



基于鱼类分布与水力特性的 鱼道进口布置方案比选^{*}

黄涌增¹, 祝 龙¹, 刘大雷², 王晓刚¹, 徐进超³

(1. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏南京 210029;

2. 安徽省引江济淮生态发展有限公司, 安徽合肥 230000; 3. 南京信息工程大学, 江苏南京 210029)

摘要: 鱼道进口布置方式直接影响鱼道的诱鱼效果和过鱼效率。以临淮岗枢纽为例, 通过构建二维宽浅河道水流流场数值模型, 对典型工况下枢纽下游河道流场进行精细模拟, 并结合河段鱼类分布的水声学调查结果, 对 3 种不同鱼道进口布置方案进行比选。结果表明: 临淮岗闸门下游左右岸流速满足鱼类适宜条件, 且靠近鱼类聚集区域, 均满足鱼道进口布置条件, 可综合考虑经济效益、施工难度、工程安全性等确定布置方案, 并建议相应调整闸门运行方案。

关键词: 鱼道进口; 数值模拟; 临淮岗枢纽; 流场结构; 鱼类分布

中图分类号: U 643.2; S 956.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0116-07

Comparison and selection of fishway entrance layout schemes based on fish distribution and hydraulic characteristics

HUANG Yongzeng¹, ZHU Long¹, LIU Dalei², WANG Xiaogang¹, XU Jinchao³

(1. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Anhui Provincial Group Limited for Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Ecological Development, Hefei 230000, China;

3. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210029, China)

Abstract: The layout of fishway entrance directly affects the effect of fish inducing and the efficiency of fish passage. Taking the case of Linhuaigang hydro-junction, this paper presents a fine simulation of the downstream river flow field under typical conditions by constructing a two-dimensional numerical model of the flow field in wide and shallow rivers, and compares and studies three different layout schemes combining with the results of acoustic investigation of fish distribution in the reach. The results indicate that flow velocities on the left and right banks downstream of the sluice meet the suitability conditions for fish, and are close to the fish aggregation area, which meet the requirement for the arrangement of the fishway entrance. To determine the layout scheme, the economic benefits, construction difficulties and engineering safety should be considered, and the sluice gate operation scheme should be adjusted accordingly.

Keywords: fishway entrance; numerical simulation; Linhuaigang hydro-junction; flow field structure; fish distribution

收稿日期: 2022-07-06

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3204204); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y120009);
引江济淮工程科技创新项目(YJJH-ZT-ZX-2019)

作者简介: 黄涌增(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为工程水力学。

通讯作者: 王晓刚(1980—), 男, 博士, 教授级高工, 从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: xgwang@nhri.cn

鱼道是使被拦河建筑阻断的江河重新连通, 为鱼类提供洄游通道的水工建筑物, 对维系江河上下游水生态具有重要作用^[1]。鱼道进口是鱼道工程的“针眼”, 其布置方式直接影响下游水域诱鱼水流的水力特性, 决定鱼道的诱鱼效果, 是整个鱼道工程成败的先决条件。鱼道进口相对于河流宽度非常狭小, 布置难度较高, 目前国内外主要通过坝下鱼类分布探测^[3]、水力学模型、现场工况试验^[8]等方式, 对坝下河段的鱼类分布、流场结构等进行模拟分析, 结合主要过鱼对象的行为学特征, 论证不同鱼道进口布置情况对诱鱼及过鱼效果的影响, 形成鱼道进口布置方案建议。本文基于临淮岗枢纽典型运行工况河道下游流场的数值模拟, 根据主要过鱼对象的洄游习性, 结合河段鱼类分布水声学调查结果, 分析不同时期、不同工况条件下枢纽下游河段流速分布、流场结构及鱼类分布, 论证优化鱼道进口布置方案, 为确定临淮岗过鱼设施布置方案及运行管理方式提供数据支撑和技术参考。

