

洄游鱼类坝下集群的水动力学特征与行为预测*

马卫忠¹⁾ 安瑞冬^{2)†} 李敏讷²⁾ 李 嘉²⁾

(1)中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 550081, 贵州贵阳;
2)四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 610065, 四川成都)

摘要 以青藏高原某高坝工程为案例, 重点关注鱼类在坝下洄游过程中, 生境水力学条件的变化及生态行为学响应. 通过综合采用生态调查、原位观测和数值模拟的方法, 定量识别鱼类集群效应与上溯路线, 解构鱼类集群喜好水深、流速和紊动强度. 通过对3—6月过鱼季节典型运行工况的反演, 提出适宜鱼类洄游需求的生境水力学条件, 实现对过鱼设施效果定量评估和对鱼群行为的预测.

关键词 鱼道进口; 上溯轨迹; 坝下集群; 生境水动力学; 生态行为

中图分类号 X835

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020179

水利水电工程的修建破坏了天然河流的生态连通性, 阻隔了鱼类上溯洄游通道, 破坏了鱼类的生存繁殖和基因交流. 这些不利影响已经成为水利水电开发的主要生态环境制约因素^[1]. 西南源区河流生态环境脆弱、物种稀有, 且海拔高、山区河流大、窄河谷特点, 造成过鱼设施布置困难^[2]. 其关键问题与技术难点是: 如何定位洄游鱼类在坝址下游的上溯路线和聚集区域, 据此设计鱼道进口位置或通过调度塑造主动诱导流态, 引导鱼类趋流进入集诱鱼设施^[3].

从国内外研究来看: Tudorache 等^[4]通过对鱼类游泳速度和耗氧量的分析, 确定过鱼设施的最大可通过流速; Kemp^[5]的研究建议采用临界游泳速度作为过鱼设施设计流速; 安瑞冬等^[6]研究通过结合游泳能力测试与大比尺物理模型试验, 分析了鱼类持续游动与过鱼设施结构的关系, 进一步结合水力学与生态行为学开展耦合分析^[7]. 对生境水力学条件的评估, 学者广泛采用数值模拟与模型试验的手段^[8-11]; Fuentes 等^[12]提出了用于评估和改进鱼道性能依据的方法; 常剑波等^[13]对中华鲟葛洲坝栖息地多年的水力学环境进行分析, 通过分析其在不同流速段的频率获得流速偏好曲线; Baek 等^[14]将加权可利用面积(WUA)作为衡量诱鱼效率的指标, 定量评价流态的适宜性; Pérez 等^[15]最新研究则聚焦于栖息地变化对鱼类行为的影响. 本论文是在水动力学原型观测与坝下鱼类探测基础上, 开展集诱鱼流态与鱼类行为的响应研究, 为预测生物行为提供了新的思路.

1 典型洄游鱼类与游泳能力

1.1 过鱼设施工程概况 Z水电站位于青藏高原Y江中游, 为混凝土重力坝式的II等大(2)型工程(图1). 已于2014年投产运行, 坝址处多年平均流量为 $1\ 010\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 水库正常蓄水位为3 310 m, 电站最大坝高为116 m, 左侧河床布置6孔溢流坝, 右侧河床布置6台水轮发电机组. 电站引用流量可达 $1\ 071.3\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 装机容量510 MW, 年发电量25.008亿 $\text{kw} \cdot \text{h}$. 该水电站过鱼设施采用竖缝式鱼道结构(图2), 目前已建成世界海拔最高、提升高度最大和长度最长的鱼道工程. 设施布置于河床右岸, 主要由坝下3个进口、尾水渠段、暗涵段、岸坡段、过坝段、出口明渠段、出口和鱼道观测研究室组成, 全长3.6 km.

1.2 典型洄游鱼类与游泳能力

1.2.1 典型洄游鱼类 近年来, 由于过度捕捞和外来鱼类的入侵, 致使Y江的鱼类资源急剧减少. 根据水利部中国科学院水工程生态研究所调查结果: 在鱼类种类组成上, Y江中上游干支流分布鱼类26种, 其中高原鱼类区系的种类16种, 占鱼类种类总数的62%; 从区系特点上看, 主要由鲤科的裂腹鱼亚科和鳅科的条鳅亚科2大类群组成, 其中裂腹鱼类为优势类群, 如异齿裂腹鱼、巨须裂腹鱼和拉萨裂腹鱼, 属典型的高原鱼类区系, 这与整个青藏高原的鱼类组成特点相一致; 从渔获物调查来看, 拉萨裸裂尻鱼、双须叶须

* 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0502207); 国家自然科学基金资助项目(51779162)

