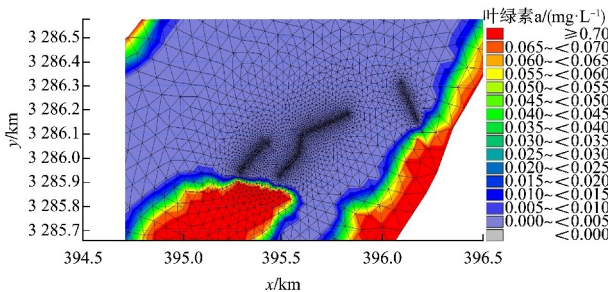
a) $Q=4\,500\text{ m}^3/\text{s}$, 溶解氧



b) $Q=39\,200\text{ m}^3/\text{s}$, 溶解氧



c) $Q=4\,500\text{ m}^3/\text{s}$, 叶绿素a



d) $Q=39\,200\text{ m}^3/\text{s}$, 叶绿素a

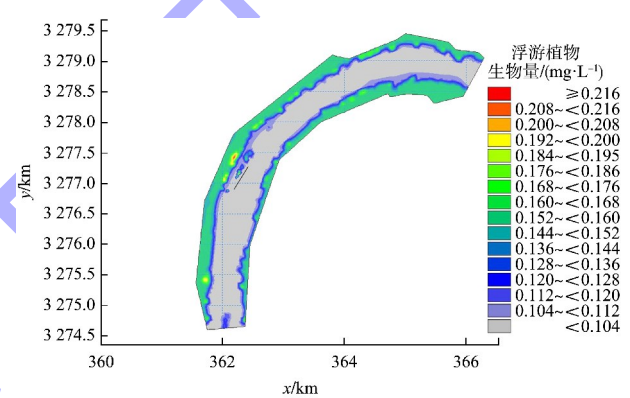
图6 不同流量下丁坝处水质指标分布

2.3.3 生物量变化

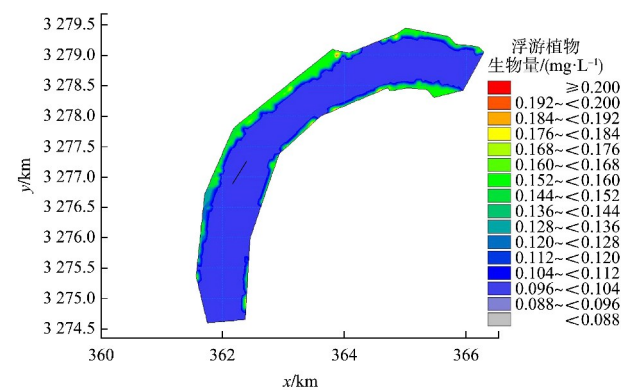
顺坝生物量模拟如图 7a)、7b) 所示, 4 500 m³/s 流量下, 坝前浮游植物生物量低于 0.104 mg/L,

坝后则在 0.104~0.182 mg/L。39 200 m³/s 流量下, 顺坝前后浮游植物生物量在 0.088~0.100 mg/L, 无明显改变, 生物量较低。11 000 m³/s 流量下坝前浮游植物生物量在 0.093~0.098 mg/L, 坝后则在 0.158~0.170 mg/L。

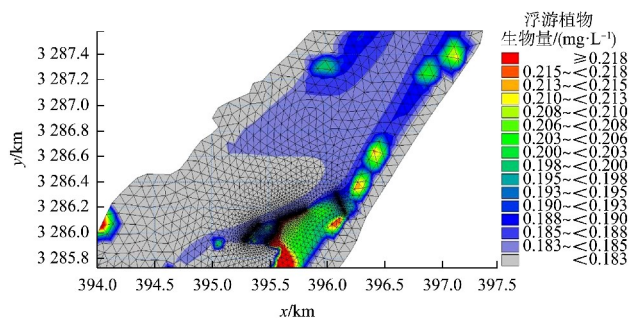
丁坝生物量模拟如图 7c)、7d) 所示, 4 500 m³/s 流量下, 坝前浮游植物生物量在 0.183~0.185 mg/L, 坝后为 0.198~0.218 mg/L。39 200 m³/s 流量下, 丁坝前后浮游植物生物量在 0.175~0.180 mg/L, 无明显改变。11 000 m³/s 流量下坝前浮游植物生物量在 0.108~0.135 mg/L, 坝后为 0.182~0.185 mg/L。



