



不同位置和朝向的鱼道进口诱鱼效果

王 岑¹, 王继保¹, 吴 欢¹, 宋基权¹, 孙双科², 石小涛^{1*}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为了探明不同进口朝向的布置方式和进口位置对诱鱼效果的影响, 本研究通过建立鱼道进口概化模型, 设计3种环境流速工况, 以马口鱼为实验对象, 针对不同朝向和不同位置鱼道进口分别进行放鱼实验。结果显示, 在同一鱼道进口位置时, 垂直于河道水流方向上的鱼道进口其诱鱼效果明显优于顺河道水流方向的鱼道进口; 当开启与电站不同相对位置不同的进口时, 其诱鱼效果受河道水流速度和进口位置的影响较为显著; 在所设计实验工况中, 环境流速为0.3 m/s时, 鱼道进口诱鱼效果最好。研究结果将对水利工程中鱼道进口布置具有重要的参考意义并指导工程实践。

关键词: 马口鱼; 环境流速; 布置方式; 诱鱼效果; 模型试验; 鱼道进口

中图分类号: S 956.3

文献标志码: A

水利工程在发挥防洪、发电和灌溉等作用的同时, 对河流生态环境带来不利的影响。其中最明显的是大坝的修建截断河流自上而下的物质与能量转移, 同时也阻碍了鱼类的洄游通道^[2]。鱼道被广泛地认为是帮助鱼类顺利通过闸、坝等水利障碍物的重要过鱼设施之一, 是一种保护水生生物种资源和维持河道连续性的工程措施^[3]。为提高鱼道的过鱼效率, 必须保证目标鱼类尽可能在没有洄游折返延误的条件下发现鱼道进口, 即鱼道进口位置布置的合理选择直接决定整个鱼道的过鱼效果。

鱼道进口附近的水流条件直接影响鱼类通过鱼道上溯的效果, 因此, 布置鱼道进口时必须考虑目标鱼种的生态习性、枢纽整体布置、水文资料、地理位置及周边环境等因素^[4]。已有研究显示, 国内外通常采用数值模拟和室内试验进行鱼道进口相关研究^[5-16], 通过这些研究, 提出鱼道进口的布置原则, 优化鱼道进口附近的水流条件, 对旧式鱼道的改建与新型高效鱼道的建设起到了关键的技术指导作用。Clay^[5]

和Bunt^[6]建议将鱼道进口布置在溢洪道附近, 通过溢洪道水流进行诱鱼。汪亚超等^[7]和曹庆磊等^[8]对鱼道进口布置原则进行总结和阐述: 对水力发电的枢纽工程, 通常将鱼道进口布置于水力发电厂下游尾水处。廖伯文等^[9]和郑铁刚等^[10-11]通过建立数学模型分析河道和不同位置鱼道进口的水流条件, 发现岸边低流速带区域适宜布置鱼道进口。另外, 建立物理模型对于鱼道进口位置的确定及其内部水力学特性的研究具有重要的参考价值^[12]。龚丽等^[13]通过设计鱼道进口概化模型实验研究发现, 针对草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)幼鱼的鱼道进口最佳流速约为0.3 m/s。汤荆燕等^[14]以齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)为实验对象设计12种不同的实验工况, 结果发现当鱼道进口流速为0.4 m/s时对目标鱼类的吸引力最大。史斌等^[15]通过建立物理模型模拟坝下500 m的鱼道进口及电站尾水, 提出了将电站尾水与鱼道进口相结合的优化布置方式, 同时验证其相应的集诱鱼效果。Thiem等^[16]在研究洄游鱼类通过竖缝式鱼道时的游泳行为中提到了Vianney-

收稿日期: 2019-04-12 修回日期: 2019-10-11

资助项目: 三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金(KF201504)

通信作者: 石小涛, E-mail: fishlab@163.com

Legendre鱼道, 其鱼道进口处水流流向与河流流动方向呈一定夹角可以诱导鱼类进入鱼道内部, 同时在进口段布置休息区有利于鱼类在经过鱼道进口高流速区后恢复体力。综合国内鱼道资料, 目前针对鱼道进口位置具体布置及其诱鱼效果方面的研究报道甚少, 而鱼道进口布置方式合适与否则更是直接影响鱼道运行的成败^[17-18], 因此需要进一步将鱼类行为学与水力学紧密结合, 开展鱼道进口布置的细化研究。

马口鱼(*Opsariichthys bidens*)是一种广泛分布于珠江、闽江、湘江、长江、黄河、松花江及黑龙江等水系的中小型经济鱼类, 栖息于水域上层, 以小鱼虾、水生昆虫等为食。马口鱼最大个体可达20 cm左右, 第1年生长比较迅速, 体长可达7~11 cm。1龄鱼具有繁殖能力, 生殖期多集中在6—8月, 在较急的水流中产卵。水利工程的建设导致自然河流生态条件的改变, 会对工程河段马口鱼等鱼类的洄游产生不利影响^[19-22]。