† 通信作者: 安瑞冬(1983—), 男, 博士, 研究员. 研究方向: 生态水力学. E-mail: anruidong@scu.edu.cn

收稿日期: 2020-04-15



图 1 YJZ水电站坝下(箭头为鱼道进口位置)



图 2 竖缝式鱼道

鱼、异齿裂腹鱼、拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼、尖裸鲤、黑斑原鲃、黄斑褶鲃等构成了流域鱼类资源量的 99% 以上。

从过鱼对象来看,异齿裂腹鱼、巨须裂腹鱼和拉萨裂腹鱼具有一定的短距离生殖洄游习性,在繁殖季

节对流水生境具有一定的趋向性,从保护其溯游路线及保护其不同种群间基因交流的角度出发,应作为主要过鱼目标;尖裸鲤尚未在研究河段调查到^[16],但其为西藏自治区一级保护动物,从促进交流和物种保护的角度而言,将其作为兼顾对象(图 3)。

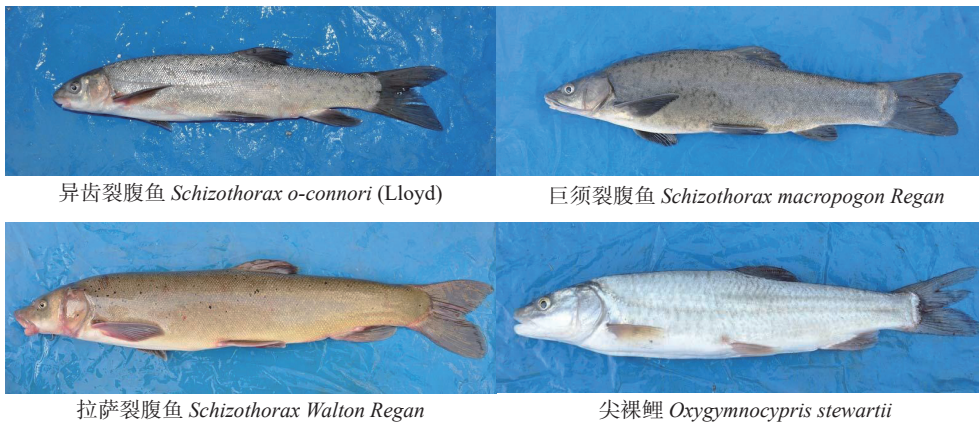


图 3 典型洄游鱼类

1.2.2 过鱼对象游泳能力 异齿裂腹鱼、巨须裂腹鱼和拉萨裂腹鱼,产卵和觅食喜好急流和砾石滩,经过长期的自然选择和演化,具有较强的抵抗极低水温的能力,主河道江段也可作为其越冬场所。过鱼对象的生殖洄游时间一般都在春季,产卵的时间集中在 3—6 月。采用封闭环形水槽开展游泳能力测试,根据流速递增法获得感应流速(v_r)、临界流速(v_c)和突进泳速(v_b)指标描述洄游的流速喜好,采用现场开放水槽的试验进行修正,获得了游泳能力测试结果(表 1)。

表 1 主要过鱼对象游泳能力测试结果 $m \cdot s^{-1}$

鱼名	感应流速	临界流速	突进泳速
异齿裂腹鱼	0.07	0.95	1.53
巨须裂腹鱼	0.04	0.83	1.22
拉萨裂腹鱼	0.08	0.91	1.37

1.2.3 适宜鱼类集群的生境水力学条件 综合鱼类

的趋流特性和克流能力来看, v_r 指能够使鱼类产生趋流反应的最小流速值,它反映鱼类洄游路线中出现的最小流速。 v_b 决定了环境流场可接受的最大流速,可作为鱼类持续洄游泳速的上限。而事实上鱼类并不可能总保持最高速度,它们在持续游动时采用的是“冲刺-滑行”的最省力游泳模式,在生态行为学上以鱼类的 v_c 进行定义。鱼类游泳能力测试需要考虑固体阻塞效应,以 v 表示鱼类感应流速和临界速度,修正后的游泳速度(v_R)为修正系数 R 与对应游泳速度 v 的乘积。其中,修正系数 R 的计算式为

$$R = (1 + \varepsilon_s), \quad (1)$$

式中: ε_s 为固体阻塞影响因素; ε_s 计算式为

$$\varepsilon_s = \tau \lambda \left(\frac{A_0}{A_T} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

式中: τ 是取决于水槽截面形状的量纲为一的常数,

$\tau=0.8$; λ 为鱼形状因子, $\lambda = 0.5 \times (TL/T)$, 其中鱼体厚度 T 可表示为体高和体宽的平均值; A_0 为鱼最大截面积, $A_0 = 0.25 \pi h w$; A_T 为实验水槽截面积. 基于式(1)、(2), 可以计算出修正后的游泳速度.