1 工程概况

临淮岗洪水控制工程, 也称临淮岗水利枢纽工程, 位于淮河干流中游霍邱县和颍上县交界处的临淮岗, 主体工程由主坝、南北副坝、引河、船闸、泄洪闸等建筑物组成, 工程全长 78 km, 控制面积 4.22 万 km², 为一等大(1)型工程, 按 100 a 一遇洪水标准设计, 滞洪 85.6 亿 m³, 按 1 000 a 一遇洪水标准校核, 滞洪 121.3 亿 m³^[9]。临淮岗枢纽建成后一直利用闸坝泄流过鱼, 未设专门过鱼设施。为更好地恢复淮河干流河流生态的连通性, 拟在临淮岗枢纽补建鱼道。

淮河干流临淮岗段鱼类以鲤形目为主, 约占 60.24%, 其他种类包括鲈形目、鲇形目、鲑形目等。根据研究河段主要过鱼对象的生活习性, 确定鱼道主要过鱼季节为每年的 4—8 月。为满足鱼类的洄游产卵需求, 鱼道进口布置须充分考虑主要过鱼对象的生物学特性和水力学偏好, 而临淮

岗鱼道过鱼对象种类较多, 须兼顾诱鱼及过鱼条件复杂, 鱼道布置难度较大。

2 研究模型与方法

2.1 河道大范围流场模拟

2.1.1 基本方程

本文基于二维圣维南方程, 对典型工况下临淮岗下游河段流场进行数值模拟, 即连续方程为:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} = q \quad (1)$$

沿 x 方向的动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(uuH)}{\partial x} + \frac{\partial(uvH)}{\partial y} &= -gH \frac{\partial Z}{\partial x} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t H \frac{\partial u}{\partial y} \right) &- \frac{gu\sqrt{u^2+v^2}}{c^2} + fvH \end{aligned} \quad (2)$$

沿 y 方向的动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(vH)}{\partial t} + \frac{\partial(uvH)}{\partial x} + \frac{\partial(vvH)}{\partial y} &= -gH \frac{\partial Z}{\partial y} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t H \frac{\partial v}{\partial y} \right) &- \frac{gv\sqrt{u^2+v^2}}{c^2} - fuH \end{aligned} \quad (3)$$

式中: H 、 Z 分别为水深、水位, m; u 、 v 分别为 x 、 y 向的流速, m/s; t 为时间步长, s; q 为单宽流量, m³/(s·m); ρ 为水体密度, kg/m³; v_t 为紊动黏性系数; c 为谢才系数, 其值为 $R^{1/6}/n$, 其中 R 为水力半径, m, n 为底床糙率; f 为柯氏力系数, 其值为 $2\omega \sin\varphi$, 其中 ω 为地球自转角速度, rad/s, φ 为计算水域所在地理纬度, (°)。

2.1.2 定解条件

定解条件包括初始条件和边界条件。初始条件为:

$$\begin{cases} Z(x, y, 0) = Z_0(x, y) \\ u(x, y, 0) = u_0(x, y) \\ v(x, y, 0) = v_0(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

边界条件为: 计算边界上游以枢纽下泄流量为边界条件, 下游以水位作为其边界条件; 固定边界采用可滑动边界条件, 水动力计算采用法向通量为零的边界条件, 只允许水流平行地沿着这些边界流动, 即 $\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{n}} = 0$ (\mathbf{U} 为边界水流合速度, m/s);

n 为固定边界法向单位向量)。

2.1.3 数值离散

采用有限单元法计算控制方程的数值解, 运用加权余量的 Galerkin 有限元方法把浅水方程离散成非线性代数方程, 求解过程全部采用隐式格式, 在每一时间步长上, 变量表达式为:

$$f(t) = f(0) + at + bt^c \quad (t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t) \quad (5)$$

