

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.028

# 梯形透空丁坝局部水动力特性对底栖动物生境演替的影响机制

常留红<sup>1,2</sup>, 王瀚锐<sup>1,2</sup>, 章富君<sup>1,2</sup>, 石豪杰<sup>1,2</sup>, 郑景琦<sup>1,2</sup>, 邓涯<sup>3,4</sup>

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 长沙理工大学洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114; 3. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029; 4. 南京水利科学研究院港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏南京 210029)

**摘要:**针对因梯形透空丁坝局部水动力特性对底栖动物栖息地的影响机制尚不明确,限制了此类结构的大范围推广应用的问题,依托长江深水航道建设的示范应用工程,构建三维水动力数值模型,选择中华绒螯蟹为指示物种,研究了不同径流条件下梯形透空丁坝局部水动力特性及其对指示物种栖息地的影响;结合梯形透空丁坝不同时期沉积物和底栖动物的监测数据,分析了梯形透空丁坝对底栖动物生境演替的影响机制。结果表明:梯形透空丁坝迎流面产生的上升流将主流引导至丁坝后上方,在汛期为中华绒螯蟹提供了避洪场所;坝内及坝后较小的流速和丰富的流场结构为中华绒螯蟹提供了索饵场和越冬场。

**关键词:**梯形透空丁坝;水动力特性;底栖动物;中华绒螯蟹;生境演替

**中图分类号:**TV863 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-6933(2023)01-0216-09

**Influence mechanism of local hydrodynamic characteristics of trapezoidal hollow spur dike on benthos habitat succession**// CHANG Liuhong<sup>1,2</sup>, WANG Hanrui<sup>1,2</sup>, ZHANG Fujun<sup>1,2</sup>, SHI Haojie<sup>1,2</sup>, ZHENG Jingqi<sup>1,2</sup>, DENG Ya<sup>3,4</sup>

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering Ministry of Communications, PRC, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The impact mechanism of trapezoidal hollow spur dike on benthos habitat due to local hydrodynamic characteristics is still unclear, which limits the large-scale promotion and application of such structures. Relying on the demonstration application project of the Yangtze River deep-water channel construction, a three-dimensional hydrodynamic numerical model was established, and the Chinese mitten crab was selected as the indicator species to study the local three-dimensional hydrodynamic characteristics of trapezoidal hollow spur dike under different runoff conditions and their impact on the habitat of the indicator species. Combined with the data analysis of sediment and benthos monitoring in different periods of trapezoidal hollow spur dike, the impact mechanism of trapezoidal hollow spur dike on benthos habitat succession was revealed. The results show that the upwelling generated on the upstream face of the trapezoidal hollow spur dike leads the mainstream to the upper part behind the dike, providing a flood shelter for Chinese mitten crab in the flood season. The small flow velocity and abundant flow field structure in and behind the dike provide feeding grounds and overwintering grounds for Chinese mitten crabs.

**Key words:** trapezoidal hollow spur dike; hydrodynamic characteristics; benthos; Chinese mitten crab; habitat succession

**基金项目:**国家重点研发计划(2021YFC3200401);湖南省自然科学基金(2021JJ30703);国家自然科学基金(51809022)

**作者简介:**常留红(1979—),女,副教授,博士,主要从事水工结构与水生态修复研究。E-mail: claire886@163.com

透空丁坝在发挥航道整治功能的同时,一定程度上改善了底栖动物的栖息地<sup>[1-2]</sup>。研究表明,河流水动力条件对底栖动物的分布具有显著影响<sup>[3-6]</sup>,但透空丁坝局部水动力特性对底栖动物栖息地的影响机制尚不明确,制约了此类丁坝结构的推广应用。近年来,不少学者研究了水动力要素对底栖动物栖息地的影响,如班璇等<sup>[7]</sup>通过建立底栖动物栖息地模型,探讨了影响长江中游底栖动物栖息地的水动力因素;马雅雪等<sup>[8]</sup>通过调研分析,认为流速是影响长江中下游底栖动物群落结构的主要因素;Friedrichs等<sup>[9-10]</sup>从底栖动物摄食的角度分析了涡量对底栖动物分布的影响;赵伟华等<sup>[11]</sup>基于底栖动物栖息地模拟法,分析了适宜底栖动物栖息的生态流量。还有学者通过工程现场调研、底栖动物监测等手段研究丁坝结构对底栖动物栖息地的影响。许栋等<sup>[12]</sup>通过调研底栖动物生物量、丰度等参数,分析了水库影响下底栖动物在河流枯水期的沿程变化;Pan等<sup>[13]</sup>通过监测底栖动物类群、密度和生物量等参数,探讨了丁坝施工后对底栖动物栖息地的影响;黄翠等<sup>[14]</sup>通过监测丁坝施工后产生的悬浮物浓度以及底栖动物等水生生物的生物量,探讨了丁坝对底栖动物栖息地的影响;游立新等<sup>[15]</sup>通过监测底栖动物的种类、平均生物量等参数,根据公式定量分析了丁坝施工对底栖动物的影响;Li等<sup>[16]</sup>通过监测对比了不同丁坝施工前后底栖动物的种类、丰度和密度,并评估了底栖动物的多样性。部分学者通过构建评价指标体系评估丁坝对底栖动物栖息地的影响,如贾更华等<sup>[17]</sup>将平原河网地区底栖动物群落结构等因子作为评价因子,构建了平原河网地区水利工程水生态环境效应评估指标体系;李增辉等<sup>[18]</sup>基于多指标综合评价法,从生物完整性、化学完整性等方面评价了丁坝施工前后对底栖动物栖息地的影响。目前丁坝等整治建筑物对底栖动物栖息地影响的研究大多通过现场监测的手段开展,有关透空丁坝局部水流结构对底栖动物生境演替影响机制的研究尚不多见。

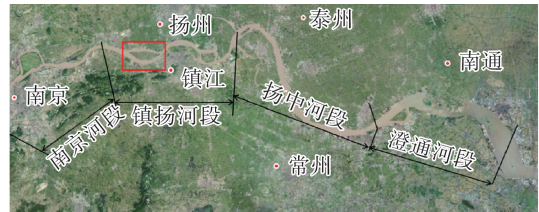
本文依托长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程,选择中华绒螯蟹为指示物种,分析不同径流条件下梯形透空丁坝局部水动力特性对指示物种栖息地的影响规律,结合梯形透空丁坝不同时期监测数据,揭示梯形透空丁坝局部水动力特性对底栖动物生境演替的影响机制,以期透空丁坝的设计、施工及推广应用提供参考。