鱼类集群上溯过程中的自主巡航速度 (v_{cruise}) 范围理论上应介于 $v_r \sim v_c$ 之间, 可由高斯分布公式表现为

$$v_{cruise} = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{v_{random} - v_{mean}}{\sigma_s} \right)^2 \right\}, \quad (3)$$

式中: v_{random} 表示鱼类集群上溯过程中表现出的游泳速度个体值; v_{mean} 表示游泳速度整体数学期望值; σ_s 则表示游泳速度值分布标准差. 据此, 构建了适宜鱼类集群的生境水力学范围的确定方法(表 2).

表 2 鱼类集群的适宜流速范围确定方法

指标体系	个体行为			群体行为		
	v_r	v_c	v_b	修正泳速	巡航	密集
生态行为	趋流性	冲刺-滑行	克流极限	阻塞修正	自主巡航速度	合拢后的聚集
水力学指标	v_r	v_c	v_b	v_R	v_{cruise}	环境流速
理论适宜范围	$v > v_r$	$v_r < v < v_c$	$v_r < v < v_b$	$v_{1R} < v_R < v_{2R}$	$v_r < v_{cruise} < v_c$	-
测试方法	封闭环形水槽			开放水体试验	原位观测	

2 生境水动力学原位观测与集群行为的水声学监测方法

2.1 生境水动力学原位观测 生境水动力学原位观测综合采用河流型声学多普勒测速仪 (WHRZ1200-I 型 ADCP) 和搭载于遥控电动船 HydroBoat-CP1050 上的微型剖面测速仪 (StreamPro 型 ADCP), 适用于分别为 0.5~25.0 和 0.1~7.0 m 的水深. 流速测量范围为 $\pm 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 测量精度为 $\pm 2.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 流速分辨率为 $0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 测量剖面单元最大为 128 个, 单元层厚度为 0.05~2.00 m. 水深测量精度为 $\pm 1 \text{ cm}$, 分辨率可达 1 mm(图 4).

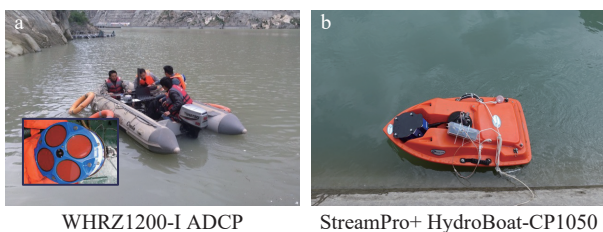


图 4 生境水动力学条件监测设备

监测过程中主要对坝下水深和流速等生境水动力学条件进行监测, 受运行影响难以获取完整工况下的坝下流场分布, 但原位观测最核心目的是对下阶段建立的数学模型进行验证. 通过监测也发现, 受运行影响, 水下地形与设计阶段存在一定差异, 研究结合实地测量水下地形进行了修正.

2.2 生物水声学监测 生物水声学监测的主要目的是了解鱼类坝下的集群效应, 基本原理是采用回波计数法放大鱼群反射信号并分析集群强度, 采用设备主

机为 GPSMAP®7416xsv, 前扫探头型号为 Panoptix™ PS31, 水平探测距离可达 120 m. 监测于 2018 年 3—5 月份连续开展, 采样时间为 09:00—19:00. 坝下右岸侧尾水渠内, 自右向左、横向间隔 30 m 于水下固定布设 3 台鱼探仪, 共监测到有效信号 5 013 个, 在水深方向 $< 2 \text{ m}$ 的表面水层出现有效信号 852 个, 2~10 m 的中间水层出现有效信号 2 658 个, $> 10 \text{ m}$ 的水层出现有效信号 1 503 个.

结合渔获物调查可以发现(图 5), 最靠近右岸 30 m 范围内(1#区域)水声学所探测到的信号占比为 70.80%, 渔获物采样为 78.20%, 为鱼类集群活动最密集区域, 日均鱼体数量为 70 尾, 平均集群密度为 $1.38 \cdot \text{dam}^{-2}$. 3—5 月份鱼类资源总量稳定, 无明显时间变化.