式中: a 、 b 、 c 为常数, c 取 1.5, 然后采用 Newton-Raphson 非线性迭代方法求解。

2.1.4 网格剖分

研究河段网格划分采用渐变方式, 枢纽下游由于流速较大, 尾水渠内紊乱剧烈, 须对该区域流场进行更细致地模拟, 因此在进、出口附近网格相邻节点间距约为 0.5 m; 下游河道由于流速较低、紊乱较弱, 网格相邻节点最大间距约为 10 m。计算区域有 5 万余个网格, 研究河段的网格划分见图 1。

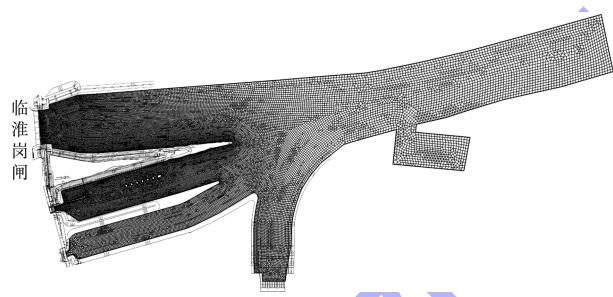


图 1 临淮岗枢纽下游网格划分

2.1.5 模型验证

为了验证数学模型的可靠性, 选取有物理模型资料、带有弯曲河道上的某枢纽进行验证, 该枢纽物理模型范围如图 2 所示。

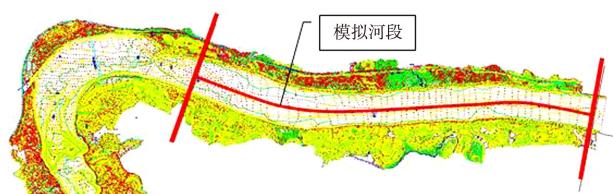


图 2 验证模型

利用建立的二维数值仿真模型, 分别对该枢纽 $Q=1.41 \text{ 万 } \text{m}^3/\text{s}$ (10 a 一遇) 和 $Q=1.18 \text{ 万 } \text{m}^3/\text{s}$ (5 a 一遇) 两种工况下水流流场进行模拟。数学模

型计算所得的验证断面速度分布和物理模型结果对比见图 3。经计算, 大部分节点的流速相对误差在 10% 以下, $Q=1.41 \text{ 万 } \text{m}^3/\text{s}$ 工况下模型平均误差为 9.24%, $Q=1.18 \text{ 万 } \text{m}^3/\text{s}$ 工况下平均误差为 8.44%, 二者流速较为接近, 说明数学模型网格剖分合理, 参数选择正确, 控制方程的离散方法可行, 计算程序可靠, 数值计算结果基本反映了原型水流的运动情况。

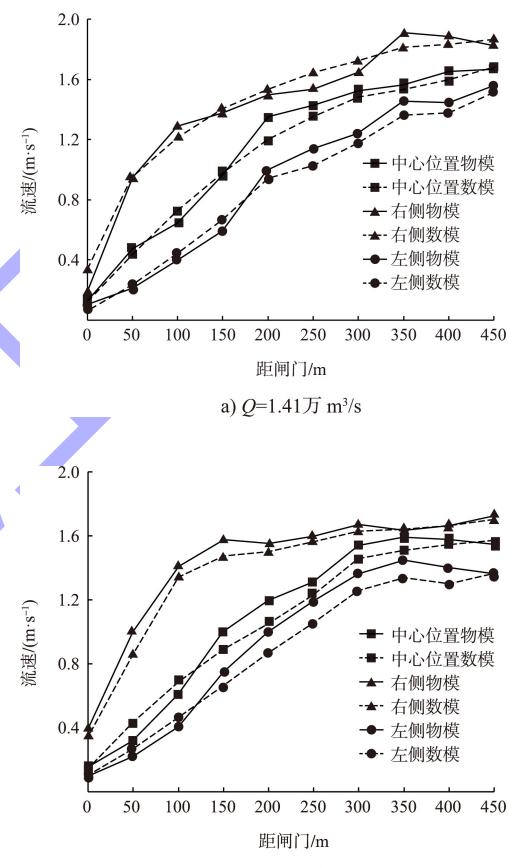


图 3 模型流速对比

2.2 鱼类集群特征水声学调查

在主要过鱼季节, 选取临淮岗闸下游约 500 m 范围河段为研究区域, 采用 Simrad EK80 回声鱼类探测仪对研究河段内鱼类集群分布进行走航观测。利用船载水声学观测设备, 对研究河段进行“Z”字形高密度探测, 监测过程中, 换能器入水深度 0.5 m, 船只航速约为 1 m/s。观测河段范围如图 4 所示。