## 1 研究区概况与指示物种选取

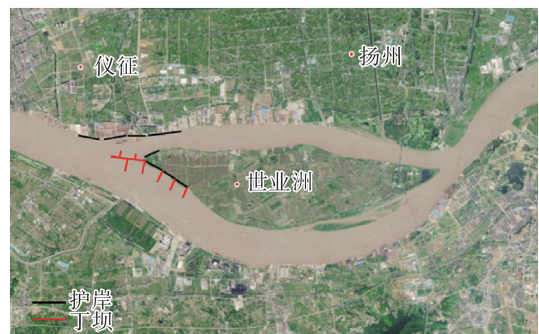
### 1.1 研究区概况

长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程全长

约 227 km,自下而上分为澄通河段、扬中河段、镇扬河段和南京河段,如图 1(a)所示。选择镇扬河段的仪征水道为研究河段,仪征水道全长 31 km,江中世业洲将水道分为左右两汉,右汉为主汉,河道弯曲,平均河宽约 1 450 m;左汉为支汉,呈顺直型,平均河宽约 880 m。仪征水道通过工程措施守护世业洲头低滩,稳定汉道分流格局,适当调整右汉进口段流场,增大右汉中上段航槽水流动力,如图 1(b)所示。



(a) 工程河段



(b) 研究河段

图 1 研究区域位置

Fig. 1 Location of study area

### 1.2 指示物种选取

根据中国水产科学研究院淡水渔业研究中心、农业部长江下游渔业资源环境科学观测实验站对仪征水道的水生生态环境现状的调查,结合项目组开展的世业洲现场调研和二期工程仪征水道调查结果,长江世业洲江段共采集底栖动物 3 类 21 种,其中环节动物、软体动物和节肢动物各 7 种,平均生物量为 18.75 g/m<sup>2</sup>。主要底栖动物捕捞品种为中华绒螯蟹和青虾,其中,中华绒螯蟹是甲壳类中少有的洄游性种类,主要生存于底床砾石和底泥中。长江径流量大,河口浅滩广阔,是中华绒螯蟹得天独厚的繁殖场,历来是中华绒螯蟹及其蟹苗的主要产地。因此,选择中华绒螯蟹为指示物种,分析梯形透空丁坝对其抱卵、育幼、越冬和洄游的影响。影响中华绒螯蟹生境的水动力因子主要包括流速、涡量和紊动能。中华绒螯蟹生存的水体流速应不大于 1.5 m/s<sup>[19]</sup>;适宜的涡量使沉积物中的有机质颗粒再悬浮于水体中,增加中华绒螯蟹的食物来源<sup>[20]</sup>;一定强度的紊动能增加水中溶解氧含量,为中华绒螯蟹的越冬活动提供足够的溶解氧<sup>[21-22]</sup>。

## 2 三维水动力数值模型及工况设置

### 2.1 控制方程

水动力学控制方程采用连续性方程和不可压缩黏性流体运动的 N-S 方程<sup>[23]</sup>,连续性方程和动量方程分别为

$$\frac{\partial(A_i u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( A_j u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + G_i + f_i \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为流体密度; $A_i$ 为*i*方向上的可流动面积分数; $u_i$ 为*i*方向上的流速分量; $x_i$ 为笛卡尔坐标系的3个方向; $t$ 为时间; $V_F$ 为可流动的体积分数; $p$ 为流体的压强; $G_i$ 为*i*方向上的体力加速度; $f_i$ 为*i*方向上的黏滞力加速度。

基于 RNG  $k-\varepsilon$  紊流模型计算梯形透空丁坝局部三维水流结构,采用流体体积法对自由液面进行捕捉,采用有限差分法对控制方程进行离散。

### 2.2 模型设置及网格划分

根据实测资料,研究河段宽度约 1 156 m,最大水深 21 m,丁坝的应用长度约 600 m,河道宽度和丁坝长度均远大于 5 倍水深,可视为二元流问题。因此,基于流带法原理,为减少丁坝头部和根部的影响,流带区域位于梯形透空丁坝轴向的中部,结合本次试验水槽宽度为 0.8 m,提出的流带宽度为 20 m,如图 2 所示。

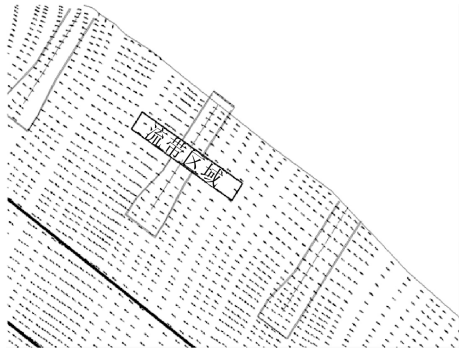


图 2 流带区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stream band area

梯形透空丁坝原型构件为钢筋混凝土薄壁结构,单个原型构件长 5 m、高 5 m、上底宽 1.7 m、下底宽 5 m,采用错孔的开孔方式,迎水面开 11 孔,背水面开 10 孔,开孔率为 15%。考虑到梯形透空丁坝附近水流三维特性显著,模型以几何比尺为 1:25 的正态比尺设计。模型长 0.8 m、高 0.2 m、上底宽 0.068 m、下底宽 0.2 m,开孔方式与开孔率与原型一致(图 3)。模型满足几何相似、水流运动相似和动力相似。数值水槽(20.0 m × 0.8 m × 1.0 m)以梯形

透空丁坝侧边底部中心为原点,以水流方向为  $x$  轴正方向、梯形透空丁坝宽度方向为  $y$  轴正方向、竖直方向为  $z$  轴正方向建立空间直角坐标系。数值计算区域采用笛卡尔网格划分,在梯形透空丁坝周围设置边长为 1~2 cm 渐变的嵌套网格,以保证流场求解的稳定性,并在梯形透空丁坝表面生成厚度为 5 mm 的边界层网格,以保证其附近流场求解的精确性,数值水槽上边界设置为速度边界,下边界设置为恒压出流边界,水槽边壁和丁坝表面为固壁无滑移边界,如图 4 所示。