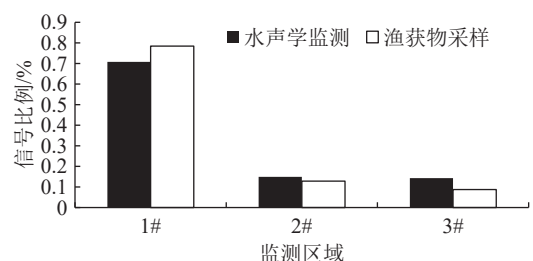


图 5 坝下鱼类声学监测结果

3 坝下流态数值模拟与生境水动力学分析

3.1 模型构建与验证

3.1.1 紊流模型耦合 VOF 方法 坝下水动力学条件复杂, 受运行和技术条件限制, 无法实现对过鱼期所有运行工况进行测量. 研究采用三维数值模拟的方

法,采用实测数据验证,对不同运行工况下水动力学条件进行反演.紊流模型选择标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型,并采用 VOF 方法追踪自由液面运动.

连续性方程为

$$\frac{\partial(v_i A_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (4)$$

动量方程为

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{1}{\varphi_F} v_j A_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + G_i + f_i, \quad (5)$$

$$\rho \varphi_F f_i = -\frac{\partial(A_j \tau_{ij})}{\partial x_j}, \quad (6)$$

$$\tau_{ii} = -2\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_i} - \frac{1}{3} \frac{\partial v_j}{\partial x_j} \right), \quad (7)$$

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} = -\mu \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right); \quad (8)$$

E_k 方程为

$$\frac{\partial E_k}{\partial t} + \frac{1}{\varphi_F} v_i A_i \frac{\partial E_k}{\partial x_i} = P_T + D_{\text{diff}_k} - \varepsilon; \quad (9)$$

ε 方程为

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{\varphi_F} v_i A_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = 1.44 \frac{\varepsilon}{E_k} P_T + D_{\text{diff}_\varepsilon} - 1.92 \frac{\varepsilon^2}{E_k}, \quad (10)$$

$$D_{\text{diff}_k} = \frac{1}{\varphi_F} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_t A_i \frac{\partial E_k}{\partial x_i} \right), \quad (11)$$

$$D_{\text{diff}_\varepsilon} = \frac{1}{\varphi_F} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{1.3} A_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right), \quad (12)$$

$$P_T = \frac{\nu_t}{\varphi_F} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \left(A_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + A_i \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right); \quad (13)$$

标准 $E_k-\varepsilon$ 方程为

$$\nu_t = C_\mu \frac{E_k^2}{\varepsilon}, \quad (14)$$

式中: v_i 、 v_j 为各方向速度分量 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); x_i 、 x_j 为各方向坐标分量; p 为压强 (Pa); ρ 为流体密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); φ_F 为网格内可供流体流动区域的体积分; A_i 、 A_j 为流体通过各个方向对应的面积分数; G_i 表示体积力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); f_i 表示黏滞力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); μ 为动力黏度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); ν_t 为紊动黏度 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); E_k 为紊动能 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$); C_μ 取值 0.09; ε 为紊动能耗散率 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$); D_{diff_k} 为紊动能扩散项; $D_{\text{diff}_\varepsilon}$ 为紊动能耗散率扩散项; P_T 为由平均速度梯度引起的紊动能 E_k 的产

生项.

本文采用 VOF 方法追踪水流自由表面运动,该过程通过求解水气两相的体积分连续方程来完成,该方程为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y} + w \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad (15)$$

式中 φ 为一个水气体积比函数, $\varphi=1$ 为计算网格中充满水体, $\varphi=0$ 为计算网格中充满气体,函数 φ 的值可以体现流体自由液面的状态和位置,实现对自由液面的追踪.

3.1.2 网格构建 数值模拟的研究区域以坝址处为基准线往上下游延长足够的距离,以尽量减少边界处对重点研究区域的影响.模拟范围为坝上 600 m 和坝下 900 m,横向宽 580 m(图 6).网格均采用六面体的结构化网格,对尾水渠、消力池和溢洪道的区域进行了局部的加密,以保证该区域的计算精度.网格总数约为 565 万, x 、 y 、 z 这三个方向的最小的尺寸均为 1.0 m,最大的尺寸分别为 6.0、7.8 和 2.8 m.