图4 观测河段范围

2.3 鱼类体长及密度分布计算

2.3.1 鱼类体长

单个鱼类个体反射超声波目标强度值和体长的换算采用以下经验公式^[10]:

$$S_T = 20\lg L - 69.87 \quad (6)$$

式中: S_T 为目标强度, dB; L 为体长, cm。

2.3.2 鱼类水平密度

采用边长 1 m 的网格对研究河段平面进行划分, 并根据鱼类声学信号的位置坐标, 计算各网格内的鱼类声学信号数量, 即鱼类在该网格平面范围内的密度(图 5), 鱼类水平密度计算公式:

$$\rho_{i,j} = \sum_{k=1}^m E_k \quad (7)$$

$$\rho = \frac{E_t}{A} \quad (8)$$

式中: $\rho_{i,j}$ 为网格 (i,j) 内的鱼类密度, 条/ m^2 ; E_k 为网格 (i,j) 内第 k 个鱼类信号; ρ 为研究河段鱼类水平密度, 条/ m^2 ; E_t 为研究河段鱼类信号数量总和; A 为研究河段水面面积, m^2 。

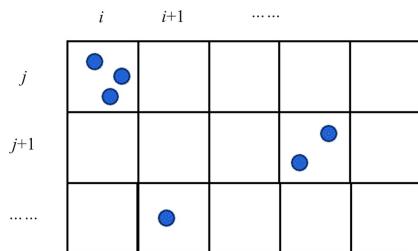


图5 网格内鱼类回声信号分布

3 结果与分析

3.1 典型工况

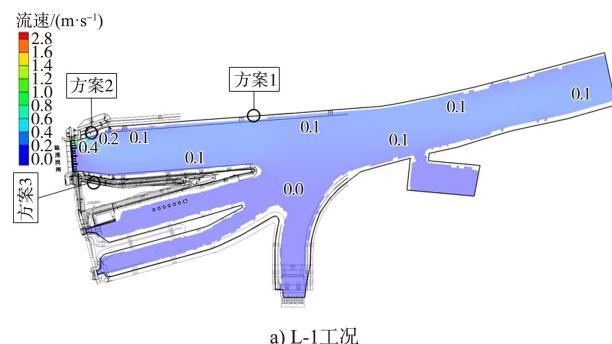
根据临淮岗枢纽水情资料, 参考主要过鱼季节(4—8月)枢纽上下游水位、流量及运行工况, 选取 6 个典型工况进行研究, 各工况对应水位流量情况见表 1。

表1 临淮岗枢纽下游计算工况

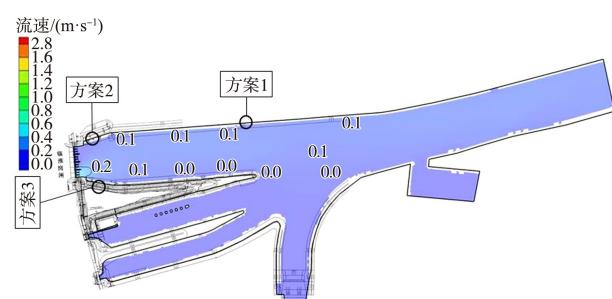
工况	上游水位/m	下游水位/m	开启闸门数量	开启高度与闸前水头的比值	泄水流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)
L-1	21.25	17.48	2	0.3	50
L-2	21.38	18.21	4	0.3	56
L-3	21.35	18.17	6	0.5	100
L-4	21.04	18.35	8	0.5	150
L-5	21.43	18.34	12	0.5	220
L-6	20.13	18.39	12	1.0	320