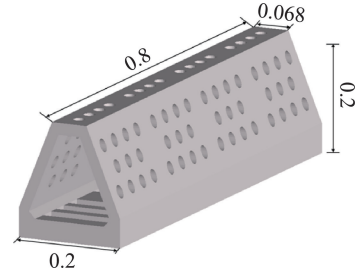


图 3 梯形透空丁坝模型(单位:m)

Fig. 3 Trapezoidal hollow spur dike model (unit: m)

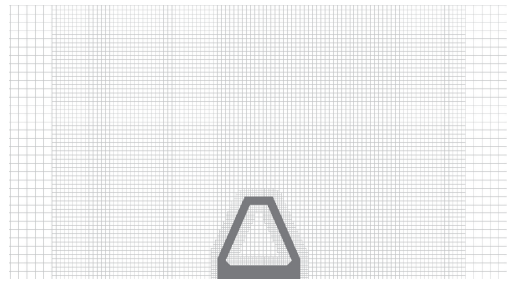


图 4 网格划分

Fig. 4 Grid division

### 2.3 模型验证

验证试验在长沙理工大学水利实验中心的风浪水槽中进行,试验水槽长 45 m、宽 0.8 m、高 1 m,水槽布置如图 5 所示。采用水深 0.4 m、流速 0.1 m/s 的水流条件开展验证试验。考虑到梯形透空丁坝周围三维水流特征显著,采用三维剖面流速仪分别测量水槽中轴线上坝前 0.1 m、坝上、坝后 0.1 m 和坝后 0.3 m 4 个位置(图 6 中的①②③④)的垂线流速。三维剖面流速仪单次测量剖面长度为 35 mm,分辨率为 1 mm,采样频率为 25 Hz。

各测点垂线流速验证结果如图 7 所示,(图中流速正负表示方向)。可见,坝前 0.1 m 和坝上的模拟值与试验水槽实测值吻合较好;而由于坝后水流结构复杂,涡动剧烈,其模拟值与试验水槽实测值存在部分偏差,但分布特性与趋势一致,表明数值模型能较好地模拟梯形透空丁坝周围三维水流特征。



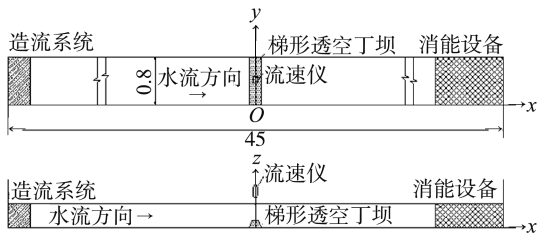


图5 水槽试验布置(单位:m)

Fig. 5 Water flume test layout (unit: m)

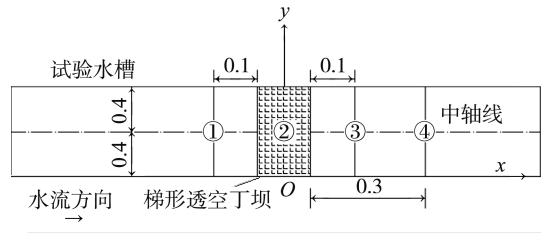


图6 试验测点位置(单位:m)

Fig. 6 Location of test measuring points (unit: m)

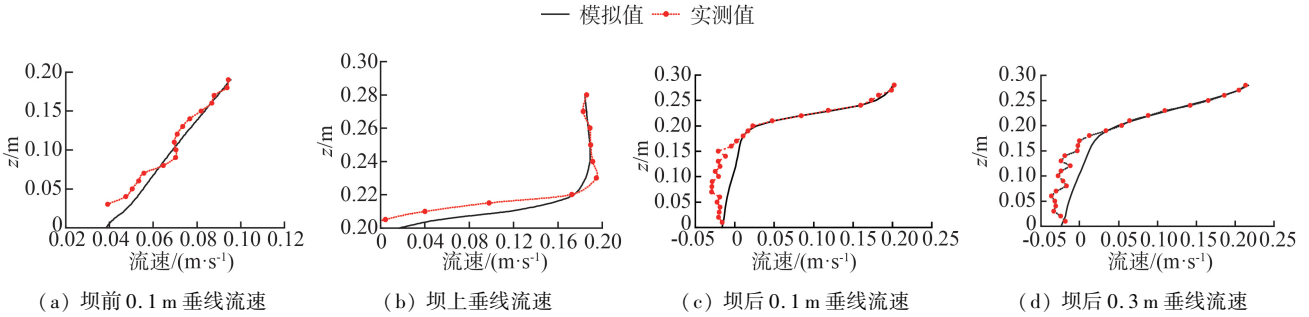


图7 各测点垂线流速验证结果

Fig. 7 Verification results of vertical flow velocity at each measuring point

## 2.4 工况设置

根据指示物种中华绒螯蟹不同生命时期的生境特征,选取汛期不同径流条件以分析梯形透空丁坝对指示物种繁殖、早期发育和索饵洄游的影响。考虑到每年汛期之后,研究河段是中华绒螯蟹幼体的重要育肥场所,选取多年平均流量径流条件分析梯形透空丁坝对中华绒螯蟹幼体育肥以及生殖洄游的影响,同时,选取枯季径流条件以分析梯形透空丁坝对中华绒螯蟹越冬活动的影响。因此,试验采用多年平均洪峰流量  $57\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 、多年平均流量  $28\,500\text{ m}^3/\text{s}$  和枯季平均流量  $16\,500\text{ m}^3/\text{s}$  3 级流量作为水流条件,通过研究河段二维数学模型计算得到流带区域的流量作为数值水槽的试验流量,试验工况如表 1 所示。

表 1 试验工况

Table 1 Test conditions

工况设置	模型计算流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	水深/m	对应流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
工况 1	0.147	0.247	0.744	57 500
工况 2	0.074	0.145	0.635	28 500
工况 3	0.042	0.088	0.589	16 500

