



雅鲁藏布江支流湘曲湘河鱼道声驱鱼效果初探

李嘉欣^{1,2}, 李晓兵³, 白艳勤^{2,4}, 石小涛^{2,4}, 张占⁵, 尼玛旦增⁵,
达瓦⁵, 杨吉^{2,4}, 李新宇^{2,4}, 孙攀^{2,4}, 王艳⁶, 刘国勇^{2,4*}

(1. 三峡大学生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 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;

3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222;

4. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

5. 西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院, 西藏 拉萨 850000;

6. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为探求野外场景下利用声驱鱼技术能否提高鱼道进口的通过数量, 本研究在雅鲁藏布江支流湘曲湘河鱼道进口 2[#]上游的河道布置水下扬声器并 24 h 循环播放捕食者的声音(扬子鳄吼叫声), 利用 PIT 遥测系统对湘河水利枢纽的过鱼对象: 拉萨裸裂尻鱼、双须叶须鱼和斯氏高原鳅的负趋音行为进行监测。为考虑监测过程中水文情势和环境因子变化对负趋音行为的影响, 实验通过构建耦合多因素的 Logistic 回归模型, 采用 AIC 模型准则筛选最优模型, 并识别影响鱼类负趋音行为的关键因素。结果显示: ①实验组进入鱼道的数量显著高于对照组; ②声音和鱼道流量是影响鱼道进口通过率的关键因素; ③声音开启后, 拉萨裸裂尻鱼和双须叶须鱼的鱼道进口通过率显著高于斯氏高原鳅; ④监测期间 2[#]鱼道进口流量在 0.81~1.32 m³/s 的区间内变化, 在此区间内鱼道流量和鱼道进口通过率之间呈负相关趋势 ($P=0.007$), 当鱼道流量过高时, 鱼道进口通过率会随鱼道流量的增加而降低。研究表明, 声驱鱼技术在实际工程应用中能在一定程度上阻止鱼类进入电站尾水等危险区域并增加鱼类进入鱼道的概率。本研究可为声驱鱼技术在鱼道工程的应用和湘河水利枢纽过鱼设施的优化设计提供依据和参考。

关键词: 声音威慑系统; 负趋音行为; AIC 准则; Logistic 回归模型; 扬子鳄吼叫声; 湘河水利枢纽; 雅鲁藏布江

中图分类号: S 973.4

文献标志码: A

水利开发带来巨大社会经济利益的同时, 也给水生生态系统和流域内的水生生物产生了不利影响^[1-3]。为减缓大坝建设对鱼类洄游通道连通性的阻隔, 修建了鱼道等过鱼设施以辅助鱼类过坝。但相关研究表明, 部分投入使用的鱼道进行评估

后发现其过鱼效果并不理想^[4-5]。为协助鱼类快速找到鱼道等过鱼设施的进口, 需要采用一些辅助诱驱鱼措施对其进行阻拦和引导^[6]。声驱鱼技术作为辅助诱驱鱼的有效措施之一, 是基于声信号调节鱼类行为的重要过鱼效果优化技术手段, 其

收稿日期: 2024-01-25 修回日期: 2024-05-08

资助项目: 国家自然科学基金 (52279069); 湖北省自然科学基金 (创新群体项目) (2023AFA005)