本实验以马口鱼为研究对象, 采用物理模型的方法进行放鱼实验, 通过分析实验鱼在鱼道进口有效区域处的平均停留时间、平均聚集率和诱集效率指数^[23-25]等评价指标, 以探明不同进口朝向的布置方式及进口位置与电站相对距离对诱鱼效果的影响, 以期在实际工程中为鱼道进口布置方式提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用马口鱼体长(BL)为 (11.0 ± 1.0) cm, 购于湖北长阳土家族自治县清江流域半人工养殖场, 渔获点距离试验基地三峡大学水工厅约65 km。运输过程中通过供氧、加冰保持鱼的活力。将实验鱼暂养于室外阴凉处的鱼缸(直径2.2 m、高0.5 m、水深0.3 m)内, 暂养1周后进行实验。暂养期间保证水温在 $18 \sim 24$ °C^[20, 22], 每天换水25%左右, 采用全天不间断充氧, 水体溶解氧始终大于7.0 mg/L, 每周投喂2次饵料并吸粪便、残渣。实验前禁食24 h, 实验水温为 (20 ± 1) °C。

1.2 实验装置

物理模型分析在水利工程建设中一直是重要步骤之一。一般认为单一的水力学物理模型可基于相似原理按照一定的比例尺进行缩放, 若需要开展生物学实验, 则不宜进行简单的比

例尺缩放, 因为相似原理并不适用于生物^[12]。当研究对象为生物时, 一般建造变态物理模型进行研究, 即室内物理模型按一定比例缩放建造, 对生物的物理环境按另一比例进行建造。在亚马逊玛代拉河Samto Antonio鱼道的设计过程中^[12], 采用1:80的物理模型分析确定Presidium岛2个鱼道进口的位置, 1:10的物理模型建造鱼类上溯的主体通道, 分析鱼道主体通道内的水流条件。

本实验模型参考位于雅鲁藏布江干流中游的ZM水电站相关参数制作, 其中坝体(溢洪道和电站)的模型比例为1:80, 鱼道的模型比例为1:10。实验装置整体长8.00 m, 宽7.77 m, 深0.65 m, 布置于岸边的鱼道长1.65 m, 宽0.35 m, 深0.35 m, 布置于河中央的鱼道长3.35 m, 宽和深均为0.35 m, 鱼道进口宽0.10 m。为了保持试验区域流场的均匀性, 将坡度*i*设置为0.5%。鱼道概化图如图1。

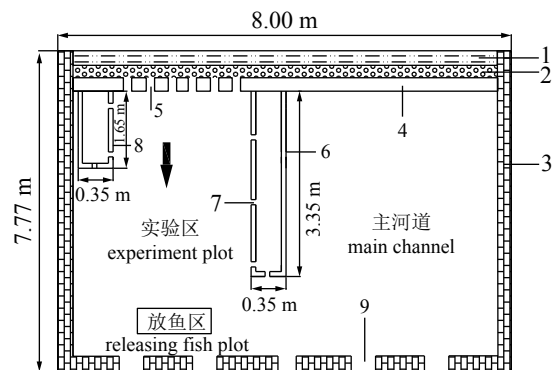


图1 鱼道概化图

1. 矩形量水堰; 2. 穿孔花墙; 3. 混凝土围墙; 4. 溢洪道模型; 5. 电站模型; 6. 布置于河中央的鱼道1#; 7. 鱼道进口; 8. 布置于岸边的鱼道2#; 9. 尾水闸门

Fig. 1 Generalized diagram of the fishway

1. rectangular weir; 2. perforated tracery wall; 3. concrete wall; 4. spillway; 5. power station; 6. fishway in the center of river 1#; 7. fishway entrance; 8. fishway along the shore 2#; 9. tail lock

1.3 实验方法

在洄游鱼类寻找鱼道进口的过程中, 一般以洄游鱼类的持续游泳时间来判定该鱼类在固定水流速度下能否上溯至鱼道进口并通过鱼道^[4]。而根据马口鱼在固定水流速度下的研究结果, 当水流速度为0.4~0.6 m/s时, 鱼类的持续游泳时间保持在100 min以上^[20], 因此, 本实验将鱼道进口流速设定为0.5 m/s。

本实验设定3个环境流速工况(0.1、0.2和0.3 m/s), 水深控制在15 cm, 进口朝向中顺直与垂直均指与电站下游水流的朝向(表1), 各鱼道进口与电站相对距离及朝向情况详见表2。实验前开启水泵和控温装置, 利用循环水温控制系统调节水温, 使之达到实验鱼生存的最适宜水温(20±1) °C。通过调节水泵流速计和装置上鱼道进

口的闸门开度使流速达到实验工况要求。参考鱼道进口布置图(图2)将实验鱼放置在放鱼区适应0.5 h后, 进行视频采集, 观察鱼的游泳规律, 记录实验鱼进入鱼道进口的数量、进出次数及在诱鱼范围内的停留时间, 单次试验时长为1 h。每尾鱼仅进行1次实验, 以免其适应水流环境而影响实验结果。

