

全双工射频识别技术的过鱼效果监测与分析

陶宇¹, 石小涛¹, 张健¹, 姜泽文¹, 罗金梅¹, 雷青松², 柯森繁¹

(1. 三峡大学, 湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地, 湖北宜昌 443002;

2. 珠江水利委员会, 珠江水利科学研究所, 广东广州 510611)

摘要: 鉴于全双工射频识别系统(RFID)相较于半双工具有操作简便、数据传输方便等优势, 国外广泛应用于鱼道过鱼效果评价, 而国内相关研究较少的现状, 以植有 PIT 标签的仿野生齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*) 识别与否作为评判系统监测效率高低的依据, 定量分析鱼体入射角度、鱼体入射范围、鱼体长大小和游泳速度对全双工射频识别系统监测效率的影响, 以接收到监测数据作为因变量, 构建 Logistic 回归模型, 利用 AIC 模型准则筛选出最优的 Logistic 回归模型。结果表明, 游泳速度($P=0.001$)和鱼体长大小($P=0.03$)与系统成功监测概率呈负相关。鱼体入射角度($0^\circ\sim 90^\circ$)对系统监测效率的影响不显著($P>0.05$); 鱼体入射范围 $0\sim 10$ cm 的监测效率显著高于入射 $20\sim 30$ cm 和 $30\sim 40$ cm ($P<0.05$)。为进一步提高鱼道监测效率, 建议在开展实际鱼道工程监测前, 应掌握基础鱼类生理(如体长)和行为(如游泳速度)数据, 合理布置天线位置, 将有助于为监测评估后的鱼道优化设计提供技术支撑和数据参考。

关键词: 全双工射频识别系统; 鱼道; PIT 标签; 监测效率; 过鱼效果

中图分类号: TV213.4.S961.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2021)04-0001-07

梯级电站的开发阻隔了鱼类的洄游路径, 鱼道工程的建设重新建立了鱼类上溯和下行的洄游通道, 维系了上下游鱼类种群间的基因交流(Michael et al, 2012; 金志军等, 2017)。近年来, 我国针对不同水头修建了不同类型的鱼道, 高坝大库的过鱼通道主要为竖缝式, 如枕头坝鱼道和藏木鱼道(陈国柱等, 2018; Bao et al, 2019); 低水头枢纽工程主要修建仿自然鱼道如安谷鱼道(曹娜等, 2016; 陆波等, 2020)。截止 2017 年, 国内已修建鱼道 100 余座, 但目前已开展过鱼效果监测的鱼道仅 10 余座(陶江平等, 2018), 鱼道过鱼效果监测工作亟待加强。

以往的鱼道过鱼效果监测通常采用标记重捕法和遥测法。标记重捕法利用网捕对鱼群数量进行估计(刘丽红和左延柏, 2015); 但易伤害鱼体, 标签易脱落损坏, 还无法定量鱼类上溯滞留时间、行为以及生理学表现(黄松林等, 2016)。射频识别监测系统(RFID)是一种简单的无线系统, 由阅读器、天线和

PIT(Passive Integrated Transponder)标签 3 个基本器件组成(邓盛, 2020); 可获取包括鱼道入口吸引率、进入时间、上溯成功率和鱼类通过时间等参数, 量化鱼道过鱼效率, 且鱼体受伤害程度较小(Castro-Santos, 2011; Castro-Santos et al, 2017)。国外大量鱼道工程已采用射频识别系统开展鱼道过鱼效果监测, 如 Castro-Santos 等(2017)利用 PIT 标记法研究了七鳃鳗(*Petromyzon marinus*)在美国康涅狄格河上的两个大坝之间的迁徙速度以及通过 4 个鱼道的上行速度, 发现鱼道外的迁徙速度约 23 km/d, 鱼道内的速度 $20\sim 330$ m/d, 鱼道通过率 $29\%\sim 55\%$; Steffensen 等(2013)利用 PIT 标记法评价了美洲鳊(*Luxilus cornutus*)、黑斑须雅罗鱼(*Semotilus atromaculatus*)和康氏亚口鱼(*Catostomus commersonii*) 在仿自然鱼道内的通过率, 发现在鱼道内释放的鱼上溯成功率明显高于鱼道进口处释放的鱼; Thiem 等(2011)利用 PIT 标记法, 研究得出在加拿大魁北克省黎塞留河一个竖缝式鱼道中鲟(*Acipenser fulvescens*)的通过率为 36.4% ; Hatry 等(2016)利用 PIT 标记法评估了加拿大魁北克省黎塞留河上一座鱼道的过鱼效果, 发现该鱼道中的银吸口鱼(*Moxostoma anisurum*)、河川吸口鱼(*M. carinatum*)和大鳞吸口鱼(*M. macrolepidotum*)的通过率分别达到 88% 、 50% 和 69% 。