第一作者: 李嘉欣 (照片), 从事生态水利研究, E-mail: li18271896573@163.com

通信作者: 刘国勇, 从事生态水利研究, E-mail: fishlab@163.com



目的是阻拦鱼类进入水轮机进水口, 溢洪闸等危险区域, 使鱼类顺利找到鱼道等过鱼设施进口, 提高过鱼设施的通过效率^[7-8]。

鱼类能依靠内耳、侧线听到不同的声音, 并产生与之相应的行为反应——趋音性^[9-10]。声驱鱼技术的工作原理是利用鱼类对声音的反应规律来控制鱼类运动方向及活动范围, 发挥功效的前提是保证鱼类能听到所使用的声音。不同鱼种的听觉能力各不相同, 鲤形目 (Cypriniformes) 和鲇形目 (Siluriformes) 鱼类因具有韦伯氏器, 导致其具有较宽的听力频谱和较低的听力阈值, 对声音的刺激也更为敏感^[11]。通过听性脑干反应法 (auditory brainstem response, 简称 ABR) 可得到鱼类听力的阈值图, 以确保播出的声音在鱼类听觉的敏感区^[12]。如 Lovell^[13] 等通过听脑干反应法测试出鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和鳙 (*Aristichthys nobilis*) 能听到 100~3 000 Hz 范围内的声音。鱼类并非对所有听到的声音都会产生趋避行为, 声驱鱼技术的关键是找到合适的、足够引起鱼类产生趋避行为的声音, 通过室内趋音实验可以筛选足够引起鱼类产生趋避行为的声音^[12]。鱼类的趋音性分为正趋音性和负趋音性, 当鱼类接收到声信号后趋向声源的行为特征称为正趋音行为, 当鱼类接收到声信号后逃离声源的行为特征称为负趋音行为^[10]。如草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 摄食浮萍的声音能使其向声源处移动^[14], 扬子鳄 (*Alligator sinensis*) 吼叫声能使裸腹叶须鱼 (*Ptycho-barbus kaznakovi*) 产生远离扬声器的逃逸行为^[15-16]。

湘河流域是西藏自治区日喀则市规划建设的重要粮食生产基地。湘河水利枢纽及配套灌区工程以灌溉、供水、改善自然保护区生态环境为主, 兼顾发电。为了保证湘河生物多样性, 降低水利枢纽工程建设对湘河生物多样性的影响, 建设了鱼道工程以缓解该水利枢纽工程对鱼类的阻隔影响。但湘河水利枢纽鱼道工程未配备补水通道, 从而导致鱼道进口水流并不能有效吸引鱼类进入鱼道^[17]。鉴于此, 本研究以湘河水利枢纽鱼道工程为研究区域, 在前期室内实验筛选鱼类敏感的负趋音行为研究基础之上^[15-16], 选取拉萨裸裂尻鱼 (*Schizopygopsis younghusbandi*)、双须叶须鱼 (*P. dipogon*) 和斯氏高原鳅 (*Triplophysa stoliczkai*) 为对象, 在鱼道进口上游的电站尾水段河道布置水下扬声器并循环播放捕食者的声音 (扬子鳄的吼叫声), 采用射频识别遥测技术 (RFID) 开展声音对

鱼道进口通过效率的监测, 并构建数学模型对其进行评价和识别影响鱼道进口通过效率的关键因子, 以期声驱鱼技术在鱼道工程的应用和湘河水利枢纽过鱼设施的优化设计提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

湘河水利枢纽位于西藏自治区日喀则市南木林县 (图 1), 水库总库容 1.134 亿 m³, 坝高 51.0 m, 为高水头水库。鱼道位于闸坝右岸, 为竖缝式鱼道, 鱼道总长约 1 968.2 m。过鱼对象为裂腹鱼属的异齿裂腹鱼 (*Schizothorax oconnori*)、双须叶须鱼等, 鳅科 (Cobitidae) 的斯氏高原鳅, 裸裂尻属的拉萨裸裂尻鱼和尖裸鲤属 (*Oxygymnocypris*) 的尖裸鲤 (*O. stewarti*) 等 11 种鱼类为主, 并适当兼顾其他鱼类, 在坝下 178 和 203 m 的尾水渠右岸分别设置两个鱼道进口, 鱼道净宽 2.0 m, 高 2.0 m, 每级池长 2.3 m^[17]。

1.2 实验对象

本研究选取 11 种过鱼对象中的 3 种鱼, 即拉萨裸裂尻鱼、双须叶须鱼和斯氏高原鳅为研究对象, 实验鱼通过在湘河水库坝上和坝下布置的地笼获取, 并通过《西藏鱼类及其资源》^[18] 对物种进行鉴定。为避免网具对鱼体的损伤, 在捕捞和转运的过程中均需带水操作。本实验所有操作严格遵守实验动物福利伦理和动物实验安全审查规范, 并按照水产动物实验伦理审查委员会制定的规章制度执行。