表 1 实验工况表

Tab. 1 Test conditions

实验工况 test conditions	实验鱼数量/尾 number	鱼道流速/(cm/s) fishway velocity	环境流速/(cm/s) environment velocity	开启进口编号 entrance number		
				进口朝向实验 orientation test		进口位置实验 location test
				顺直 straight entrance	垂直 vertical entrance	垂直 vertical entrance
1	75	50	10	A、F	B、E	B、C、D、E、G
2	75	50	20	A、F	B、E	B、C、D、E、G
3	75	50	30	A、F	B、E	B、C、D、E、G

表 2 各进口与电站相对距离及朝向情况

Tab. 2 Relative distance and orientation between each entrance and the power station

进口编号 entrance number	A	B	C	D	E	F	G
相对距离/cm relative distance	300	300	200	100	150	150	70

注: 将A进口和B进口、E进口和F进口分别概化为在同一位置; 进口编号具体位置见图2

Notes: Entrances of A and B, entrances of E and F are generalized into the same position, respectively; the specific location of the entrance no. is shown in Fig. 2

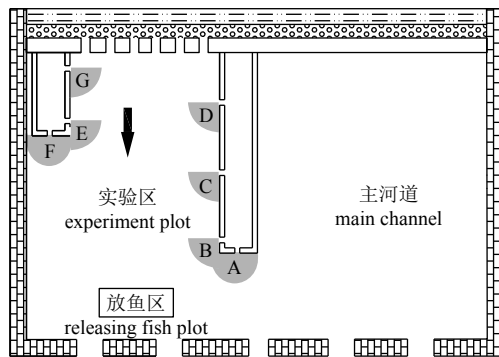


图 2 鱼道进口吸引范围示意图

扇形区域表示距离该进口以半径r为1 m的诱鱼范围

Fig. 2 Domain of attraction for entrance of the fishway
Sector area represents the fishing range of 1 m radius from the entrance

1.4 数据分析

实验数据采用Microsoft Excel 2013软件对数据进行处理和绘图。将实验鱼在上溯过程中进入各鱼道进口形成的诱鱼水流区域内的频次(f)、平均停留时间(T)、鱼的平均聚集率(P)以及各进口诱集效率指数(I)作为实验鱼找到鱼道

进口的评价指标。观察视频提取数据时, 每个区域进行1 h连续观测并记录统计实验鱼的分布情况。

成功诱鱼频次, 即放鱼试验过程中, 鱼类受到各个鱼道进口水流的吸引, 进入图2扇形诱鱼区域, 则记为一次成功诱鱼频次。

在诱鱼范围内平均停留时间。实验过程中, 对实验区域进行视频监控1 h, 统计所有实验鱼在有效诱鱼范围的停留时间, 从而获取每一尾有效实验鱼在诱鱼区域内的平均停留时间。

平均聚集率。实验鱼的平均聚集率为实验鱼在某一进口形成的诱鱼区域内出现的频次占总次数的百分比, 计算公式:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^M N_i}{MN} \times 100\%$$

式中, P 为实验鱼平均聚集率, M 为记录次数, N 为实验鱼尾数; N_i 为实验鱼第 i 次出现在诱鱼区的次数。

集诱效率指数。为了描述某一鱼道进口诱

鱼区域的集诱效率，采用诱集效率指数(I)进行定量分析，计算公式：

$$I = \frac{P_i}{S} \times 100\%$$

式中， I 为诱集效率指数； P_i 为某一鱼道进口诱鱼区域的平均聚集率； S 为各诱鱼区域的面积。

2 结果

2.1 进口朝向对诱鱼效率的影响

各进口处实验鱼平均停留时间 实验中，在开启A、F(B、E)进口时，实验鱼在该进口处所形成的诱鱼水流区域的平均停留时间都会随着环境流速的增大而增大；通过对A、B进口以及F、E进口进行比较发现，在环境流速为0.3 m/s时，E进口和B进口处实验鱼平均停留时间较F进口和A进口要久，且E进口处实验鱼的平均停留时间约为25 min，停留时间最久，这正说明在同一位置鱼道上，垂直进口处感应流场的诱鱼要优于顺直进口(图3)。