收稿日期: 2020-08-28 修回日期: 2021-02-05

基金项目: 国家优秀青年科学基金项目(51922065); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201703)。

作者简介: 陶宇, 1996 年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为生态水文学。E-mail: 1260918794@qq.com

通信作者: 柯森繁。E-mail: 15926989126@163.com

量化监测系统的效率对评价鱼道过鱼效果至关重要,较低的监测效率会导致大量有效数据缺失,严重低估鱼道过鱼性能。鉴于此,本文基于全双工射频识别系统,利用 Tracker (Bricalo University, USA)跟踪技术提取鱼在穿越天线时的游泳行为参数,通过构建多因子适配的 Logistic 回归模型,解析鱼体长大小、鱼体入射角度、鱼体入射范围、游泳速度对监测效率的影响,旨在为提高鱼道监测效率、完成鱼道监测效果评估提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 射频识别监测系统

商业射频识别监测系统有半双工和全双工两种型号。半双工射频识别系统标签和阅读器之间可以双向传送信息,但同一时刻只能向一个方向传送;全双工射频识别系统可以实现标签与阅读器之间同一时刻的双向传送,相较于半双工,具有操作简便、系统集成度高、数据传输方便等优势。目前,国外利用全双工射频识别系统开展鱼道过鱼效果监测的案例较多(Roussel et al, 2000; Nolan et al, 2016);而该系统在国内的应用相对较少。

影响射频识别监测效率主要因素包括设备自身的参数选择,如天线可识别的范围、天线布置方向、天线尺寸大小、天线电感值取值范围和标签大小等(Cunjak et al, 2005; Burnett et al, 2013);此外,外界环境因素如磁场干扰和鱼类行为学等也不容忽视。有研究表明,外界磁场干扰极大降低了监测效率(Connolly et al, 2008);而从鱼类行为的角度对射频识别系统监测效率的影响研究较少,目前只涉及鱼穿越天线速度对其影响(Schmidt et al, 2016)。

1.2 试验鱼暂养及标记

齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)主要分布在我国金沙江、岷江、大渡河等流域,生活在急缓流交汇处,游泳能力较强,具有短距离洄游习性,常作为我国过鱼设施的主要过鱼对象。试验用鱼为仿野生齐口裂腹鱼,由渔民在香溪河支流九冲河段流水养殖,捕获后通过充氧袋运送至三峡大学生态水利学试验室的养鱼池内(直径 3 m、高度 0.7 m),养殖水深保持在(20.0±2.5) cm,期间持续曝气,水温为(14±1)°C。暂养一周后,挑选 15 尾活性较强的试验鱼,体长(26.5±4.0) cm,浸浴麻醉(MS-222, 5 mg/L)后依次测量鱼的体长和体重,每测量完 1 尾鱼,将事先设置编号的 PIT 标签(长 12 mm),通过注射器从腹鳍位置以小于 20°的角度植入试验

鱼腹腔,确保标签与鱼体平行;标记完成后,将鱼转移至暂养池恢复 48 h。正式试验前,挑选恢复良好的 10 尾鱼开展试验。

1.3 试验装置

本次研究采用的全双工射频识别设备由阅读器和天线组成(图 1)。天线尺寸为 50 cm×80 cm,电感值约 245 μh,最大监测距离为 39 cm,呈现中间探测距离远、四周探测距离近的特点(图 2)。全双工射频识别系统利用射频信号与标签线圈耦合或雷达反射的传输特性,实现对植有 PIT 标签鱼的自动识别。当带有标签的鱼进入天线探测范围内时,系统就会自动记录其独特的编号及通过时间(魏永才等, 2018),并通过电脑端蓝牙与设备阅读器连接,实现数据的传输与储存。