1.3 实验鱼的标记和暂养

对实验鱼植入标签前, 先用浓度为 75% 的医用酒精对标记工具进行消毒, 使用麻醉剂 (MS-22) 进行麻醉并测量其形态学参数, 并通过标记工具将 PIT 标签植入鱼体腹部。完成标记后, 将实验鱼放入自然河流内的网箱中暂养, 暂养周期为 24 h。暂养结束后, 挑选健康的个体进行实验。共标记 180 尾实验鱼, 相关生物学参数见表 1。

1.4 实验装置

本研究参照 Liu 等^[15] 的方法, 对扬子鳄吼叫声进行录制, 通过 Adobe Audition 2018 软件进行快速傅里叶变换 (FFT) 并降噪。采用 PIT 遥测系统 (Passive Integrated Transponder System) 对声驱鱼数量进行监测。为观察声音是否能防止鱼类上溯

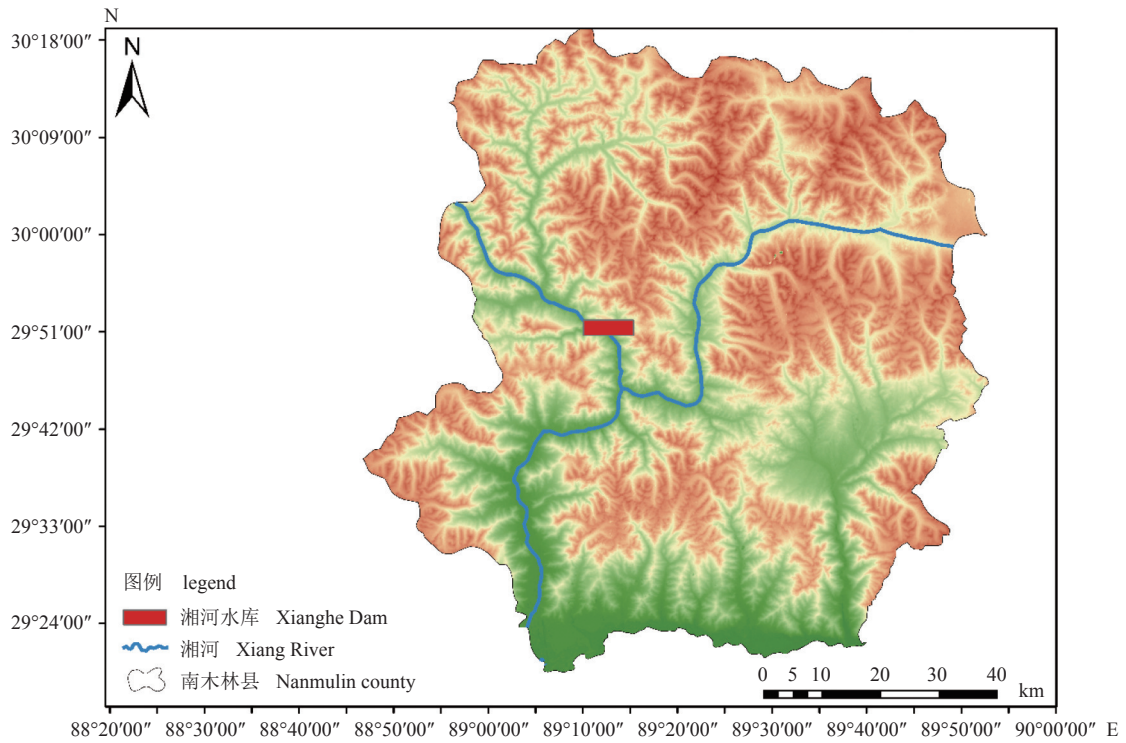


图 1 研究区域地理位置图

Fig. 1 Geographic location of the study area

表 1 实验鱼生物学参数

Tab. 1 Physiological parameters of experimental fish

种类 species	体长/cm length	体重/g weight	肥满度/(g/cm ³) group fatness	尾数 quantity
拉萨裸裂尻鱼 <i>S. younghusbandi</i>	25.67±5.78	209.55±114.08	1.16±0.30	60
双须叶须鱼 <i>P. dipogon</i>	17.79±4.89	93.3±75.76	1.45±0.75	60
斯氏高原鳅 <i>T. stoliczkai</i>	10.9±1.72	17.37±14.35	1.21±0.51	60