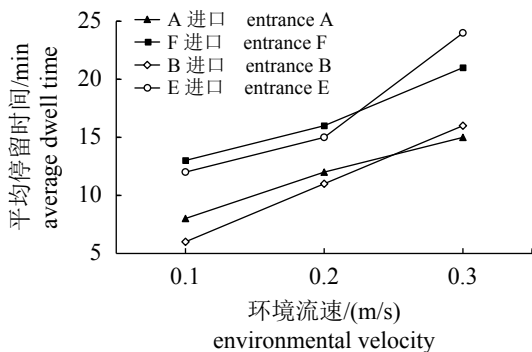


图3 不同环境流速下各进口处鱼类平均停留时间

Fig. 3 Average dwell time of fish at different environmental velocity

各进口处实验鱼平均聚集率 为了分析进口朝向对诱鱼效果的影响，进一步对A、F(B、E)各进口处实验鱼的平均聚集率进行分析。在不同环境流速下，E进口处实验鱼平均聚集率最高，A、F进口在环境流速为0.3 m/s时平均聚集率最高，B进口在环境流速为0.2 m/s时平均聚集率最高。除B进口外，其他进口处实验鱼的平均聚集率均随环境流速的增大而增大，其中F、E进口在环境流速为0.3 m/s时超过50%；另外对A、B进口和F、E进口进行比较可以发现，几乎在所有的背景工况下，垂直进口的平均聚集率要高于顺直进口(图4)。

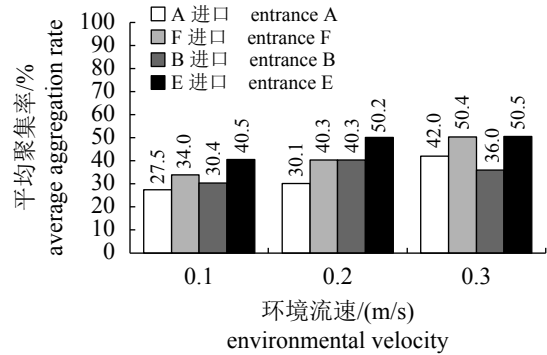


图4 不同环境流速下各进口处鱼类平均诱集率

Fig. 4 Average aggregation rate of fish at different environmental velocity

各进口处实验鱼诱集效率指数 由于各鱼道进口处诱鱼范围的面积不同，为了消除诱鱼范围面积对实验鱼聚集率的影响，采用诱集效率指数对不同环境流速下各进口处实验鱼的聚集情况加以比较。实验发现，在不同环境流速下，进口E处实验鱼诱集效率最高，当流速达0.3 m/s时，E进口诱集效率指数达到68.1%，表现出良好的诱鱼效果；在同一环境流速下，垂直进口B、E的诱集效率指数均高于顺直进口A、F，在环境流速为0.3 m/s时，进口B、E诱集效率指数均达到50%以上；随环境流速的增大，各进口处实验鱼诱集效率均呈现单调递增的趋势(图5)。

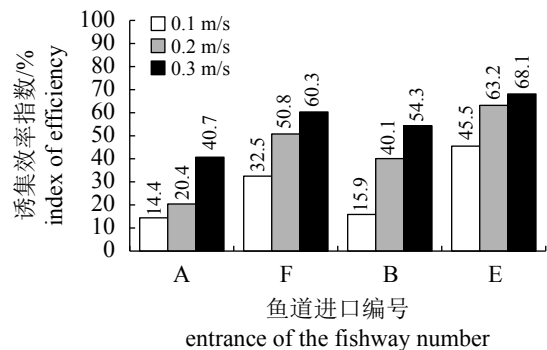


图5 不同环境流速下各进口处鱼类诱集效率指数

Fig. 5 Index of efficiency of fish aggregation at different environmental velocity

2.2 进口位置与电站相对距离对诱鱼效果的影响

各进口处实验鱼平均停留时间 通过对实验所得数据进行统计对比分析得出，同一环境流速下，实验鱼在位于岸边鱼道2#上的进口E、F处所形成的有效诱鱼面积的平均停留时间

要高于位于河中央鱼道1#上各进口所形成的有效诱鱼面积处的平均停留时间; 但与B、C、D进口不同的是, 在距离电站尾水最近的G进口处, 实验鱼的平均停留时间低于E进口处的停留时间; 实验鱼在B、C、D、E、G($l_B > l_C > l_E > l_D > l_G > 0$) (l_B 、 l_C 、 l_E 、 l_D 和 l_G 分别代表B、C、E、D、G进口与电站的相对距离)进口所形成的有效诱鱼区域的平均停留时间会随着环境流速的增大而增大(图6)。