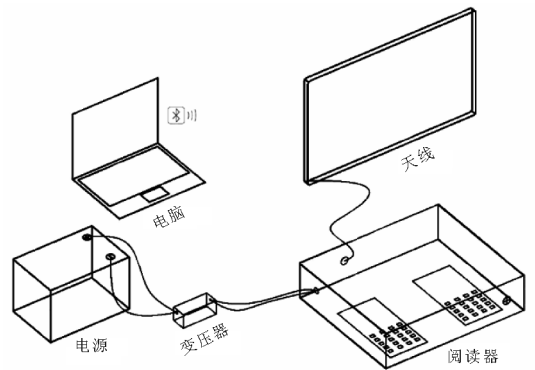


图 1 全双工射频识别系统组成

Fig.1 Schematic diagram of the full-duplex radio frequency detection system

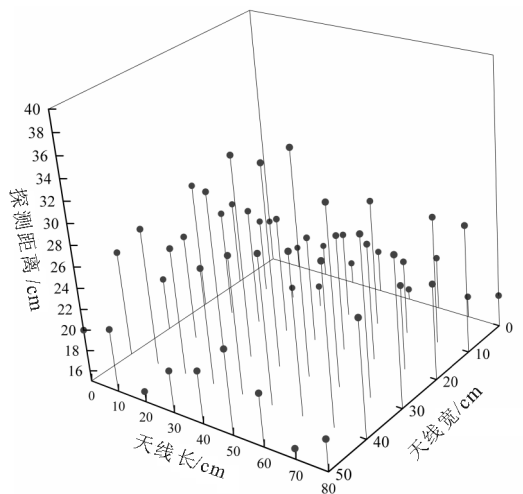


图 2 天线三维探测距离分布

Fig.2 Three-dimensional representations of the detection range

放鱼试验在开放式矩形水槽(200 cm×80 cm×50 cm)中进行。水槽由适应区、监测区、休息区组成,天线布置在水槽正中间,监测区间长 78 cm,

沿 y 轴将天线分为 8 个入射区间,每个区间宽 10 cm (图 3)。天线正上方安装红外网络摄像头(焦距 6 mm;帧率 24 Hz;海康威视),用于记录试验鱼通过系统天线时的游泳行为,并校验系统识别率。

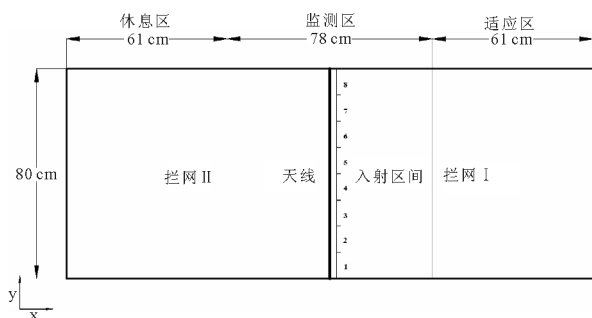


图 3 试验装置示意

Fig.3 Schematic diagram of the experimental facility

1.4 试验方法

放鱼试验前,调整水槽水位至 (20.0 ± 2.5) cm,每组试验将 1 尾齐口裂腹鱼放入适应区适应 30 min。适应结束后,打开全双工射频识别系统,开启摄像头,提起左右两侧拦网,开始试验。将鱼类通过天线定义为试验鱼腹鳍从天线右侧拦网 I 直接通过监测区到达拦网 II,试验鱼通过天线即表明一组试验结束,然后测量水温和溶解氧,最后将鱼移入单独的养鱼池饲养。本研究总共进行 240 组重复放鱼试验,统计了设备的监测效率。采用 TRACKER 软件记录了每尾鱼通过天线时的游泳行为参数,包括游泳速度、鱼体入射角度和鱼体入射范围。游泳速度是指鱼穿过天线过程中各点瞬时速度的平均值;鱼体入射角度是将试验鱼胸鳍通过天线时的视频截图导入 AutoCAD 2019 中,并利用工具测量试验鱼身体中线与系统天线之间的夹角(图 4);鱼体入射范围用鱼体穿过天线时的入射区间表示。