至电站尾水区域并将其引导至鱼道进口，在鱼道进口 2#处布置一套全双工射频识别系统，2 台下扬声器 (UW-30, 美国) 通过钢筋固定于水深 2 m 的右侧河道 (图 2)。用电脑 (3020-3070MFF, 戴尔) 将扬子鳄吼叫声转换成声信号，并通过 2 台下扬声器 24 h 循环播放。

为使声音能达到驱鱼效果，本研究将扬子鳄的吼叫声通过功率放大器 (XLS-1000, Crown Audio, 日本) 调整至 160 dB re 1 μPa (以下简称为 dB)。为了解声场分布特征，本研究采用定点监测法 (图 3)。使用连接水听器 (Reson TC 4032, Slangrup, 丹麦) 的声级计 (AWA6291, 杭州爱华, 中国) 进行测量。每个点测量 30 s 后取声压平均值。使用水下录音机 (Nagra SD, Audio Technology, 瑞士) 记录水下扬声器正前方 1 m 处的水下背景噪音和水下播放的扬子鳄吼叫声。

1.5 实验方案

本研究在鱼道进口 2#下游 5 m 处释放标签鱼。为验证能否利用鱼类负趋音行为来提高鱼道进口通过率，本研究将实验划分为空白对照组和实验组，其中未开启水下扬声器进行播音为空白对照组，反之则为实验组。通过鱼道进口 2#处的 PIT 天线监测评估鱼道进口的通过率，实验组和空白对照组分别进行 3 次放鱼实验，共计进行 6 次放鱼实验，每次实验放 30 尾标签鱼 (每个鱼种 10 尾)，共计释放标签鱼 180 尾。根据前期预实验的结果，设定每次实验时间为 24 h，若实验鱼在 24 h 内通过 PIT 线圈，即为成功；若实验鱼未通过 PIT 线圈或超过 24 h 通过，即为失败。采用鱼道进口通过率 (FP) 量化声音引导实验鱼的效果，其定义为实验鱼通过天线的数量占此次放鱼总数

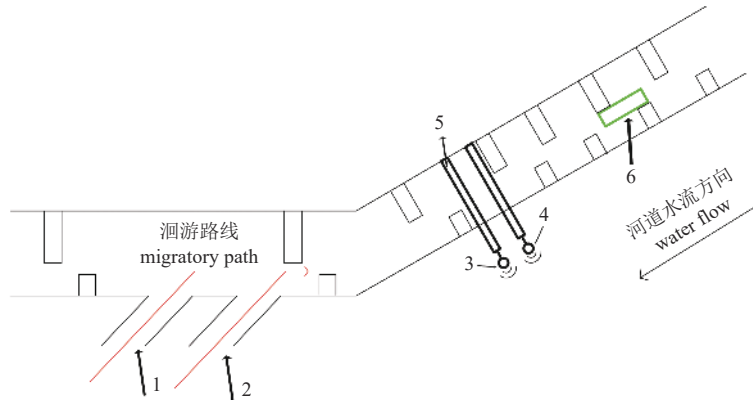


图 2 实验区域示意图

1. 鱼道进口 1[#], 2. 鱼道进口 2[#], 3-4. 水下扬声器, 5. 固定支架, 6. PIT 遥测系统。图中红色线条代表鱼类进入鱼道的洄游路线, 绿色线条代表 PIT 监测系统。

Fig. 2 Schematic diagram of experimental area

1. fishway entrance 1[#], 2. fishway entrance 2[#], 3-4. underwater speaker, 5. support material, 6. PIT system. In the figure, the red lines represent the migration route of fish into the fishway, and the green lines represent the PIT system.