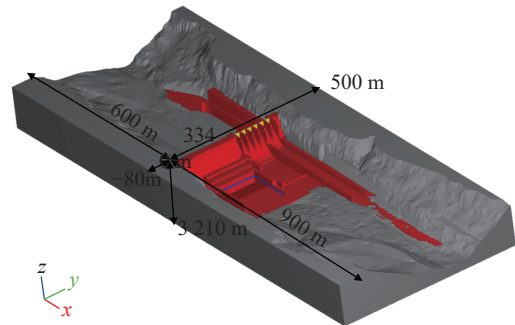


图 6 Z 电站枢纽数学模型

3.1.3 模型验证 根据现场监测的工况条件,模拟了以坝轴线右岸为原点下游 900 m 范围的流场,如图 7 所示.根据监测中水面 < 1.0 m 有效数据中 255 个测点,与相同坐标数值模拟的流速大小和方向进行对比验证.从流速大小对比来看,数学平均后流速平均为 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与实测数据相比平均相对误差在 15%,流

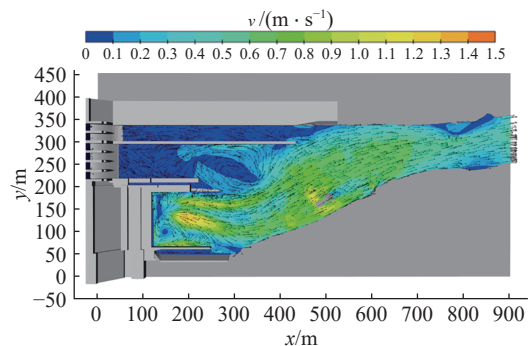


图 7 1.0 m 水深平面数值模拟流速分布

速方向平均相对误差为 12%(图 8)。坝下水流受发电尾水影响,紊动较为强烈;而实测流速并未全面反映

时均过程,但从验证结果来看,流态分布基本特征是合理和可信的。

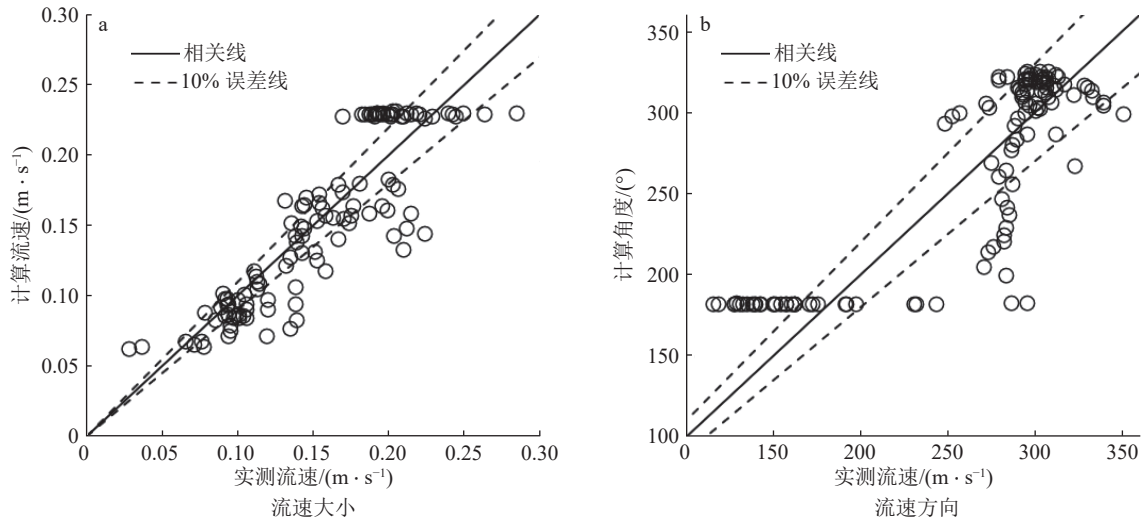


图 8 数值模拟与实测数据对比

3.2 坝下流态反演

3.2.1 典型运行工况 研究以 2016 年电站运行实际工况为对象,对主要过鱼季节 3—6 月份的运行条件进行筛选,选择概率最大的 4 种典型工况开展反演(表 3)。由于水库为日调节性能,不考虑水位变动,采用入出口流量一致的处理假定。表 3 中发电机组和闸门均由左岸向右岸依次编号,发电机组编号分别为 1F~6F。

表 3 过鱼期典型运行工况

工况编号	运行水位/m		机组运行情况	
	计算入口	计算出口	发电机组	机组流量分配/($m^3 \cdot s^{-1}$)
1	3307.85	3248.16	1F、4F、5F	145、92、143
2	3308.62	3248.10	3F、4F、5F	136、90、83
3	3308.18	3248.08	3F、4F、5F	138、78、76
4	3307.35	3248.31	1F、2F、4F~6F	145、104、64、128、138