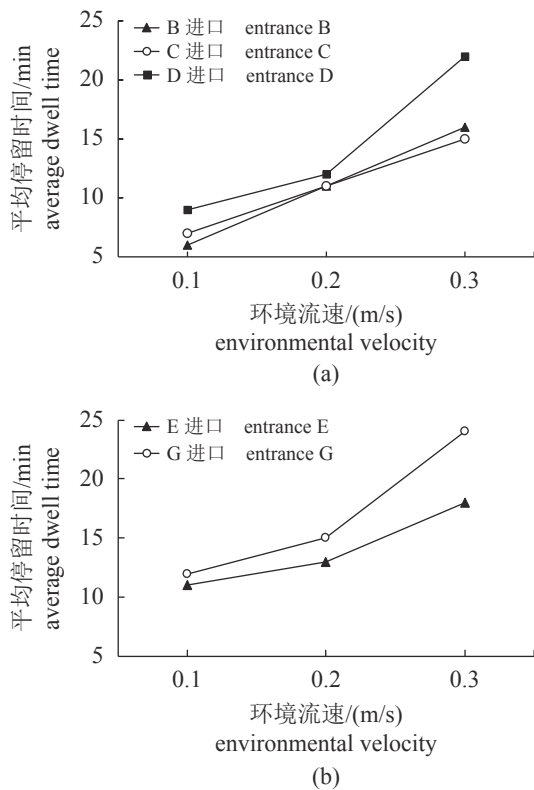


图6 不同环境流速下各进口处鱼类平均停留时间

Fig. 6 Average dwell time of fish at different environmental velocity

各进口处实验鱼平均聚集率 同时开启B、C、D、E、G进口时, 各个鱼道进口处实验鱼的平均聚集率均随着环境流速的增大而增大, 其中当环境流速分别为0.2和0.3 m/s时, 位于河中央鱼道上的进口C、D的平均聚集率均为60%左右, 而位于岸边鱼道上的进口E、G的平均聚集率略低于进口C、D; 在同一环境流速下, D进口处实验鱼的平均聚集率最高, 且在环境流速为0.3 m/s时, D进口处平均聚集率达到63.5%(图7)。

各进口处试验鱼诱集效率指数 为了消除各鱼道进口诱鱼范围不同面积对试验鱼聚集

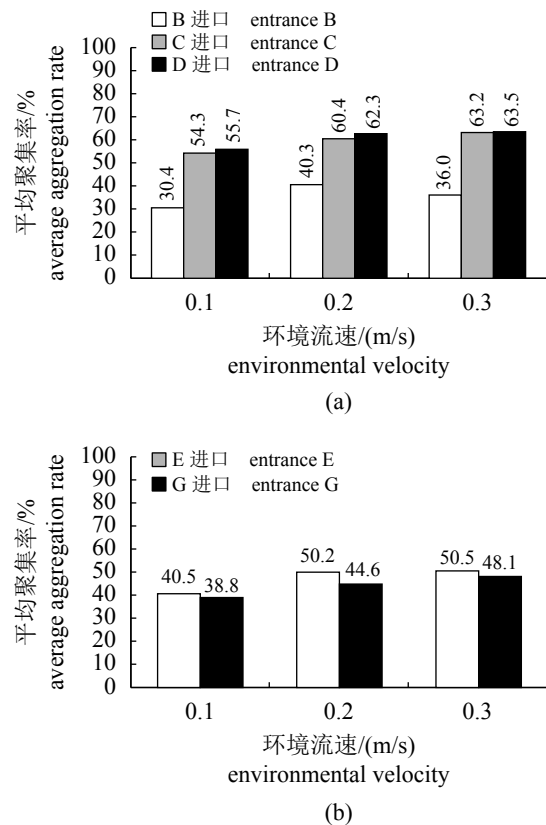


图7 不同环境流速下各进口处鱼类平均诱集率

Fig. 7 Average aggregation rate of fish at different environmental velocity

率的影响, 综合对比进口B、C、D、E、G在各个环境流速工况下的诱集效率指数, 当鱼道进口位于河中时, D进口最靠近于电站尾水, 该进口处的诱集效率指数在不同环境流速下均高于B与C进口, 环境流速为0.3 m/s时, D进口处的诱集效率指数超过70%; 而当鱼道位于岸边时, G进口最靠近于电站尾水, 但其诱集效率在各环境流速工况下均低于靠电站尾水略远的进口E(图8), 即鱼道进口越靠近电站尾水, 诱鱼效果越好并不是绝对的, 在确定鱼道进口与电站尾水相对距离时, 可能还需要考虑鱼道进口位置以及进口流速与电站尾水流速掺混现象。

3 讨论

3.1 进口布置方式对诱鱼效率的影响

鱼道进口布置方式及其诱鱼水流的水力学特性是影响鱼道进口过鱼效率的关键。鱼道进口位置应充分考虑洄游鱼类的生活习性、游泳能力和洄游规律等^[15]。鱼道进口一般选择在经常有水流下泄、鱼类洄游路线及鱼类经常集群的