1.5 数据处理

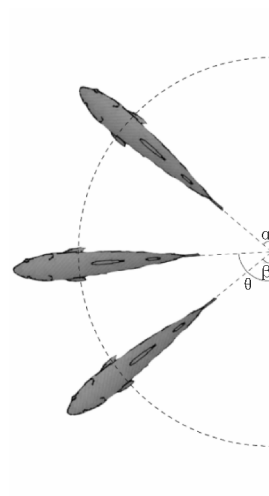
本试验将监测效率定义为试验鱼通过天线时被系统识别次数占试验鱼通过天线总次数的百分比。数据采用 SPSS 25 软件对鱼体入射角度和鱼体入射范围进行了卡方检验,显著性差异设定为 $P < 0.05$;采用 Logistic 回归模型构建了以鱼体入射角度、鱼体入射范围、鱼体长大小和游泳速度为因子的监测概率预测模型。Logistic 回归模型主要用来预测离散因变量(分类变量)与一组解释变量(自变量)之间的关系。本文中采用二分类 Logistic,即因变量只包括两个类别(“监测成功”和“监测失败”)(Bunt et al, 2012;陈春玲等, 2019)。为避免 Logistic 回归模型中自变量可能存在多重共线性的问题,提高模

型精度,模型采用逐步回归法,选择赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)筛选出了最优模型。AIC 准则是衡量统计模型拟合优良性的一种标准,从一组可供选择的模型中选择最佳模型时,通常选择 AIC 最小的模型。Logistic 回归模型公式和 AIC 计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{logit}(p_i) &= \ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) \\ &= a_0 + a_1x_1 + \dots + a_mx_m \\ &= a_0 + \sum_{j=1}^m a_jx_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad \textcircled{1} \end{aligned}$$

$$\text{AIC} = 2k - 2\ln L(\theta) \quad \textcircled{2}$$

式中: p_i 表示事件发生的条件概率; a_i 表示自变量 x_j 改变一个单位时 $\text{logit}(p_i)$ 的改变量,代表各影响因子的权重系数; x_1, x_2, \dots, x_m 表示因变量有 m 个影响因素; k 是模型参数个数; $L(\theta)$ 表示似然函数。



α, β, θ 表示鱼体入射角度, $0^\circ < \alpha, \beta, \theta < 90^\circ$

图 4 鱼体入射角度示意

α, β, θ incidence range of fish, $0^\circ < \alpha, \beta, \theta < 90^\circ$

Fig.4 Schematic diagram of the fish incidence angle

2 结果

2.1 关键因子识别

本文将鱼体入射角度、鱼体入射范围、鱼体长大小和游泳速度作为因子构建了 Logistic 回归模型,运用 AIC 准则筛选出了最优的模型,从表 1 可知,以体长和游泳速度为自变量的模型 AIC 值最低,模型最优。从表 2 可知,根据 Logistic 回归预测模型中各因子的系数估计值,发现试验鱼穿过天线时的游泳速度(V)和试验鱼体长(L)对系统是否成功监测有显著影响($P < 0.05$)。基于 Logistic 回归预测模型,构建了不同体长试验鱼下监测设备识别成功

概率与游泳速度的关系曲线,发现随着游泳速度的增加,监测设备成功识别的概率越低;随着体长的增加,监测设备成功识别的概率减少(图5)。

表1 基于赤池信息准则(AIC)的模型选择

Tab.1 Model selection based on the Akaike information criterion (AIC)

模型	-2L	2df	AIC _i	Δ _i AIC	ω _i	ω _i /ω _j
L+V	303.01	6	309.01	0.00	0.65	
L+V+P	302.88	8	310.88	1.87	0.25	2.55
L+V+G+P	302.78	10	312.78	3.77	0.10	6.59

注:本研究总共有15个模型,根据AIC准则,其中第一个模型的AIC值最小,被认为是最优的模型。*L*为鱼体长;*V*为游泳速度;*G*为入射角度;*P*为鱼体入射范围;*df*为自由度; ω_i 为模型权重, $\omega_i = \text{EXP}(-0.5\Delta_i \text{AIC}) / [\text{EXP}(-0.5\Delta_1 \text{AIC}) + \text{EXP}(-0.5\Delta_2 \text{AIC}) + \text{EXP}(-0.5\Delta_3 \text{AIC})]$;

Note: There were a total of 15 models tested. According to AIC analysis, the first model has the lowest AIC value and is considered optimal. *L* is Body length; *V* is swimming speed; *G* is fish incidence angle; *P* is incidence distance; *df* is the degrees of freedom; ω_i is the model weight.