## 3 监测结果

交通运输部长江航务管理局环境监测中心站受长江南京以下深水航道建设指挥部的委托分别在 2017 年 3 月、2017 年 12 月、2018 年 5 月和 2018 年 12 月开展了梯形透空丁坝建成后的第一次、第二次、第三次和第四次生态监测,主要监测内容包括沉积物粒径、有机质含量和底栖动物群落结构。监测位置见图 8。

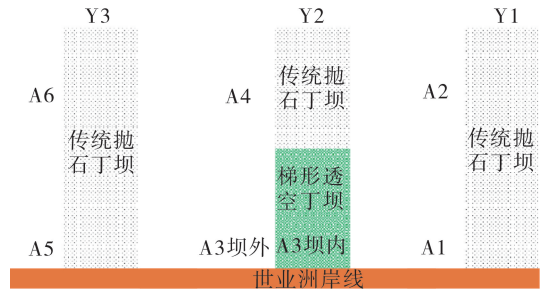


图8 梯形透空丁坝监测位置及测点布置

Fig. 8 Trapezoidal hollow spur dike monitoring location and measuring point arrangement

表 2 为沉积物粒径和有机质含量监测结果。可见,第二次监测中沉积物的极值范围大于第一次监测,由原来只有较大粒径的石块发展到有各粒径的沉积物;第三次和第四次监测中梯形透空丁坝内的沉积物最大和最小粒径较前两次监测相差较大,但已趋于稳定。丁坝内流速较小,沉积物在通过坝身孔洞进入坝内时由于流速变小发生沉积。4 次监测中梯形透空丁坝外测点的有机质含量较不稳定,尤其是第二次监测与其他几次监测结果相差较大,原因在于第二次监测处于汛期,受水流影响较大,但丁坝外有机质含量总体呈增加趋势。丁坝内有机质含量呈增加趋势,说明丁坝内水流条件稳定,受外界条件影响较小,适合底栖动物栖息。梯形透空丁坝内底部和坝后缓流区流速较小,有利于保持有机质的含量,并且随着时间的推移,水流中携带的有机物经过丁坝内和缓流区时由于流速减小而发生沉降,会增加其附近的有机质含量。



表2 沉积物粒径和有机质含量监测结果

Table 2 Monitoring results of sediment particle size and organic matter content

监测点位	监测频次	沉积物粒径/ $\mu\text{m}$		有机质含量/%	
		最大值	最小值	最大值	最小值
A3 坝外	第一次监测	241.88	232.03	2.19	1.88
	第二次监测	269.54	209.88	0.33	0.24
	第三次监测	56.97	48.80	2.75	1.96
	第四次监测	54.21	48.64	2.87	2.03
A3 坝内	第一次监测	0	0	0	0
	第二次监测	221.60	197.22	0.30	0.23
	第三次监测	45.08	30.31	2.89	1.91
	第四次监测	43.29	31.29	2.87	1.86

采用 Shannon-Wiener 指数  $H'$  和 Simpson 多样性指数  $D_s$  表征研究区底栖动物群落结构, 结果见表 3。4 次监测中, Y1 传统抛石丁坝测点底栖动物  $H'$  和  $D_s$  均先降低后增大再降低, 波动较大; Y2 梯形透空丁坝测点底栖动物  $H'$  和  $D_s$  均呈递增趋势并趋于稳定; Y3 传统抛石丁坝测点底栖动物  $H'$  先降低后增大,  $D_s$  则基本稳定。同时, 后 3 次监测 Y2 梯形透空丁坝测点的底栖动物  $H'$  高于 Y1 和 Y2 传统抛石丁坝测点, 说明随着生境的慢慢恢复, 梯形透空丁坝能够为底栖动物提供更好的栖息场所。

#### 4 梯形透空丁坝局部水动力特性对中华绒螯蟹生境的影响

根据梯形透空丁坝的结构特点, 分别选择迎流面开 2 孔(切面 1)、无孔(切面 2)和开 1 孔(切面 3)的切面分析梯形透空丁坝不同区域三维水动力特性变化对中华绒螯蟹生境的影响, 切面位置如图 9 所示。

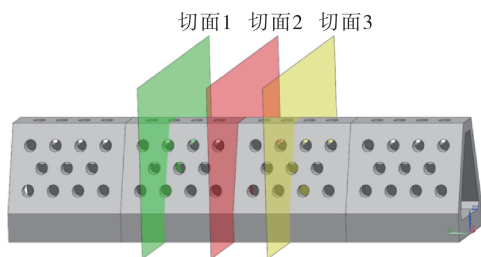


图9 梯形透空丁坝切面位置

#### 4.1 汛期径流条件

中华绒螯蟹的抱卵蟹一般于 4 月底、5 月初孵出蚤状幼体, 蚤状幼体先后经过 5 次蜕皮, 于 5 月底、6 月初发育成为大眼幼体(俗称蟹苗), 开始进行索饵洄游, 此时为研究河段的汛期。中华绒螯蟹的抱卵蟹对流速和紊动能有一定需求, 因此, 重点分析汛期径流条件(工况 1)下梯形透空丁坝周围流速场和紊动能变化对中华绒螯蟹繁殖和索饵洄游的影响。

工况 1 条件下, 梯形透空丁坝局部流速场如图 10 所示。由图 10 可见, 梯形透空丁坝迎流面产生上升流, 将主流引导至丁坝后上方区域, 该区域的模型流速达到 0.4 m/s, 对应原型流速达到 2 m/s。而坝前近底处、坝内以及坝后则形成缓流区, 模型流速在 0.1 m/s 以下, 对应原型流速在 0.5 m/s 以下, 缓流区的流速范围为中华绒螯蟹繁殖的适宜流速。工况 1 条件下, 梯形透空丁坝局部紊动能分布如图 11 所示。由图 11 可见, 受到上升流的影响, 丁坝后上方的紊动能强度较大, 沿水流方向呈射流状扩散, 而坝内和坝后的紊动能则相对较小, 促进了丁坝前后水体的交换, 在为中华绒螯蟹提供庇护的同时, 增加了水中的溶解氧浓度, 为中华绒螯蟹抱卵蟹提供氧气。