3.2 流场模拟结果分析

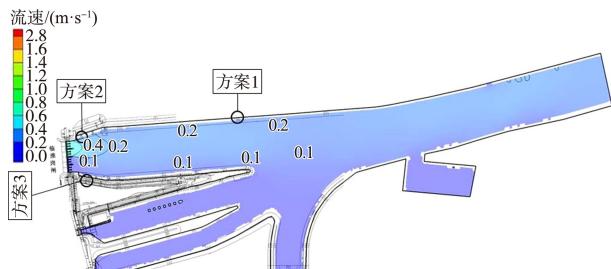
临淮岗枢纽鱼道工程在设计时, 结合枢纽水工建筑分布运行情况以及主要过鱼对象的上溯习性特征, 初步确定 3 个鱼道进口布置方案: 1) 临淮岗枢纽左岸下游约 1 km 附近区域; 2) 临淮岗枢纽左岸闸孔下游附近区域; 3) 临淮岗枢纽右岸闸孔下游附近区域。不同工况的流场模拟结果见图 6。



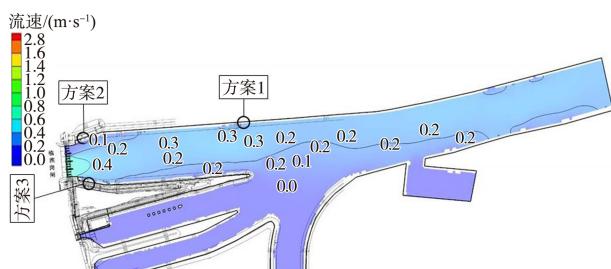
a) L-1工况



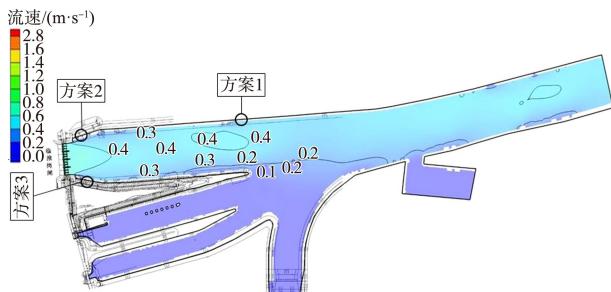
b) L-2工况



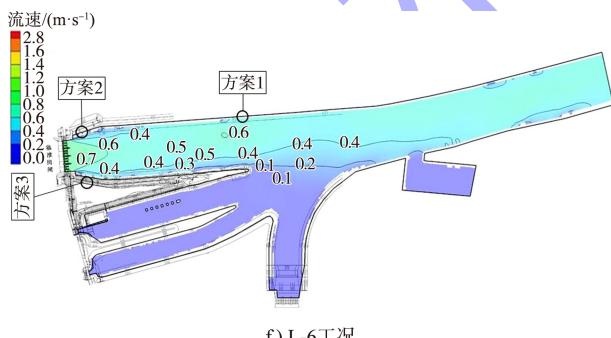
c) L-3工况



d) L-4工况



e) L-5工况



f) L-6工况

图 6 不同工况流场模拟结果

由图 6 可知, 在 L-1~L-3 工况中, 即闸门泄水量分别为 50、56、100 m^3/s 时, 因开启的闸门数量少且开度较小, 闸门下泄流量较小, 闸门下游流速较大区域均集中在开启的闸门附近, 下游河段的整体流速较小, 大部分区域流速在 0.1~

0.2 m/s , 流场结构简单, 为使流速达到诱鱼效果, 建议在拟选取的鱼道进口处设置补水措施, 增加鱼道进口附近区域的流速, 尽可能提高鱼道进口的诱鱼效果; 在 L-4~L-6 工况中, 闸门泄水量为 150、220、320 m^3/s , 泄水闸下游附近左岸侧流速为 0.2~0.7 m/s , 右岸侧在 0.2~0.5 m/s , 左岸和右岸的流速均能较好地满足诱鱼需求, 且河道内流场结构简单、流态平稳、水流平顺, 无回流、漩涡等不良水流现象, 河道内存在贯通性流速区供鱼类上溯。