表2 体长和速度模型参数评估

Tab.2 Estimation of parameters for modeling *L* and *V*

参数	估计值	标准误	<i>P</i>
<i>L</i>	-0.27	0.12	0.03
<i>V</i>	-0.04	0.01	0.00

注:模型参数采用估计值±标准误($\beta \pm \text{SE}$);*L*为鱼体长;*V*为游泳速度。

Note: Model parameters is described as estimated values ± standard error ($\beta \pm \text{SE}$); *L* is body length; *V* is swimming speed.

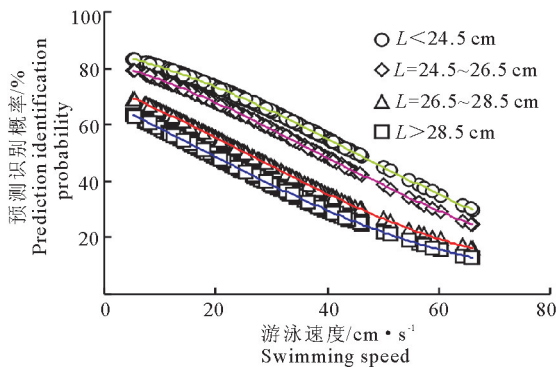


图5 不同速度和体长下的预测识别概率

Fig.5 Variation of identification probability with speed and length

2.2 鱼体入射角度

从表3可知,入射角度为60°~90°时的监测效率最高(65.4%),入射角度为0°~30°时的监测效率最低(57.1%)。各入射角度之间均没有显著性差异($P > 0.05$)。

表3 不同入射角度的监测效率

Tab.3 Variation of identification probability with fish incidence angle

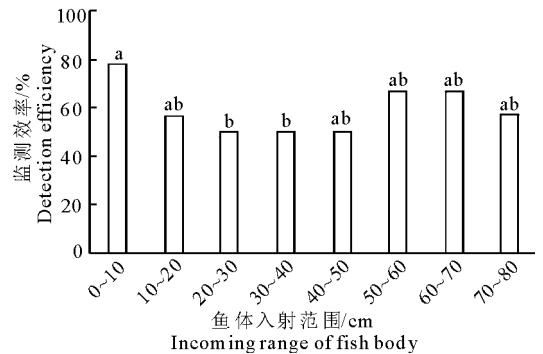
入射角度	实际通过天线次数	设备识别次数	监测率/%
0°~30°	21	12	57.1 ^a
30°~60°	60	36	60.0 ^a
60°~90°	159	104	65.4 ^a

注:相同小写字母表示不同入射角度之间的监测率无显著性差异($P > 0.05$)。

Note: The same superscript letter indicates no difference in the identification probability between different incident angles ($P > 0.05$).

2.3 鱼体入射范围

通过分析鱼体入射范围对监测效率的影响,发现鱼体入射范围为0~10 cm时,监测效率高达77.8%;入射范围为20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm时的监测效率均低于50.0%;只有鱼体入射范围0~10 cm与20~30 cm和30~40 cm之间存在显著性差异($P < 0.05$)(图6)。



不同小写字母表示鱼体不同入射范围差异显著($P < 0.05$)

图6 鱼体入射范围对监测效率的影响

Different superscript letters indicate significant differences in identification probability between different ranges of incidence distance ($P < 0.05$).