中华绒螯蟹的大眼幼体具有较强的游泳能力, 兼营浮游及底栖生活, 且在水体表层的数量远多于深层。结合图 10 和图 11 可知, 布置梯形透空丁坝后, 流速较大的区域主要在中层水体, 且紊动能分布的范围基本与梯形透空丁坝坝高持平, 在丁坝后上方以水平传输为主, 在垂向上的影响范围并未达到水体表层。因此, 梯形透空丁坝对中华绒螯蟹大眼幼体的索饵洄游影响较小。

#### 4.2 多年平均径流条件

汛期之后, 研究河段是中华绒螯蟹幼体的重要肥育场所, 且中华绒螯蟹每年 10—12 月在长江上游淡水河流中完成生殖蜕壳后向河口进行生殖洄游。中华绒螯蟹的发育对流速有一定要求, 且适宜的涡量能增加中华绒螯蟹的食物来源, 因此, 重点分析多年平均径流条件(工况 2)下梯形透空丁坝周围流速场和涡量场变化对中华绒螯蟹幼体发育和生殖洄游的影响。

Fig.9 Location of cut surfaces in trapezoidal hollow spur dike

表3 4次监测各测点生物多样性指数

Table 3 Biodiversity index of each dam measured point monitored for four times

测点位置	Shannon-Wiener 指数				Simpson 多样性指数			
	第一次监测	第二次监测	第三次监测	第四次监测	第一次监测	第二次监测	第三次监测	第四次监测
Y1 传统抛石丁坝	0.89	0.27	1.03	0.43	0.38	0.14	0.62	0.26
Y2 梯形透空丁坝	0.8	1.32	1.35	1.35	0.36	0.79	0.73	0.73
Y3 传统抛石丁坝	1.21	0.99	1.09	1.31	0.64	0.68	0.66	0.71

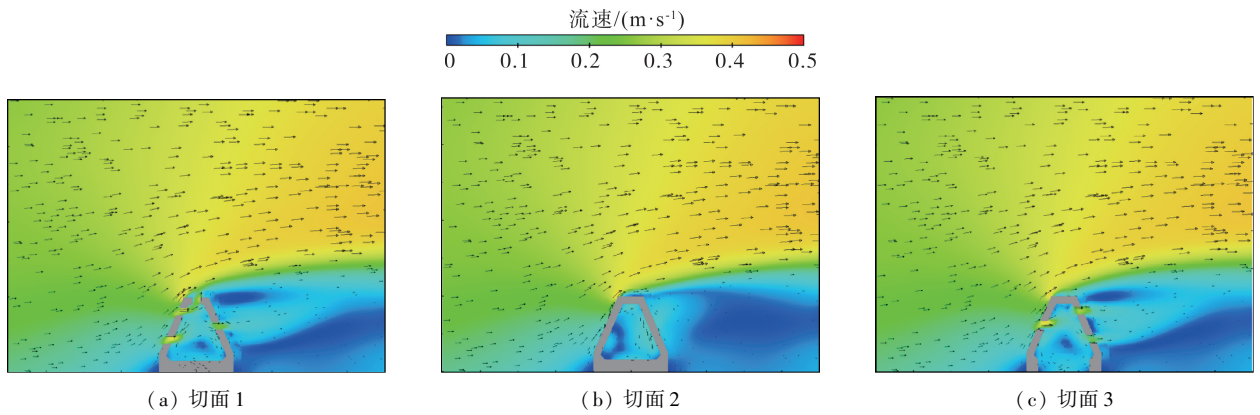


图 10 工况 1 流速场

Fig. 10 Flow velocity field of working condition 1

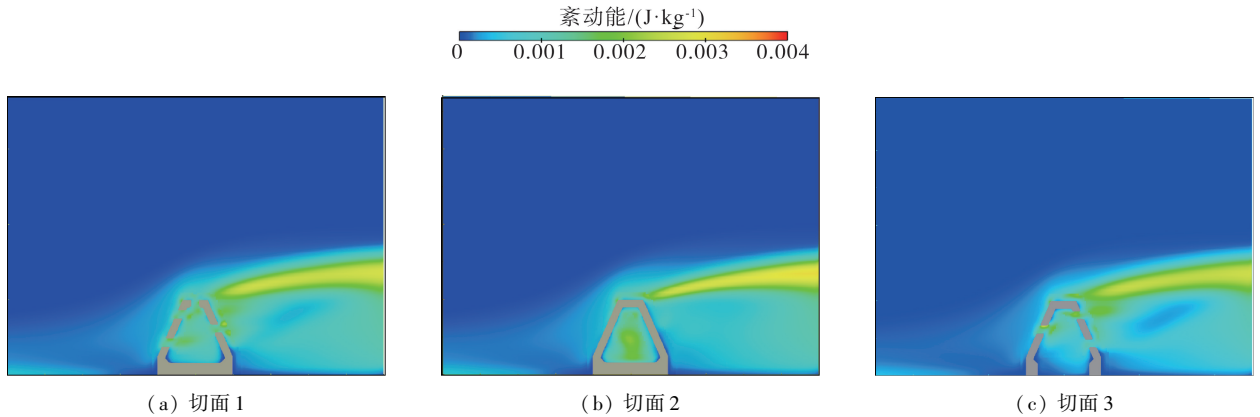


图 11 工况 1 紊动能分布

Fig. 11 Distribution of turbulent kinetic energy of working condition 1

工况 2 条件下,梯形透空丁坝局部流速场如图 12 所示。由图 12 可见,工况 2 条件下梯形透空丁坝周围流速场分布与工况 1 相似。工况 2 条件下,丁坝上升流区域的模型流速达到  $0.25 \text{ m/s}$ ,对应原型流速达到  $1.25 \text{ m/s}$ 。坝前近底处、坝内以及坝后缓流区的模型流速在  $0.05 \text{ m/s}$  左右,对应原型流速为  $0.25 \text{ m/s}$  以下。考虑中华绒螯蟹的索饵需求,其主要以水生植物和有机碎屑为食,上升流区域以及坝身开孔处水流湍急,水体垂向交换强烈,急缓流差异明显,促进了丁坝附近上下层水体以及丁坝内外水体的交换,将浮游生物、有机物和悬浮泥沙引导到丁坝内和丁坝后富集,扩大了营养盐和基础饵料的分布水平,为中华绒螯蟹尤其是其幼体提供了索饵场和育幼场。图 13 为梯形透空丁坝在工况 2 条件下不同切面的涡量场。由于梯形透空丁坝的阻水作用,丁坝坝顶以及坝身开孔处产生较大的涡量值,局部涡量值达到  $\pm 25 \text{ s}^{-1}$  以上,而其他区域的涡量值基本稳定在  $-5 \sim 5 \text{ s}^{-1}$  之间。坝内和坝后的涡量分布使沉积物中的有机质颗粒再悬浮于水体中,易于诱集中华绒螯蟹形成索饵场。