3.3 鱼类分布特征

研究河段的鱼类分布水声学调查结果见图 7, 其中测点颜色表征该鱼类信号的水深, 圆点表示该信号对应的鱼类体长, 圆点直径越大则表示该处鱼类体长越大。

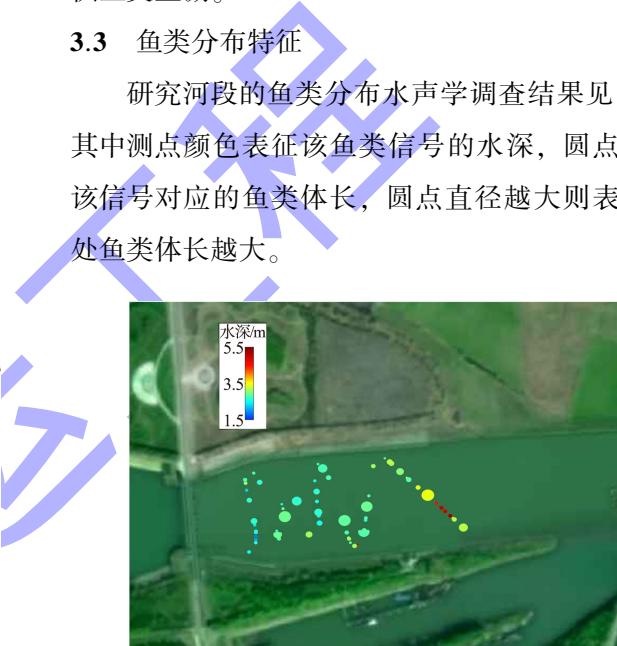


图 7 鱼类分布水声学调查结果

由图 7 可知, 大部分鱼类信号深度小于 3.5 m, 少量信号水深大于 3.5 m, 且水深较大的信号位于闸门下游 200~300 m 区域; 研究河段鱼类多聚集在闸门下游 100、300 m 附近区域, 其他区域鱼类也有分布, 但密度相对较小; 体长较大的鱼类往往集中于靠近河道中心的区域, 且多分布于深度 2.5~3.5 m 水层。

3.3.1 鱼类垂向分布特征

根据临淮岗枢纽下游河段鱼类水声学探测结果显示, 研究河段共发现 228 个鱼类信号, 根据式(6)将目标强度换算成鱼类体长, 鱼类体长及深

度的分布结果如图8所示。可以看出, 鱼类体长在0.99~22.85 cm, 平均体长为3.84 cm, 以小型鱼类为主; 体长<5 cm的鱼类多集中于深度1.5~3.5 m水层, 少量体长0~<5 cm鱼类分布于深度4.5~5.5 m水层; 体长5~25 cm的鱼类主要分布于深度2.5~3.5 m水层。

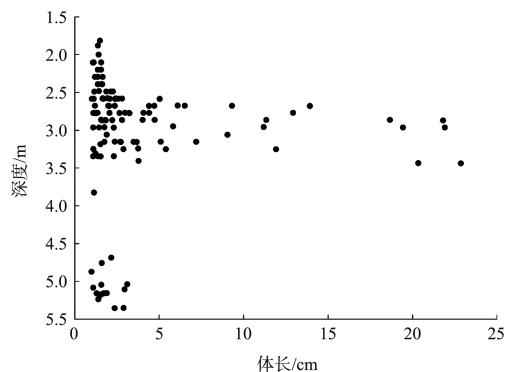


图8 鱼类体长与深度分布

基于鱼类体长及分布深度的聚类分析结果如图9所示。可以看出, 研究河段鱼类可大致分为2类, 第1类为体长8~25 cm, 分布于深度2.5~3.5 m水层, 为较大的鱼类, 该类鱼的平均特征为体长14 cm, 分布于深度3.0 m左右的水层; 第2类为体长1~<8 cm, 分布于深度1.5~5.5 m水层, 为较小的鱼类, 该类鱼的平均特征为体长2 cm, 分布于深度2.8 m左右的水层。