3.2.2 生境水动力学条件 模拟范围为以坝轴线右岸为原点下游 900 m(x)及河段横断面 450 m(y)的范围。模拟了该区域内的流速及紊动,如图 9-a、b 所示。在此以工况 1 为对象进行详细论述。水流从 1F、4F、5F 水轮机下泄,经尾水渠反坡消能后,在两侧导墙的作用下流入下游河道。由于该工况下溢流坝段没有泄流,左岸消力池内存在大范围的低流速回流,尾水渠反坡内流速较小,范围为 $0 \sim 0.2 m \cdot s^{-1}$,扩散后主流流速范围增大到 $0.3 \sim 0.9 m \cdot s^{-1}$,受电站机组运行不对称的影响,尾水渠两侧导墙附近区域流速较中间区域大。消力池内回流区的流速较低,流速范围为 $0 \sim 0.3 m \cdot s^{-1}$,下游河道主流流速范围为 $0.4 \sim 1.0 m \cdot s^{-1}$ 。

在垂向分布上,尾水渠内流速分布不均匀,底层流速大于表层流速,特别是在尾水渠反坡内流速分布更为不均匀,垂向流速 $> 1.0 m \cdot s^{-1}$,最小仅为 $0.1 m \cdot s^{-1}$ 。靠近尾水渠两侧导墙区域紊动能变化仍然较为剧烈,范围为 $0.020 \sim 0.050 kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ 。随着水流流出尾水渠,扩散至下游河道和左岸消力池,流线变得顺直,紊动能进一步降低,下游河道及消力池回流区的紊动能均 $< 0.010 kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ 。

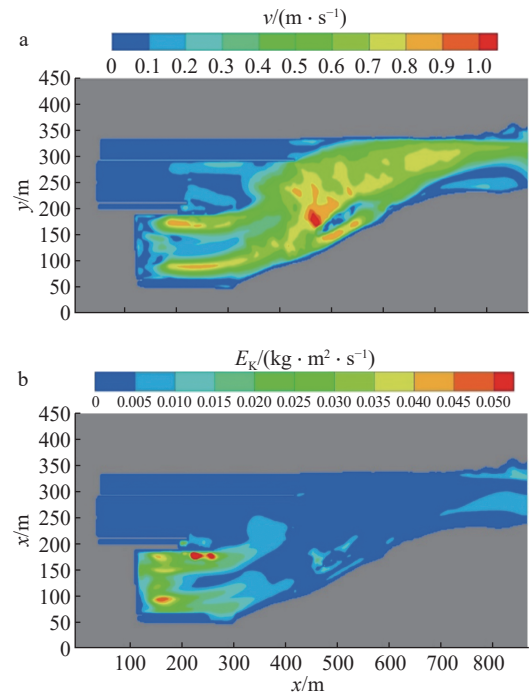


图 9 1.0 m 水深流速 (a) 和紊动能 (b) 数值模拟结果 (工况 1)

4 鱼类集群的生境适宜性与行为预测

4.1 生境适宜性 为了量化坝下鱼类集群的生境适宜性,提取出网格内水深、流速、流速梯度、涡量、紊动能等水力学因子,采用修正的集群生境适宜度指数 (schooling habitat suitability index, SHSI) 对坝下 150 m 范围内的区域进行生境适宜性评价,评价方法为

$$I_{SHSi} = f(V_i, D_i, E_{Ki}, V_{ori}), \quad (16)$$

式中: I_{SHSi} 为第 i 个网格单元的综合生境适宜性指标; V_i 为第 i 个网格单元流速的适宜性评价结果; D_i 代表第 i 个网格单元水深的适宜性评价结果; E_{Ki} 代表第 i 个网格单元紊动能的适宜性评价结果; V_{ori} 代表第 i 个网格单元涡量的适宜性评价结果。

其中,适宜集群流速根据游泳能力测试结果为 $0.13\sim 0.87, 0.20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 最优,最优值为 1, 不适宜为 0, 采用线性插值进行计算,其他指标的计算方法相同。根据水声学调查,水深最优值为 23.46 m,紊动能范围为 $0.003\sim 0.016 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, 涡量范围为 $0.006\sim 0.063 \text{ s}^{-1}$ 。由于该评价方法采用乘积计算,本文将综合 $I_{SHS} > 0.05$ 的区域定义为适宜鱼类集群区域。

模拟范围为以坝轴线右岸为原点下游 900 m (x) 及河段横断面 450 m (y) 的范围。计算了该区域内的 I_{SHS} , 如图 10 所示。整体来看,工况 1 坝下的综合 SHSI 较低,介于 $0\sim 0.20$ (图 10)。说明坝下适合鱼类集群分布的生境面积较少。其中,综合 I_{SHS} 为 $0\sim 0.20$ 范围的区域大部分集中在坝下 450 m 范围内,并且主要集中在河道的右岸。消力池及河道右岸生境极差,不适合鱼类集群活动,坝下鱼类会主动避开这些区域,这与电站尾水下泄流量有关,说明鱼类总是喜好在有下泄流量的区域进行集群活动,这与前面水声学调查的结果基本一致。