中华绒螯蟹一般在每年的 10—12 月进行生殖洄游。结合图 12 和图 13 可知,工况 2 条件下梯形

透空丁坝局部原型流速达到  $1.25 \text{ m/s}$ ,但其影响区域主要在中层水体,且该流速仍然处于中华绒螯蟹适宜的流速范围,梯形透空丁坝在河道断面上也并未形成物理阻隔。因此,梯形透空丁坝对中华绒螯蟹的生殖洄游影响较弱。

#### 4.3 枯季平均径流条件

枯季径流(工况 3)条件下,研究河段是中华绒螯蟹重要的越冬场所,随着温度的降低,中华绒螯蟹减少摄食开始越冬。中华绒螯蟹的越冬活动对流速和紊动能有一定要求,因此,重点分析工况 3 条件下梯形透空丁坝周围流速场和紊动能变化对中华绒螯蟹越冬活动的影响。

图 14 为工况 3 条件下梯形透空丁坝不同切面的流速场。由图 14 可见,枯季流速较小,丁坝上升流区域的模型流速达到  $0.12 \text{ m/s}$ ,对应原型流速达到  $0.6 \text{ m/s}$ ,坝前近底处、坝内以及坝后的模型流速基本在  $0.04 \text{ m/s}$  左右,对应原型流速为  $0.2 \text{ m/s}$  左右,为中华绒螯蟹的抱卵及越冬提供其所需的缓流或静水环境。同时,丁坝的开孔结构也促进了丁坝周围水体的交换,避免了枯季因水流流动较差引起的水生生态系统恶化<sup>[24]</sup>。图 15 为梯形透空丁坝在工况 3 条件下不同切面的紊动能分布。由图 15 可