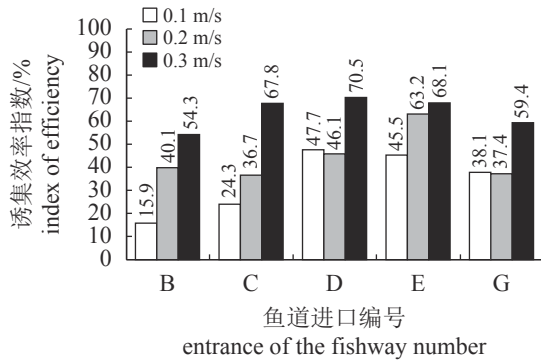


图8 不同环境流速下各进口处鱼类诱集效率指数

Fig. 8 Index of efficiency of fish at different environmental velocity

区域,如主流的两侧;对有水力发电厂的枢纽工程,宜将鱼道进口布置于发电厂下游尾水处^[7,26]。本实验通过研究不同环境流速下不同布置方式的鱼道进口对诱鱼效果的影响,得出如下结论:①当开启同一位置不同朝向进口时,垂直进口的诱鱼效果一般好于顺直进口的诱鱼效果;②当开启与电站相对位置不同的进口时,其诱鱼效果受环境流速和进口位置的影响较为显著。但目前仍然普遍存在的问题是电站尾水处流场条件复杂,鱼道进口的流速与电站尾水产生的流速会相互干扰,鱼类会被发电厂尾水吸引,而不是被尾水处附近鱼道进口诱鱼水流所吸引^[27],因此,还需要根据实际工程情况来量化鱼道进口与电站尾水间的相对距离。

3.2 水流对鱼类上溯行为的影响

水流的水力特性与鱼类生存等具有非常重要的关系,水流对鱼类行为的影响被认为是最原始和最切实有效的^[28]。从生理学角度分析,鱼类主要依靠其侧线系统来感知流场流速和紊动强度的大小,从而调整其上溯过程中的游泳速度和方向。当前在鱼类行为对流速的响应关系研究中,主要通过测定鱼类自身的感应流速、爆发游泳速度和耐久游泳速度3个指标来判定鱼类的游泳能力的大小,以此来确定鱼道中进口处、过鱼中段及出口处水流速度的大小。

在鱼道设计中,目标鱼类的感应流速对鱼道进口诱鱼效果好坏有着至关重要的影响。在坝下紊乱的流场中,上溯鱼类主要通过鱼道进口处的流速来感知进口在坝下的位置,从而找到进口。相对于目标鱼类的感应流速,进口附

近的诱鱼水流速度过大或过小均会导致上溯鱼类“迷失”在坝下流场中,因此,本实验在进口流速设定时主要通过测定马口鱼的感应流速来确定鱼道模型进口处流速大小。鱼类的爆发速度是反映鱼类爆发游泳能力的重要指标,当鱼类在捕食、遇到天敌等刺激和越过上溯路径中的水流障碍时,其会加快游泳速度至爆发游泳速度。在鱼道设计中,这一指标主要运用于鱼道过鱼中段流速较大的隔板空口或竖缝处。鱼类的耐久游泳速度则主要运用于鱼类上溯至鱼道休息池时不被水流冲下时保持的游泳速度。龚丽等^[13]通过对鱼类游泳能力的测定发现,不同种类及不同生长期的鱼类各游泳能力也不同。

通过预实验发现,进口处流速大于0.6 m/s时,对马口鱼的吸引效果明显降低;流速继续增大,马口鱼不再进行顶流上溯,说明此时进口处流速已超过马口鱼的爆发游泳速度;当进口处流速小于0.4 m/s,马口鱼上溯的次数随着流速的增大而增加,说明此时进口流速值大小在马口鱼的感应流速区间内。这为鱼道模型进口处的流速设定提供了依据。本实验仅考虑了环境流速对试验鱼的诱导作用,然而除了流速外,紊动能、紊动强度、雷诺剪切应力等水力因子均会影响鱼的游泳行为^[29-32],因此,还需要建立数学模型来对鱼道进口及其水流条件进一步细化。另外,鱼道进口处流速与鱼道内部流量和出口尺寸有关,从而导致鱼道进口诱鱼水流的影响范围有限^[33]。因此,在鱼道进口处还可以增加补水设施及其他诱鱼措施来增加进口的诱鱼范围,进一步来提高鱼道进口洄游鱼类的通过效率。

鱼道进口布置方式研究属于鱼类行为学与水力学交叉研究范畴,自然界的种种外在因素均会对目标鱼类以及水流条件造成一定的影响,为了将物理模型实验结果加以验证,后期还需要进一步在原型鱼道上开展实验和观测,要综合考虑不同朝向及位置的鱼道进口附近各水力指标的分布特征,为选取合理的鱼道进口布置方式提供有效的参考依据。

参考文献:

- [1] 董哲仁,孙东亚,彭静. 河流生态修复理论技术及其应用[J]. 水利水电技术, 2009, 40(1): 4-9, 28.