Fig.6 Variation of identification probability with fish incidence distance range

3 讨论

3.1 鱼体长和游泳速度对系统监测效率的影响

鱼类通常以较大的对地游泳速度通过竖缝,游泳速度对监测概率的影响是评判鱼是否成功上溯的重要依据。本研究利用AIC准则并基于Logistic回归预测模型,发现游泳速度与系统成功识别概率呈负相关。谭均军等(2017)通过观察鲮(*Aristichthys nobilis nobilis*)和草鱼(*Ctenpharyngodon idellus*)在竖缝式鱼道中的上溯行为,发现其最大游泳速度分别为1.62 m/s和1.82 m/s。若采用全双工

射频识别系统监测鱼的上溯行为,结合本研究模型的预测结果,发现鳊和草鱼在鱼道内某些部位采用最大游泳速度通过时,其被系统识别的概率低于10.0%;而谭均军等(2017)采用视频监控的方式观测了池室内鱼类上溯行为,可较好地获取相关行为学数据;此外,鱼体游泳速度的增加,会导致系统同一读取速率下数据采集的个数减少,致使读取率降低(Roussel et al, 2000; Horton et al, 2007; Aymes & Rives, 2009)。因此,建议在鱼道过鱼效果监测时,应考虑被监测对象的游泳能力。本研究中,鱼体长大小与系统成功识别概率呈负相关,产生这一结果的原因可能与标签大小有关。监测效率会受到 PIT 标签质量与被标记鱼体质量之比的限制(Jorgensen et al, 2017)。本试验受条件所限,对不同体长的鱼都采用 12 mm 标签,大体长的鱼选择了小标签,可能会降低设备的监测效率。在实际鱼道监测中,应保证在鱼体生理受损最低的前提下,根据鱼体长的大小选择合适的标签(Gheorghiu et al, 2010; Burnett et al, 2013; Tummers et al, 2016; Watsona et al, 2019)。

3.2 鱼体入射角度和范围对系统监测效率的影响

本次试验通过分析鱼体入射角度、鱼体入射范围对全双工射频识别系统监测效率的影响,发现大入射角度的系统监测效率最高(65.4%),小入射角度($0^{\circ}\sim 30^{\circ}$)也有较高的监测效率(57.1%);而张健等(2020)在开展鱼运动方向对半双工射频识别系统的监测效率影响时发现,运动方向为 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时,监测效率低于10%;这说明相比于半双工,全双工监测设备识别鱼体小角度穿越天线时更敏感。本研究中,不同鱼体入射范围下,监测效率存在差异;鱼体入射范围 $0\sim 10$ cm的监测效率显著高于 $20\sim 30$ cm和 $30\sim 40$ cm。国外相关研究表明,天线线圈中心可能存在无法识别或识别率低的情况,且随着天线直径的增加,中心无法识别的可能性越大(Roussel et al, 2000; Connolly et al, 2008),这可能导致了 $20\sim 40$ cm内较低的监测效率。因此,在实际鱼道监测中,系统天线经常被安装在竖缝处(Thiem et al, 2011),不仅可以减少鱼类在竖缝下游处徘徊时被重复监测的概率,还能缩减天线直径,降低出现天线内磁场强度弱化的可能性。故在实际应用时,建议根据现场情况合理选择天线的长宽比。

在实际鱼道监测中,除了遥测法,还有水声学监测法、电捕法、网捕法等。针对不同的适用场景,上述监测手段各有利弊,在鱼道监测中,建议将不同的

监测方法相结合,监测数据互为补充,提高鱼道监测结果的可靠性、高效性及准确性(谭细畅等, 2015; 张艳艳等, 2017; 王义川等, 2018),实现个体和群体鱼识别、鱼类洄游路线追踪和鱼道问题池室反馈等目标,为后续鱼道优化设计提供有力的技术支撑。