4.2 洄游行为预测 寻找吸引流是鱼类通过其侧线

系统感知水动力学条件的过程,当水力学因子对其产生了足够的吸引力,趋流性便开始发挥作用,鱼类会由四处游动转变为朝着一个固定方向的游动,具备了方向性。本研究假定,对鱼类洄游行为最直接的诱导来源于流速、水深和紊动强度,将其视为不停搜索一定范围内最优水力学条件的生物粒子,这种运动主要为被动的对流态的响应。

计算中鱼类的上溯行为由粒子替代,对鱼类所在区域的流场进行精细的网格划分。鱼类侧线系统具备一定的感知范围,在其感知范围内的网格所代表的流场中,鱼类会根据其对水力学条件的偏好选择具有其偏好的水力学特性所在的网格作为下一步游动的位置,以此循环完成上溯。

$$fw_s = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{p_s - u_s}{\sigma_s}\right)^2\right\}, \quad (17)$$

$$F = \sum_{s=1}^3 fw_s \times \alpha_s, \quad (18)$$

其中: s 分别取 1、2、3,依次表示流速、流速梯度以及紊动能 3 种水力学因子; fw_s 表示鱼类对第 s 种水力学因子具体数值的偏好程度,即权重值; α_s 表示鱼类对第 s 种水力学因子的偏好程度,即权重值; p_s 表示的是感知半径内的水力学值; u_s 则是对于鱼类而言最偏好的水力学值; σ_s 则表示的是各个因子的选择范围大小,采用式(17)、(18)计算出的偏好程度 (F) 越大,表明鱼类下一时刻运动至该位置的可能性就越大。

模拟范围为以坝轴线右岸为原点下游 900 m (x) 及河段横断面 450 m (y) 的范围,计算了该区域内的鱼类可能的上溯通道,如图 11 所示。根据计算,在考虑偶然因素的前提下,上溯至尾水渠内的成功率为 45.22%; 1#上溯通道位于河道右岸,平均宽度约为 10 m, 2#上溯通道和 3#上溯通道位于河道左岸,其中, 2#上溯通道在坝下 500 m 处改变方向,沿着河道中间

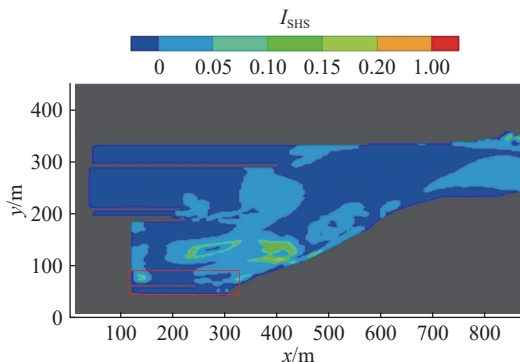


图 10 工况 1 生境适宜性评价结果
(红色框为水声学调查 1#区域)

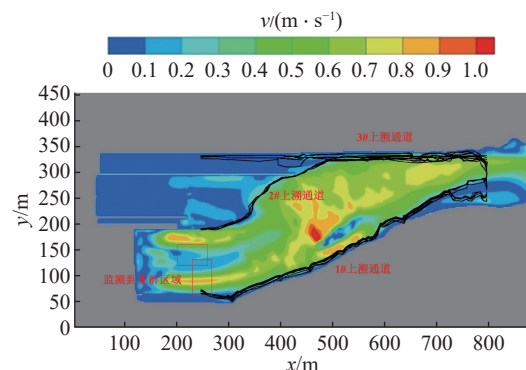


图 11 工况 1 鱼类上溯行为预测流速结果

区域通往尾水渠 1#鱼道进口附近, 3#上溯通道在坝下 500 m 处, 继续沿着河道左岸上溯直至溢洪道内(图 11)。

综合来看, 工况 1~4 鱼类上溯至尾水渠内的成功率分别为 45.22%、80.00%、80.00%、58.26%。由可能上溯通道末端推测出集群的区域与水生声学调查的结果类似, 说明该预测方法反映出的规律与实际情况一致, 这就能为过鱼期的生态调度提供参考借鉴。