a) 顺坝, $Q=4\,500\text{ m}^3/\text{s}$



b) 顺坝, $Q=39\,200\text{ m}^3/\text{s}$



c) 丁坝, $Q=4\,500\text{ m}^3/\text{s}$

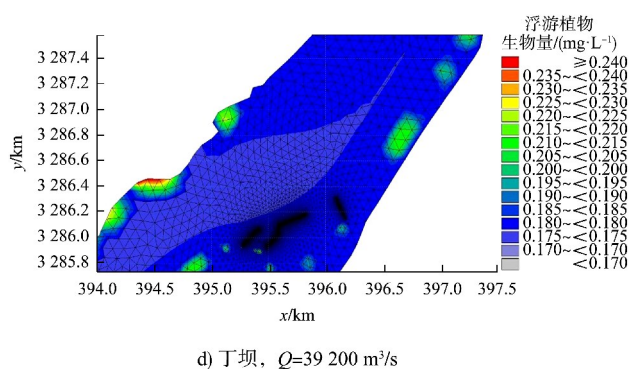


图7 不同流量下两坝处浮游植物生物量分布

水动力条件对浮游植物生长发育也存在重要影响。苏新然等^[15]发现流量较低时,低流速会导致颗粒悬浮物沉降,水体透明度增加,浮游植物光照捕获能力更强,生物量显著上升。在高流量下,较强的水动力对河岸的冲刷造成水体悬浮物增加以及底层物质的再悬浮,使得水体浊度增加,不利于浮游植物的光合作用,从而减少了浮游植物生物量^[16]。此外,航道整治建筑物附近有大量船舶通航,在 $4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 流量下,顺坝和丁坝仍处于未淹没状态,当面对船舶通航带来的纵向水体扰动时,顺坝和勾头丁坝的结构形式创造了纵向庇护空间,从而保护沿岸水域浮游生物免受通航带来的影响^[17]。

研究发现航道整治建筑物坝后较坝前的溶解氧含量显著增加,顺坝和丁坝分别增加 4.32% 和 5.58%。其原因主要是水体流经坝体后产生的流速波动和水体扰动使得水体复氧^[18],丁坝对污染物的截留还起到了净化水体的作用,抑制污染物分解而消耗水中溶解氧^[19]。此外,浮游植物与溶解氧密切相关,修建整治建筑物后,顺坝和丁坝坝后均形成较好的栖息地环境,浮游植物多样性增加且浊度降低,为浮游植物吸收光照、释放氧气提供了条件。

在 $4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 流量下,顺坝和丁坝坝后浮游植物生物量峰值最高, $11\ 000$ 、 $39\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 流量下坝后浮游植物生物量峰值逐渐降低。有研究发现三峡库区处于低枯水期时其浮游生物生物量和丰度显著高于其他水文时期^[20],坝后较好的水体

环境也有助于浮游植物及鱼类等水生生物栖息繁衍。

3 结论

1) 现场监测结果表明,顺坝和丁坝坝后相较于坝前流速分别减少 9.93% 和 54.33%,溶解氧浓度分别增加 4.32% 和 5.58%,丁坝对流速和溶解氧的影响尤其显著。浮游植物密度增加 69.39% 和 62.18%,浮游植物生物量增加 77.42% 和 56.41%,顺坝对浮游植物生物量的影响尤其显著。

2) 模拟结果表明,流量对浮游植物生物量影响较大, $4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 低流量下,坝后浮游植物生物量峰值最高,坝体前后生物量差异较大。 $39\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 高流量下,坝后浮游植物生物量较低,坝体前后生物量无明显差异。

3) 各流量下顺坝处生态效果要优于丁坝,浮游植物密度及生物量更高,坝体前后各项指标差异性更小,流态更稳定。

参考文献:

- [1] 李文杰,张浩游,张文,等.基于模糊贝叶斯网络的长江上游航道整治建筑物技术状况评价研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(9):112-118.
- [2] HU J, WANG G, WANG P, et al. Experimental study on the influence of new permeable spur dikes on local scour of navigation channel[J]. Sustainability, 2023, 15(1): 570.
- [3] 雷淳宇,王誉寰.长江上游红灯碛滩采砂活动对航道维护的影响及治理措施[J].水运工程,2022(2):119-124,146.
- [4] 侯仲荃,李锐,李晓舟,等.基于 Flow-3D 的新型半圆形构件水动力特性研究[J].水运工程,2023(4):20-25,128.
- [5] MA B, DONG F, PENG W Q, et al. Evaluation of impact of spur dike designs on enhancement of aquatic habitats in urban streams using 2D habitat numerical simulations[J]. Global ecology and conservation, 2020, 24: e01288.
- [6] DENG Y, CAO M, 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(11), 78-92.
- [7] 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.
- [8] 陈稚聪,黑鹏飞,丁翔.丁坝回流区水流紊动强度试验[J].*清华大学学报(自然科学版)*,2008,48(12):2053-2056.
- [9] PETERS F, MARRASE C. Effects of turbulence on plankton: An overview of experimental evidence and some theoretical considerations [J]. *Marine ecology progress*, 2000, 205: 291-306.
- [10] 赵尚飞,杜彦良,王瑜,等.松花江梧桐河生态修复工程鱼类栖息地模拟及调查[J].*水生态学杂志*,2019,40(5):1-8.
- [11] 卢悦,胡恩,丁一桐,等.西北地区延河流域浮游植物群落结构特征及影响因素[J].*应用生态学报*,2023,34(6):1669-1679.
- [12] 翟然,刘志武,戴会超,等.长江流域径流历史演变特征及未来预估[J].*水利水电技术(中英文)*,2023,54(6):87-97.
- [13] IM D, KANG H. Two-dimensional physical habitat modeling of effects of habitat structures on urban stream restoration [J]. *Water Science and Engineering*, 2011, 4(4): 386-395.
- [14] 刘娅琴,刘福兴,宋祥甫,等.农村污染河道生态修复中浮游植物的群落特征[J].*农业环境科学学报*,2015,34(1):162-169.
- [15] 苏新然,于潘,尤庆敏,等.三峡库区浮游植物群落结构特征及水生态评价[J].*湖泊科学*,2023,35(2):493-507.
- [16] 陈修康,郭跃华,冯喻,等.特大洪水对浮游植物群落及其演替的影响:以广东高州水库为例[J].*湖泊科学*,2014,26(1):137-146.
- [17] FLORES Y N, COLLAS L P F, MEHLER K, et al. Assessing habitat suitability for native and alien freshwater mussels in the River Waal (the Netherlands), using hydroacoustics and species sensitivity distributions [J]. *Environmental modeling & assessment*, 2022, 27(1): 187-204.
- [18] 赵文博,解永新,于英潭,等.不同生态复氧方式对城市河流溶解氧影响研究[J].*环境生态学*,2019,1(3):61-66.
- [19] CHEN Y T, WANG X L, LI S M, et al. Purification efficiency of ecological spur dikes for river pollutants in different geometric arrangements: Experiments and numerical modeling [J]. *Journal of hydrodynamics*, 2022, 34(5): 934-947.
- [20] LU L H, ZOU X, YANG J X, et al. Biogeography of eukaryotic plankton communities along the upper Yangtze River: the potential impact of cascade dikes and reservoirs [J]. *Journal of hydrology*, 2020, 590(3): 125495-1-125495-11.
- (本文编辑 王传瑜)

(上接第123页)

2) 八堡船闸以设置前方待闸锚地和远方调度锚地联合运行、梯级调度的方式较为适宜。调度锚地不仅能方便过闸船舶的组织 and 调度,更适用于应对特殊时段的大量待闸滞留船舶集中管理。

3) 现有的锚地容量偏小,对于开通后的船闸调度运行存在影响,需要采取近远期结合的措施进行调整。

参考文献:

- [1] 朱俊凤.三峡大坝至庙河河段待闸锚地建设规划研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.

- [2] 张高峰,魏兴龙,翁炳昶.三峡通航船舶待闸锚地规模预测分析[J].*中国水运(航道科技)*,2018(3):26-32.
- [3] 朱旺峰,李佳恒,陈轩,等.三峡枢纽航运扩能后续待闸锚地规划建设研究[J].*水运工程*,2023(3):105-108,178.
- [4] 杭州市综合交通运输研究中心.京杭运河二通道通航条件及安全评估[R].杭州:杭州市综合交通运输研究中心,2023.
- [5] 金坚良.苏北运河航道锚地建设思考[J].*中国水运*,2017(11):58-59.
- [6] 杭州市综合交通运输研究中心.京杭运河二通道试运营阶段八堡和三堡船闸通行能力及通航方案研究[R].杭州:杭州市综合交通运输研究中心,2023.

(本文编辑 王璁)