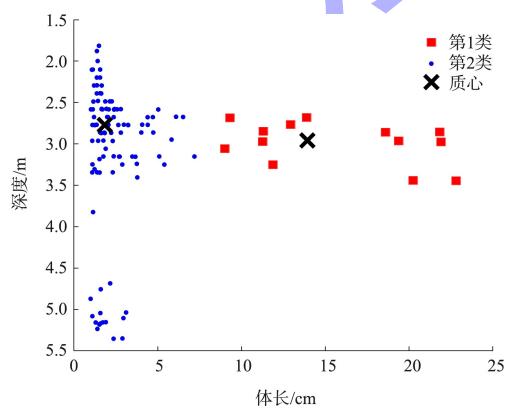


图9 鱼类体长与深度聚类分析结果

3.3.2 鱼类水平分布特征

研究河段鱼类水平分布见图10。可以看出, 阀门下游约100 m附近为鱼类水平密度最大的区

域, 其水平密度为6.52~9.98条/m²; 阀门下游100~<300 m范围内鱼类水平密度为1.64~3.36条/m²; 阀门下游300~400 m范围内也存在较大的鱼类聚集区域, 其水平密度为2.57~9.98条/m²; 调查江段鱼类平均密度为0.92条/m²。鱼类密度较大区域流速为0.2~0.5 m/s, 该流速范围为鱼类上溯的适宜范围, 因此应尽量使鱼道进口附近流速位于该区间内。

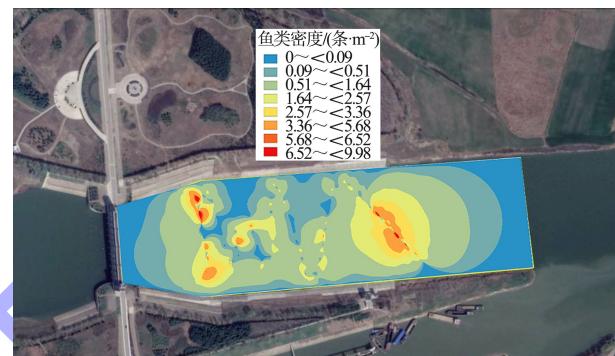


图10 研究河段鱼类水平分布

3.4 鱼道进口布置方案比选

综上所述, 鱼类适宜聚集的流速范围为0.2~0.5 m/s, 在L-1~L-3工况下, 阀门下游河段流速仅为0.1~0.2 m/s, 流速较小, 不利于鱼道进口诱鱼, 因此需要在鱼道进口处设置补水设施, 在临淮岗枢纽以L-1~L-3工况运行时进行补水, 将鱼道进口附近流速提升至0.2~0.4 m/s; L-4~L-6工况下河段流速大部分区域满足鱼类适宜流速范围, 该工况条件下鱼道进口无需进行补水。

研究河段16.8%的鱼类分布于深度1.5~<2.5 m水层, 该水深鱼类体长为1~2 cm; 69.0%的鱼类分布于深度2.5~<3.5 m水层, 该水深鱼类体长1~23 cm, 较大的鱼类(体长8~23 cm)也多分布于该水层, 且多集中于靠近河道中心区域; 14.2%的鱼类分布于深度3.5~<5.5 m水层, 该水深鱼类体长为1~3 cm; 阀门下游约100 m区域鱼类水平密度较大, 为6.52~9.98条/m², 且鱼类聚集区域靠近两岸。根据临淮岗枢纽下游河段的鱼类分布特征, 建议鱼道进口与河道深度2.5~<3.5 m