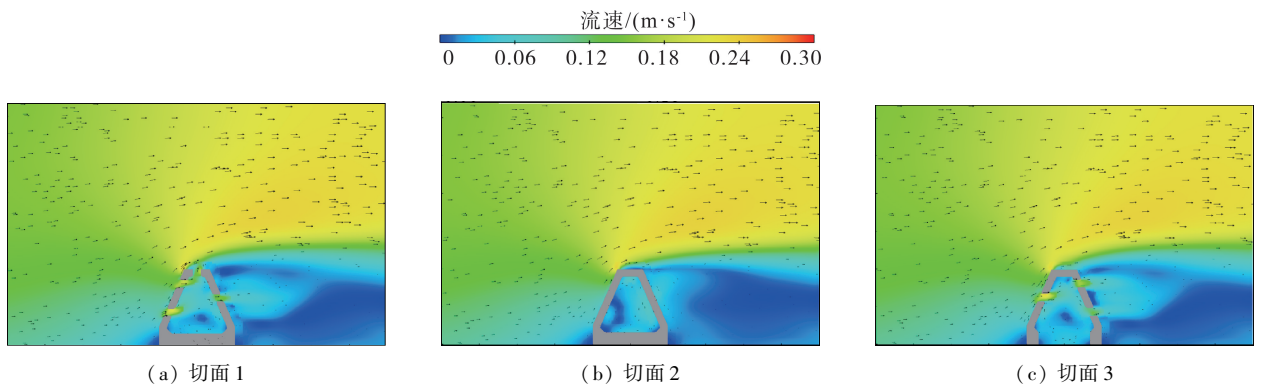


图 12 工况 2 流速场

Fig. 12 Flow velocity field of working condition 2

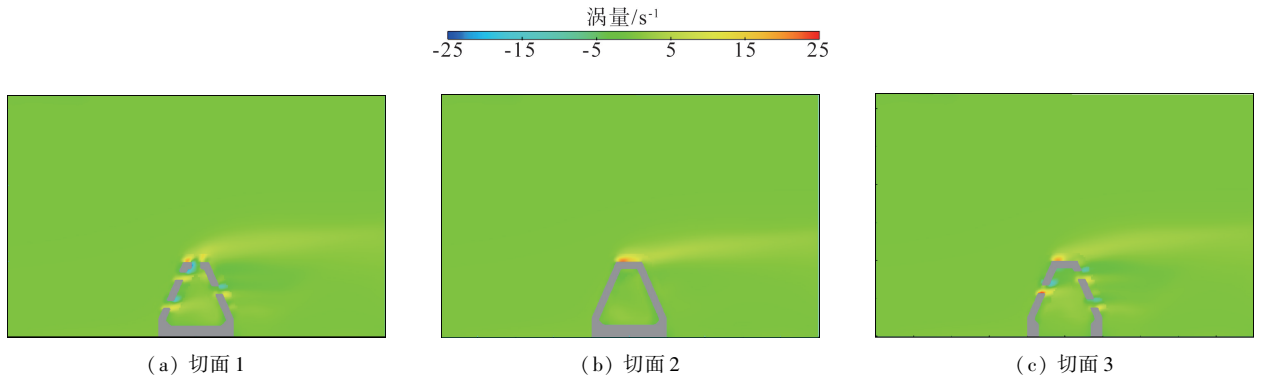


图 13 工况 2 涡量场

Fig. 13 Vortex field of working condition 2

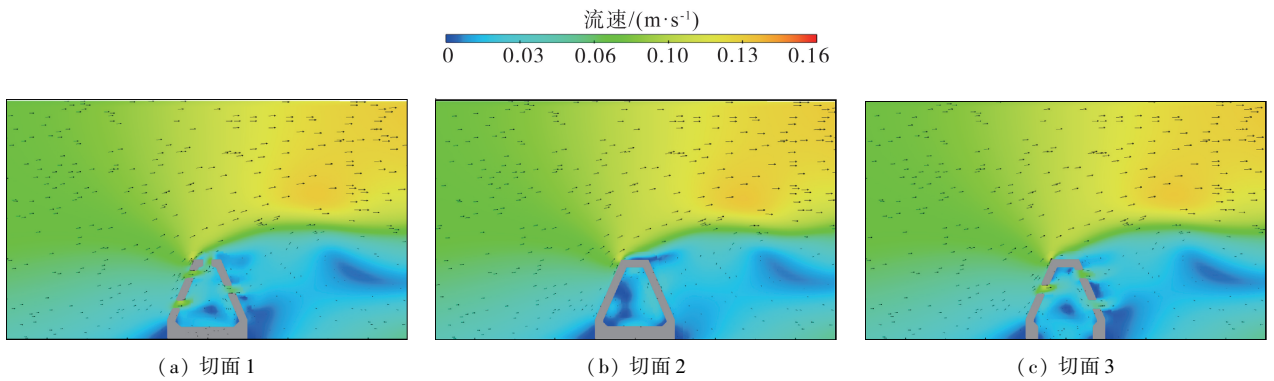


图 14 工况 3 流速场

Fig. 14 Flow velocity field of working condition 3

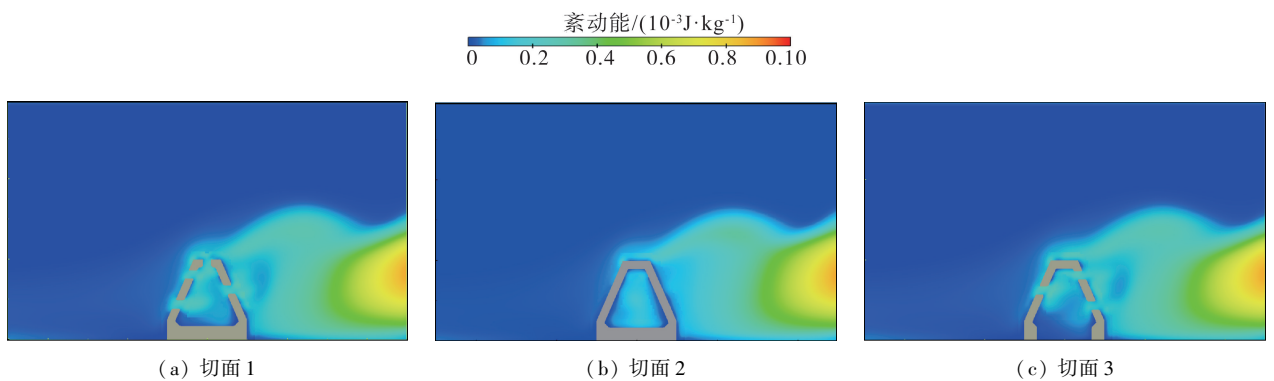


图 15 工况 3 紊动能分布

Fig. 15 Distribution of turbulent kinetic energy of working condition 3



知,梯形透空丁坝周围紊动能变化主要出现在坝后,水流在垂向的紊动范围略高于坝顶,且在坝后沿水流方向呈散射状传播,使得坝后始终处于水流低紊动区域,为中华绒螯蟹和青虾的越冬活动提供溶解氧。

## 5 结 论

a. 梯形透空丁坝迎流面产生的上升流将主流引导至丁坝后上方,在汛期为中华绒螯蟹提供了避洪场所;丁坝周围流速场呈现坝前、坝上流速变化复杂,坝内、坝后流速相对较小的分布规律,为中华绒螯蟹的繁殖和抱卵蟹的发育提供了有利条件。

b. 梯形透空丁坝迎流面产生的上升流可以促进上下层水体的交换,将浮游生物、有机物等饵料引导至坝内和坝后富集,坝内和坝后的涡量分布也使饵料再悬浮于水体中,在汛期后为中华绒螯蟹提供了索饵场和育幼场。

c. 梯形透空丁坝坝内和坝后较小的流速在枯季为中华绒螯蟹提供了越冬所需的缓流环境,坝内和坝后的紊动能为中华绒螯蟹提供了越冬所需的溶解氧,从而为中华绒螯蟹提供适宜的越冬场。

d. 梯形透空丁坝坝内有机质含量呈增大趋势,底栖动物多样性指数呈增大趋势并趋于稳定,为底栖动物提供了索饵场、育幼场和越冬场,增加底栖动物的多样性,实现其生境的恢复与重建。

### 参考文献:

[ 1 ] 长江南京以下深水航道建设工程指挥部. 长江南京以下 12.5 米深水航道工程实践与创新[M]. 北京:人民交通出版社,2020.

[ 2 ] 路川藤,黄华聪,钱明霞. 长江口北槽丁坝坝田区潮流及污染物迁移扩散特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(3):265-271. (LU Chuanteng, HUANG Huacong, QIAN Mingxia. Tidal current and pollutant diffusion characteristics in spur dike field of North Passage in Yangtze Estuary [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44 (3): 265-271. (in Chinese))

[ 3 ] 陈求稳,张建云,莫康乐,等. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施[J]. 水科学进展,2020,31(5):793-810. (CHEN Qiwen, ZHANG Jianyun, MO Kangle, et al. Effects of hydropower development on aquatic environment and adaptive managements[J]. Advances in Water Science, 2020,31(5):793-810. (in Chinese))

[ 4 ] 陈含墨,渠晓东,王芳. 河流水力条件对大型底栖动物分布影响研究进展[J]. 环境科学研究,2019,32(5):758-765. (CHEN Hanmo, QU Xiaodong, WANG

Fang. Research progress of river dynamic influences on the distribution of macroinvertebrates [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32 (5): 758-765. (in Chinese))

[ 5 ] 华祖林,董越洋,褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法[J]. 水资源保护,2021,37(1):140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU Kejian. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 140-144. (in Chinese))

[ 6 ] 闫毓,袁赛瑜,唐洪武,等. 上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):329-334. (YAN Yu, et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021,49(4):329-334. (in Chinese))

[ 7 ] 班璇,郭舟,熊兴基,等. 长江中游典型河段底栖动物的物理栖息地模型构建与应用[J]. 水利学报,2020,51(8):936-946. (BAN Xuan, GUO Zhou, XIONG Xingji, et al. Applying physical habitat model of zoobenthos in typical reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (8): 936-946. (in Chinese))

[ 8 ] 马雅雪,姚维林,袁赛波,等. 长江干流宜昌-安庆段大型底栖动物群落结构及环境分析[J]. 水生生物学报,2019,43(3):634-642. (MA Yaxue, YAO Weilin, YUAN Saibo, et al. Community structure and environmental analysis of macrozoobenthos in Yichang-Anqing Reaches of the Yangtze mainstem [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43 (3): 634-642. (in Chinese))

[ 9 ] FRIEDRICHS M, GRAF G. Characteristic flow patterns generated by macrozoobenthic structures [J]. Journal of Marine Systems, 2009, 75(3/4):348-359.