参考文献

- 曹娜,钟治国,曹晓红,等,2016.我国鱼道建设现状及典型案例分析[J].水资源保护,32(6):156-162.
- 陈春玲,吴凡,余瀚,等,2019.基于逻辑斯蒂回归的恶意请求分类识别模型[J].计算机技术与发展,29(2):124-128.
- 陈国柱,王猛,王海胜,等,2018.枕头坝一级水电站竖缝式鱼道过鱼效果初探[J].水力发电,44(7):4-8,58.
- 邓盛,2020.浅析射频识别技术在机场行李分拣中的应用[J].电子测试,(10):98-99,18.
- 黄松林,胡德夫,陈力,等,2016. PIT 标记在野生动物个体识别中的应用研究[J].野生动物学报,37(2):172-177.
- 金志军,陈小龙,王从锋,等,2017.应用于鱼道设计的马口鱼(*Opsariichthys bidens*)游泳能力[J].生态学杂志,36(9):2678-2684.
- 刘丽红,左延柏,2015.对“标记重捕法调查动物种群密度”问题的分析[J].实验教学与仪器,32(3):37-38.
- 陆波,喻卫奇,陈静,等,2020.浅谈水电工程鱼道运行管理[J].水力发电,46(2):85-89.
- 谭均军,高柱,戴会超,等,2017.竖缝式鱼道水力特性与鱼类运动特性相关性分析[J].水利学报,48(8):924-932,944.
- 谭细畅,黄鹤,陶江平,等,2015.长洲水利枢纽鱼道过鱼种群结构[J].应用生态学报,26(5):1548-1552.
- 陶江平,温静雅,贺达,等,2018.上行过鱼设施过鱼效果监测研究进展[J].长江流域资源与环境,27(10):2270-2282.
- 王义川,王煜,林晨宇,等,2018.鱼道过鱼效果监测方法述评[J].生态学杂志,38(2):280-287.
- 魏永才,余英俊,丁晓波,等,2018.射频识别技术(RFID)在鱼道监测中的应用[J].水生态学杂志,39(2):11-17.
- 张健,王义川,柯森繁,等,2020.半双工 PIT 遥测技术的监测效果[J].生态学杂志,39(8):2802-2809.
- 张艳艳,何贞俊,何用,等,2017.低水头闸坝工程鱼道过鱼效果评价[J].水利学报,48(6):748-756.
- Aymes J C, Rives J, 2009. Detection Efficiency of Multiplexed Passive Integrated Transponder Antennas is Influenced by Environmental Conditions and Fish Swimming Behaviour [J]. Ecology of Freshwater Fish, 18(4):507-513.

- Bao J H, Li W W, Zhang C S, et al, 2019. Quantitative assessment of fish passage efficiency at a vertical-slot fishway on the Daduhe River in Southwest China[J]. *Ecological Engineering*, 141: 1 - 12.
- Bunt C M, Castro-Santos T, Haro A, et al, 2012. Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration[J]. *River Research Applications*, 28(4): 457 - 478.
- Burnett N J, Stamplecoskie K M, Thiem J D, et al, 2013. Comparison of detection efficiency among three sizes of half-duplex passive integrated transponders using manual tracking and fixed antenna arrays[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 33(1): 6 - 13.
- Castro-Santos T, 2011. Adaptive fishway design [C]//A framework and rationale for effective evaluations. *Hydraulic Engineering*: 76 - 90.
- Castro-Santos T, Shi X T, Alex H, et al, 2017. Migratory behavior of adult Sea Lamprey and cumulative passage performance through four fishways[J]. *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences*, 74: 790 - 800.
- Connolly P J, Jezorek I G, Martens K D, et al, 2008. Measuring the performance of two stationary interrogation systems for detecting downstream and upstream movement of PIT-tagged Salmonids [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 28(2): 401 - 417.
- Cunjak, R A, Roland S, Julien C, et al, 2005. The use of two new portable 12 - mm PIT tag detectors to track small fish in Shallow Streams [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 25(1): 270 - 274.
- Gheorghiu C, Hanna J, Smith J W, et al, 2010. Encapsulation and migration of PIT tags implanted in Brown Trout (*Salmo trutta* L.) [J]. *Aquaculture*, 298(3/4): 350 - 353.
- Hatry C D, Thiem J D, Daniel H, et al, 2016. Fishway approach behaviour and passage of three redhorse species (*Moxostoma anisurum*, *M. carinatum*, and *M. macrolepidotum*) in the Richelieu River, Quebec [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 99(2/3): 249 - 263.
- Horton G E, Dubreuil T L, Letcher B H, et al, 2007. A model for estimating passive integrated transponder (PIT) antenna efficiencies for interval-specific emigration rates [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 136(5): 1165 - 1176.
- Jorgensen, M G P, Deurs M V, Butts I A E, et al, 2017. PIT-tagging method for small fishes; A case study using sandeel (*Ammodytes tobianus*) [J]. *Fisheries Research*, 193: 95 - 103.
- Michael J N, James W A, Christopher D J, et al, 2012. A quantitative assessment of fish passage efficiency [J]. *Fish & Fisheries*, 13(4): 450 - 464.
- Nolan, B P, Summer M B, Katherine R M, 2016. Efficiency of portable antennas for detecting passive integrated transponder tags in stream-dwelling Salmonids [J]. *Plos One*, 11(2): 1 - 10.
- Roussel J M, Haro A, Cunjak R A, et al, 2000. Field test of a new method for tracking small fishes in shallow rivers using passive integrated transponder (PIT) technology [J]. *NRC Research Press Ottawa, Canada*, 57(7): 1326 - 1329.
- Schmidt T, Lob C, Schreiber B, et al, 2016. A pitfall with pit tags: reduced detection efficiency of half-duplex passive integrated transponders in groups of marked fish [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 36(4): 950 - 957.
- Steffensen S M, Thiem J D, Stamplecoskie K M, et al, 2013. Biological effectiveness of an inexpensive nature-like fishway for passage of warmwater fish in a Small Ontario Stream [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 22(3): 374 - 383.
- Thiem J D, Binder T R, Dawson J W, et al, 2011. Behaviour and passage success of upriver-migrating lake Sturgeon *Acipenser fulvescens* in a vertical slot fishway on the Richelieu River, Quebec, Canada [J]. *Endangered Species Research*, 15(1): 1 - 11.
- Tummers J S, Hudson S, Lucas C L, 2016. Evaluating the effectiveness of restoring longitudinal connectivity for stream fish communities: towards a more holistic approach [J]. *Science of the Total Environment*, 569/570(1): 850 - 860.
- Watson J R, Goodrich H R, Cramp R L, et al, 2019. Assessment of the effects of micropit tags on the swimming performance of small-bodied and juvenile fish [J]. *Ecological Engineering*, 218: 22 - 28.