5 结论

以青藏高原 Z 水电站为案例, 选择具有生殖洄游需求的 4 种过鱼对象开展研究。开展鱼类游泳能力测试, 以感应流速、临界流速和突进泳速描述鱼类集群的流速喜好, 提出生境水动力学适宜条件。研究对坝下鱼类集群开展连续生物水声学监测, 获得 5 013 个有效信号, 结合渔获物调查, 定位了右岸鱼类集群密集区域, 平均集群密度为 $1.38 \cdot \text{dam}^{-2}$ 。坝下水动力学条件复杂, 受运行和技术条件限制, 无法实现对过鱼期所有运行工况进行测量。研究采用三维数值模拟的方法, 通过实测数据验证, 对不同运行工况下水动力学条件进行反演。

通过对主要过鱼季节 3—6 月份的运行条件进行筛选, 选择概率最大的 4 种典型工况进行分析, 对坝下水深、流速和紊动强度等水动力学指标进行生境适宜性的定量评价, 结果表明集群区域的分析与声学探测基本一致。研究进一步对洄游行为进行模拟, 以类似生物粒子的方法预测了上述洄游通道, 成果为过鱼期的生态调度提供参考借鉴。

6 参考文献

- [1] POULET N. Impact of weirs on fish communities in a piedmont stream[J]. *River Research and Applications*, 2007, 23(9): 1038
- [2] WANG X Z, GAN X N, LI J B, et al. Cyprininae phylogeny revealed independent origins of the Tibetan Plateau endemic polyploid cyprinids and their diversifications related to the Neogene uplift of the plateau[J]. *Science China Life Sciences*, 2016, 59(11): 1149
- [3] 谢春航, 安瑞冬, 李嘉, 等. 鱼道进口布置方式对集诱鱼水流水力学特性的影响研究[J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(增刊2): 25
- [4] TUDORACHE C, VIAENE P, BLUST R, et al. A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species[J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2008, 17(2): 284
- [5] KEMP P S, O'HANLEY J R. Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers: a synthesis[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2010: 17(4): 297
- [6] AN R D, LI J, LIANG R F, et al. Three-dimensional simulation and experimental study for optimising a vertical slot fishway[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2016, 12: 119
- [7] AN R D, LI J, YI W M, et al. Hydraulics and swimming behavior of schizothorax prenanti in vertical slot fishways[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2019, 31(1): 169
- [8] WASSVIK E. Attraction channel as entrance to fishways[D]. Swedish: Lule University of Technology, 2006.
- [9] 王猛, 岳汉生, 史德亮, 等. 仿自然型鱼道进出口布置试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(1): 42
- [10] 黎贤访, 朱世洪, 邓润兴, 等. 鱼道进口水力特性数值模拟研究[J]. *人民长江*, 2015, 46(8): 7
- [11] ANDERSSON A G, LINDBERG D E, LINDMARK E M, et al. A study of the location of the entrance of a fishway in a regulated river with CFD and ADCP[J]. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2012, 2012: 1
- [12] FUENTES-PÉREZ J F, SANZ-RONDA F J, MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES A, et al. Modeling water-depth distribution in vertical-slot fishways under uniform and nonuniform scenarios[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 140(10): 06014016
- [13] 杨宇, 谭细畅, 常剑波, 等. 三维水动力学数值模拟获得中华鲟偏好流速曲线[J]. *水利学报*, 2007, 38(增刊1): 531
- [14] BAEK K O, KU Y H, KIM Y D. Attraction efficiency in natural-like fishways according to weir operation and bed change in Nakdong River, Korea[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 84: 569
- [15] PÉREZ G, DAGORN L, DENEUBOURG J L, et al. Effects of habitat modifications on the movement behavior of animals: the case study of Fish Aggregating Devices (FADs) and tropical tunas[J]. *Movement Ecology*, 2020, 8(1): 47
- [16] 刘明典, 马波, 张驰, 等. 西藏河流裂腹鱼类分布格局及环境影响因素: 以怒江和雅鲁藏布江为例[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(9): 1792

Habitat hydrodynamic characteristics and behavior forecasting for migratory fish downstream of dams

MA Weizhong¹⁾ AN Ruidong^{2)†} LI Minne²⁾ LI Jia²⁾

(1) Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, 550081, Guiyang, Guizhou, China;

2) State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, 610065, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract A key issue in effective fish pass facility is to set up inlet for fish gathering and attraction. The main difficulty is locating migratory routes and schooling area. A flow pattern could guide fish to find the inlet. Hydraulics is combined with field investigation, in situ experiments and numerical modeling. A quantitative description is expected to build response mechanism between hydraulics and biological behavior. Habitat hydraulics (depth, velocity and turbulence) is analyzed for typical conditions from March to June, to assess fish pass facility effect and predict fish schooling.

Keywords fishway inlet; upstream migratory trace; fish schooling under-dam; habitat water characteristics; ecological behavior

【责任编辑:刘先勤】