- Dong Z R, Sun D Y, Peng J. Theories and practices of river eco-restoration[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(1): 4-9, 28(in Chinese).
- [2] 张艳艳, 何贞俊, 何用, 等. 低水头闸坝工程鱼道过鱼效果评价[J]. *水利学报*, 2017, 48(6): 748-756.
Zhang Y Y, He Z J, He Y, *et al.* Analysis on the efficiency of fishway for the low-head gate dam[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(6): 748-756(in Chinese).
- [3] 王兴勇, 郭军. 国内外鱼道研究与建设[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2005, 3(3): 222-228.
Wang X Y, Guo J. Brief review on research and construction of fish-ways at home and abroad[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2005, 3(3): 222-228(in Chinese).
- [4] 白音包力皋, 王玓, 陈兴茹, 等. 鱼道水力学关键问题及设计要点[C]//第四届全国水力学与水利信息学学术大会论文集. 西安: 中国水利学会, 2009: 206-211.
Baiyinbaoligao, Wang D, Chen X R, *et al.* The key problems and design points of fishway hydraulics[C]//*Advance in Hydraulics and Hydroinformatics in China*. Xi'an: Chinese Hydraulic Engineering Society, 2009: 206-211(in Chinese).
- [5] Clay C H. Design of Fishways and Other Fish Facilities[M]. 2nd ed. Florida: CRC Press, 1995.
- [6] Bunt C M. Fishway entrance modifications enhance fish attraction[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2001, 8(2): 95-105.
- [7] 汪亚超, 陈小虎, 张婷, 等. 鱼道进口布置方案研究[J]. *水生态学杂志*, 2013, 34(4): 30-34.
Wang Y C, Chen X H, Zhang T, *et al.* Study on layout scheme of fishway entrance[J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(4): 30-34(in Chinese).
- [8] 曹庆磊, 杨文俊, 周良景. 国内外过鱼设施研究综述[J]. *长江科学院院报*, 2010, 27(5): 39-43.
Cao Q L, Yang W J, Zhou N J. Review on study of fishery facilities at home and abroad[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, 27(5): 39-43(in Chinese).
- [9] 廖伯文, 安瑞冬, 李嘉, 等. 高坝过鱼设施集诱鱼进口水力学条件数值模拟与模型试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(5): 87-93.
Liao B W, An R D, Li J, *et al.* Numerical simulation and model test study on the hydrodynamic conditions of fish luring inlet of fish-crossing facility in high dams[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(5): 87-93(in Chinese).
- [10] 郑铁刚, 孙双科, 柳海涛, 等. 基于生态学与水力学的水电站鱼道进口位置优化研究[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(2): 105-111.
Zheng T G, Sun S K, Liu H T, *et al.* Ecology and hydraulics-based study on optimization of location for fishway entrance of hydropower station[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(2): 105-111(in Chinese).
- [11] 郑铁刚, 孙双科, 柳海涛, 等. 基于鱼类行为学与水力学的水电站鱼道进口位置选择[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 164-170.
Zheng T G, Sun S K, Liu H T, *et al.* Location choice of fishway entrance in hydropower project based on fish behavioristics and hydraulics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(24): 164-170(in Chinese).
- [12] 张辉, Kynard B, Junho R, *et al.* 亚马逊流域玛代拉河 Santo Antônio鱼道设计与建造的启示[J]. *水生态学杂志*, 2013, 34(4): 95-100.
Zhang H, Kynard B, Junho R, *et al.* Implications from the design and construction of Santo Antônio fishway in the Madeira River in the Amazon basin[J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(4): 95-100(in Chinese).
- [13] 龚丽, 吴一红, 白音包力皋, 等. 鱼道进口水流对草鱼幼鱼上溯行为的影响研究[J]. *水利水电技术*, 2016, 47(11): 89-93, 106.
Gong L, Wu Y H, Baiyinbaoligao, *et al.* Study on impact of water flow at fishway entrance on migratory behavior of juvenile grass carp[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016, 47(11): 89-93, 106(in Chinese).
- [14] 汤荆燕, 高策, 陈旻, 等. 不同流态对鱼道进口诱鱼效果影响的实验研究[J]. *红水河*, 2013, 32(1): 34-39, 44.
Tang J Y, Gao C, Chen M, *et al.* Study on influence of different flow patterns on fish attracting effect at fish way entrance[J]. *Hongshui River*, 2013, 32(1): 34-39, 44(in Chinese).
- [15] 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.
Shi B, Wang B, Xu G, *et al.* Research on optimization of