(责任编辑 万月华)

Monitoring and Analysis of Fish Passage Efficiency by Full Duplex RFID Technology

TAO Yu¹, SHI Xiao-tao¹, ZHANG Jian¹, JIANG Ze-wen¹,
LUO Jin-mei¹, LEI Qing-song², KE Sen-fan¹

- (1.Hubei International Science and Technology Cooperation Base of Fish Passage,
China Three Gorges University, Yichang 443002,P.R.China;
2.Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510611,P.R.China)

Abstract: Quantitatively evaluating the detection efficiency of fish passage monitoring systems is necessary if they are to be reliably used to evaluate fish passage efficiency. Compared with the half-duplex radio frequency identification system (RFID), the full-duplex RFID has the advantages of simple operation and convenient data transmission. In recent years, it has been widely applied in evaluating fish passage efficiency. However, few studies have been done in China, and detection efficiency has not been established. In this study, the monitoring efficiency of a full-duplex radio frequency identification system was evaluated based on its recognition of tagged *Schizothorax prenanti* after entering the system. Fish incidence distance, incidence angle, body length and swimming speed were selected as independent variables and their effect on detection efficiency were quantized. The response of detection efficiency to the independent variables was analyzed using a logistic regression model, and the most appropriate prediction model was screened using AIC criteria. We found that swimming speed ($P=0.001$) and body length ($P=0.03$) correlated negatively with fish detection efficiency. The effect of the incidence angle of fish ($0^{\circ}-90^{\circ}$) on monitoring efficiency was not significant ($P>0.05$). The monitoring efficiency of fish with an incidence distance of 0–10 cm was significantly higher than that of fish with incidence ranges of 20–30 cm and 30–40 cm ($P<0.05$). To improve the accuracy of fish passage monitoring, we recommend that data on fish physiology (such as body length) and swimming behavior (such as swimming speed) should be obtained in order to properly position the antenna before a full duplex RFID monitoring system is put in operation to provide data for fishway optimization.

Key words: radio frequency identification system; fish passage; passive integrated transponder tag; detection efficiency; fish passage efficiency