水层平顺衔接，该河段 85.8% 的鱼类分布于该水深；鱼道进口宜布置在靠近临淮岗枢纽的两岸区域，该区域为鱼类聚集区域，鱼道进口布置在该区域有助于其诱鱼效果的提升。

鱼道进口若采用布置方案 1，在流量较小的工况下需要采用补水措施，且该方案无法利用闸门泄水流，且距离闸门上游较远，施工成本较高；方案 2 位于闸门下游左岸，鱼道进口能够利用下泄水流诱鱼，大部分工况下该区域流速满足鱼类适宜流速，且该区域靠近鱼类聚集区有利于鱼道进口诱鱼，距离闸门上游较近，施工成本较低；方案 3 位于闸门下游右岸，靠近鱼类聚集区，大部分工况下流速满足鱼类适宜流速，距离闸门上游较近，施工成本较低。

综上，建议鱼道布置从方案 2、3 中进行选取，从两方案的经济效益、施工难度、工程安全性等方面进行考察，选取综合效益最大的方案，且闸门运行工况建议根据选取的布置方案进行调整，应优先开启靠近鱼道进口的闸门进行泄水，以提升鱼道进口的诱鱼效果。

4 结论

1) 临淮岗枢纽泄水闸下游鱼类平均体长为 3.84 cm，以小型鱼类为主；鱼类主要分布于深度 1.5~3.5 m 水层，鱼道进口宜布置在水深 1.5~3.5 m 的区域；鱼类主要聚集在闸门下游 100、300 m 的区域，鱼道进口应尽可能布置在距离鱼类聚集区较近的区域。

2) 鱼类大多聚集在水流流速 0.2~0.5 m/s 区域，在枢纽泄流量较小的工况下，下游河道整体流速偏小，不利于鱼类发现鱼道入口，需要在鱼道进口附近增设补水措施，使得鱼道进口区域流速维持在 0.2~0.5 m/s，以提升诱鱼效果。

3) 方案 2 和 3 能够利用泄水流，大部分工况下流速条件能够满足鱼道进口诱鱼需求，且鱼

道进口靠近鱼类聚集区域，能够极大提升诱鱼效率，因此，临淮岗枢纽鱼道进口布置方案可综合考虑两方案的经济效益、施工难度、工程安全性等，选取综合效益最大的方案进行实施，并根据布置方案调整闸门运行方案。

参考文献：

- [1] 刘辉, 鄒志红, 吴鑫森. 蜿蜒式鱼道与竖缝式鱼道的水力特性对比分析[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43(6): 126-131.
- [2] 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(S2): 25-32.
- [3] LINDBERG D E, LEONARDSSON K, ANDERSSON A G, et al. Methods for locating the proper position of a planned fishway entrance near a hydropower tailrace[J]. Limnologica, 2013, 43(5): 339-347.
- [4] 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]. Modeling and simulation, 2012(1): 1-12.
- [5] 史斌, 王斌, 徐岗, 等. 浙江楠溪江拦河闸鱼道进口布置优化研究[J]. 人民长江, 2011, 42(1): 69-71, 89.
- [6] 段鸿峰, 孙治才, 赵绍熙, 等. 高水位变幅鱼道进口布置水力学试验研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(1): 116-118, 73.
- [7] 梁金球, 黄维, 吴宏荣, 等. 沙坪二级水电站鱼道布置方案比选研究[J]. 大坝与安全, 2020(4): 25-29, 42.
- [8] MULLIGAN K B, HARO A, TOWLER B, et al. Fishway entrance gate experiments with adult American shad [J]. Water resources research, 2019, 55(12): 10839-10855.
- [9] 王九大, 虞邦义, 王久晟, 等. 淮河临淮岗洪水控制工程枢纽布置研究[J]. 水利水电技术, 2008(9): 47-50.
- [10] 谢晓, 张辉, 孙立元, 等. 基于网箱控制法和模型法的长江 4 种淡水鱼目标强度研究[J]. 中国水产科学, 2020, 27(5): 536-546.

(本文编辑 王璁)