- fishway entrance of sluice on Nanxi River in Zhejiang province[J]. *Yangtze River*, 2011, 42(1): 69-71, 89(in Chinese).
- [16] Thiem J D, Binder T R, Dumont P, *et al.* Multispecies fish passage behaviour in a vertical slot fishway on the Richelieu River, Quebec, Canada[J]. *River Research and Applications*, 2013, 29(5): 582-592.
- [17] 吴晓春, 史建全. 基于生态修复的青海湖沙柳河鱼道建设与维护[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 130-136.
Wu X C, Shi J Q. Construction and management of fish passage on Shaliu River adjacent to Qinghai Lake based on ecological restoration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(22): 130-136(in Chinese).
- [18] Larinier M, Travade F, Porcher J P. Fishways: biological basis, design criteria and monitoring[R]. Rome: FAO, 2002.
- [19] 郑学斌, 张清科, 朱咏梅, 等. 几种环境因子对马口鱼精子活力的影响[J]. *生物学杂志*, 2018, 35(6): 74-78.
Zheng X B, Zhang Q K, Zhu Y M, *et al.* Effects of several environmental factors on the motility of sperm in *Opsariichthys bidens*[J]. *Journal of Biology*, 2018, 35(6): 74-78(in Chinese).
- [20] 金志军, 陈小龙, 王从锋, 等. 应用于鱼道设计的马口鱼(*Opsariichthys bidens*)游泳能力[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(9): 2678-2684.
Jin Z J, Chen X L, Wang C F, *et al.* Swimming performance of *Opsariichthys bidens* related to fishway design[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(9): 2678-2684(in Chinese).
- [21] 王珂, 刘绍平, 段辛斌, 等. 崔家营航电枢纽工程鱼道过鱼效果[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 184-189.
Wang K, Liu S P, Duan X B, *et al.* Fishway effect of Cuijiaying navigation-power junction project[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3): 184-189(in Chinese).
- [22] 陈乘. 南方马口鱼的繁殖生物学特性及繁育技术研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
Chen C. Research on the reproductive biology and artificial breeding technique of southern *Opsariichthys bidens*[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015(in Chinese).
- [23] 何大仁, 施养明. 鱼礁模型对黑鲟的诱集效果[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1995, 34(4): 653-658.
He D R, Shi Y M. Attractive effect of fish reef model on Black porgy (*Sparus macrocephalus*)[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1995, 34(4): 653-658(in Chinese).
- [24] 周艳波, 蔡文贵, 陈海刚, 等. 10种人工鱼礁模型对黑鲟幼鱼的诱集效果[J]. *水产学报*, 2011, 35(5): 711-718.
Zhou Y B, Cai W G, Chen H G, *et al.* Attraction effect of various artificial reef models on *Sparus macrocephalus*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(5): 711-718(in Chinese).
- [25] 王从锋, 陈明明, 刘德富, 等. 基于葛洲坝1号船闸模型的水流诱鱼试验研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(6): 974-980.
Wang C F, Chen M M, Liu D F, *et al.* Experimental study about attractive effects for fish in different flow velocity by the model of the No.1 ship lock of the Gezhou dam[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(6): 974-980(in Chinese).
- [26] 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.
Xie C H, An R D, Li J, *et al.* Study on the influence of fishway entrance layout mode on hydraulic characteristics of fish luring flow[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(S2): 25-32(in Chinese).
- [27] 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: 327929.
- [28] Young N C. Physical characterization of freshwater mussel habitats in Upper Mississippi river pool 16[D]. Iowa: Graduate College the University of Iowa, 2006.
- [29] Laine A, Jokivirta T, Katopodis C. Atlantic salmon, *Salmo salar* L., and sea trout, *Salmo trutta* L., passage in a regulated northern river-fishway efficiency, fish entrance and environmental factors[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2002, 9(2): 65-77.
- [30] Silva A T, Santos J M, Ferreira M T, *et al.* Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in an experimental pool-type fishway[J]. *River Research and Applications*, 2011, 27(3): 360-373.
- [31] Goettl M T, Atkinson J F, Bennett S J. Behavior of western blacknose dace in a turbulence modified flow
中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- field[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 230-240.
- [32] 蒋永强, 杨忠勇, 石小涛, 等. 基于多重水力学因子的竖缝式鱼道中鱼类上溯轨迹模拟[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(4): 1282-1290.
- Jiang Y Q, Yang Z Y, Shi X T, *et al.* The simulation of fish migratory trajectory in a vertical slot fishway based on multi-hydraulic indices[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(4): 1282-1290(in Chinese).
- [33] Piper A T, Wright R M, Kemp P S. The influence of attraction flow on upstream passage of European eel (*Anguilla anguilla*) at intertidal barriers[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44: 329-336.

Attractive effects for different positions and orientations of fishway entrance

WANG Cen¹, WANG Jibao¹, WU Huan¹, SONG Jiquan¹, SUN Shuangke², SHI Xiaotao^{1*}

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to find out the influence of different entrance orientations and positions on fish attractive effect, a generalized model of fishway entrance was established and three environmental velocity conditions were designed in this paper. Tests were carried out at fishway entrances of different orientations and positions. The results showed that the fishway entrance in the direction perpendicular to the river flow had better attractive effect than that in the direction parallel to the river flow at the same fishway entrance; When the fishway is located in the middle of the river, the closer the fishway entrance is to the tail water from the power station, the better the fish luring effect will be; In all conditions, when the environmental velocity is 0.3 m/s, there is the best attractive effect for the fishway entrance. The research results will have important reference significance for the layout of fishway entrance in hydraulic engineering and guide the engineering practice.

Key words: *Opsariichthys bidens*; environmental velocity; layout; attractive effect; model test; fishway entrance

Corresponding author: SHI Xiaotao. E-mail: fishlab@163.com

Funding projects: Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education Open Fund (KF201504)