[ 10 ] MORRIS M, MOHAMMADI M H, DAY S, et al. Prediction of Glossosoma biomass spatial distribution in Valley Creek by field measurements and a three-dimensional turbulent open-channel flow model [J]. Water Resources Research, 2015, 51(3):1457-1471.

[ 11 ] 赵伟华,杜琦,郭伟杰. 基于底栖动物多样性恢复的减脱水河段生态流量核算[J]. 水生态学杂志,2020,41(5):49-54. (ZHAO Weihua, DU Qi, GUO Weijie. Establishing the ecological flow of dewatered river reaches based on restoration of macroinvertebrates diversity [J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41 (5): 49-54. (in Chinese))

[ 12 ] 许祚,张博曦,及春宁,等. 梯级水库对南渡江干流底栖动物丰枯水期沿程变化的影响[J]. 水资源保护,2019,

- 35(2):60-66. ( XU Dong, ZHANG Boxi, JI Chunling, et al. Streamwise variation of zoobenthos along main stream of Nanduijiang River in wet and dry seasons under influence of cascade reservoirs [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):60-66. (in Chinese))
- [13] PAN B Z, WANG Z Y, LI ZW, et al. Macroinvertebrate assemblages in relation to environments in the West River, with implications for management of rivers affected by channel regulation projects [J]. Quaternary International, 2015, 384:180-185.
- [14] 黄翠, 刘明典, 刘绍平, 等. 长江中游航道整治悬浮物对水生生物影响预测分析: 以新洲至九江河段为例[J]. 环境影响评价, 2019, 41(6):50-55. (HUANG Cui, LIU Mingdian, LIU Shaoping, et al. Prediction and analysis of the influence of suspension on aquatic life in waterway regulation in the middle reaches of the Yangtze River: taking the section from Xinzhou to Jiujiang River as an example[J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41(6):50-55. (in Chinese))
- [15] 游立新, 王珂, 祝坐满, 等. 长江中游江段水生生物资源调查及航道整治工程影响预测分析[J]. 环境影响评价, 2017, 39(6):43-46. (YOU Lixin, WANG Ke, ZHU Zuoman, et al. Aquatic biological resource survey in the middle reaches of the Yangtze River and prediction analysis of the impact of Navigation Channel renovation [J]. Environmental Impact Assessment, 2017, 39(6):43-46. (in Chinese))
- [16] KUN L, ZHEN X Z, HAI JY, et al. Effects of instream restoration measures on the physical habitats and benthic macroinvertebrates in an agricultural headwater stream [J]. Ecological Engineering, 2018, 122:252-262.
- [17] 韩龙喜, 贾更华, 杨钟凯, 等. 平原河网地区水利工程水生态环境效应评估指标构建[J]. 水资源保护, 2011, 27(5):65-69. (HAN Longxi, JIA Genghua, YANG Zhongkai, et al. Evaluation index system of ecological environmental impact of water conservancy projects in plain river network area [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(5):65-69. (in Chinese))
- [18] 李增辉, 曲丹, 孙德智, 等. 宜兴市莲花荡水系整治工程前后生态健康评价[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(3):181-192. (LI Zenghui, QU Dan, SUN Dezhi, et al. Ecosystem health assessment: a case study of Lianhuadang River system before and after the water quality improvement projects [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(3):181-192. (in Chinese))
- [19] 蒋金鹏, 冯广朋, 章龙珍, 等. 长江口中华绒螯蟹抱卵蟹生境适宜度初步评估[J]. 海洋渔业, 2014, 36(3):232-238. (JIANG Jinpeng, FENG Guangpeng, ZHANG Longzhen, et al. Preliminary assessment on habitat suitability of Eriocheir sinensis spawning crabs in Yangtze River Estuary [J]. Marine Fisheries, 2014, 36(3):232-238. (in Chinese))
- [20] CAREY D A. Particle resuspension in the benthic boundary layer induced by flow around polychaete tubes [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1983, 40(1):301-308.
- [21] 掌晓峰, 虞丽娟, 毛文武, 等. 基于 Zigbee 网络的中华绒螯蟹养殖中溶氧量智能控制系统研究与应用[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(6):866-872. (ZHANG Xiaofeng, YU Lijuan, MAO Wenwu, et al. The research and application of oxygen intelligent control based on Zigbee in Eriocheir sinensis aquaculture [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(6):866-872. (in Chinese))
- [22] 李然, 李嘉, 李克锋, 等. 水动力学条件对复氧过程的影响研究[J]. 水科学进展, 2002(5):542-546. (LI Ran, LI Jia, LI Kefeng, et al. Study on effect of hydrodynamic characteristics on reaeration progress [J]. Advances in Water Science, 2002(5):542-546. (in Chinese))
- [23] 王梅力, 祖福兴, 徐绩清, 等. 复杂河道边界对滑坡涌浪周期的影响[J]. 水利水运工程学报, 2020(5):33-39. (WANG Meili, ZU Fuxing, XU Jiqing, et al. Effect of complicated river boundaries on the cycle of landslide surge [J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(5):542-546. (in Chinese))
- [24] 焦军丽, 马巍, 裴倩楠, 等. 三峡库区支流库湾水体富营养化演变特征研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 6(6):544-548. (JIAO Junli, MA Wei, PEI Qiannan, et al. Study on the characteristics of eutrophication evolution of tributaries of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 6(6):544-548. (in Chinese))

(收稿日期:2021-09-29 编辑:王芳)