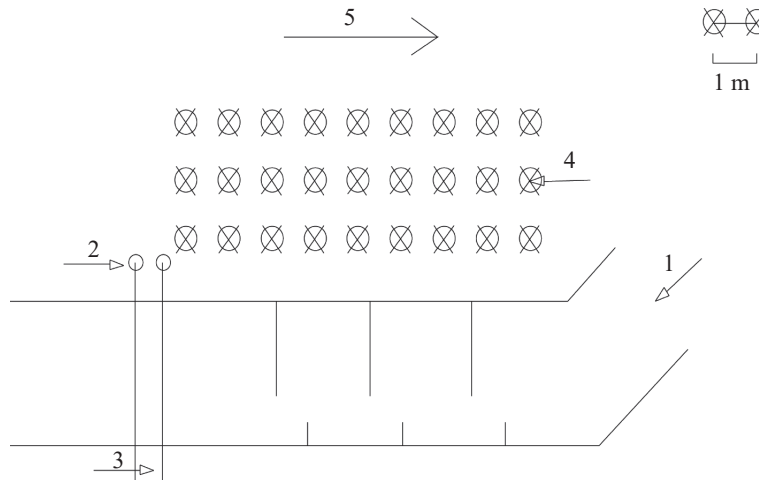


图 3 声压级监测示意图

1. 鱼道进口 2[#], 2. 水下扬声器, 3. 固定支架, 4. 声压级监测点, 5. 水流方向。

Fig. 3 Sound intensity point monitoring map

1. fishway entrance 2[#], 2. under water speaker, 3. support material, 4. sound intensity point, 5. the direction of the water flow.

的百分比:

$$FP = \frac{N1}{N2} \times 100\%$$

式中, N1 为 2 号鱼道进口天线识别的实验鱼数量, N2 为此次放鱼的总数。

1.6 数据分析

使用 Microsoft Excel 2019 软件对实验数据进行统计和处理, 使用 Rstudio 软件进行卡方检验, 比较实验组和对照组整体通过天线数量的显著性差异。P<0.05 表示有显著差异, 统计均值以平均值±标准差 (mean±SD) 表示。

为识别声驱鱼实验的关键因素, 本研究使用 R 4.3.3 软件中的“glm”包构建 Logistic 回归模型, 各变量见表 2, 模型公式:

$$\text{logit}(P_i) = \ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_mx_m = a_0 + \sum_{j=1}^m a_jx_j = 1, 2, \dots, m$$

式中, a_i 表示自变量; x_j 改变一个单位时, $\text{logit}(P_i)$ 的改变量, 代表各影响因素的权重系数; x_1, x_2, \dots, x_m 表示因变量有 m 个影响因素; p_i 表示事件发生的条件概率。

为避免 Logistic 回归模型中自变量可能存在

表 2 Logistic 回归模型的数据文件变量

Tab. 2 Data file variables of Logistic regression model

变量名 variable	变量含义 meaning of variables	取值范围 value range	赋值说明 assignment description
K	群体肥满度 group fatness	0.11~4.95/(g/cm ³)	连续变量 continuous variable
Q	河道流量/(m ³ /s) river flow	118~120	连续变量 continuous variable
WS	鱼道进口2#流量(m ³ /s) fishway entrance2# flow	0.81~1.32	连续变量 continuous variable
WT	水温(°C) water temperature	10.2~12.7	连续变量 continuous variable
AU	声音 sound	1. 开启声音, 2. 关闭声音 1. on, 2. off	分类变量 assignment description
S	鱼种 species	1. 拉萨裸裂尻鱼, 2. 双须叶须鱼, 3. 斯氏高原鳅 1. <i>S. younghusbandi</i> , 2. <i>P. dipogon</i> , 3. <i>T. stoliczkae</i>	分类变量 assignment description
PASS	通过线圈结果 result		0.失败, 1.成功 0. fail, 1. succeed

多重共线性问题, 使用“MASS”包对模型中的自变量采用逐步向后回归法进行筛选, 通过赤池信息量准则 (Akaike Information Criterion, AIC) 筛选最佳模型, 通常选用 AIC 值最小的模型。

$$AIC = 2k - 2\ln L(\theta)$$

式中, k 为 Logistic 回归模型中的参数数量, $L(\theta)$ 为似然函数。

2 结果

2.1 声音频谱和声场图

通过记录水下扬声器正前方 1 m 范围内的声音频谱, 发现河流环境噪声的范围为 0.05~8.00 kHz, 其峰值为 10~1 000 Hz, 原始录音和 underwater 扬声器正前方 1 m 范围内记录的声音显示扬子鳄吼叫声能产生 0.05~8.00 kHz 的宽频音, 并在 3 000 Hz 内保持较高水平 (图 4)。

在水下扬声器未开启情况下, 河道的环境噪声约为 95~100 dB。开启水下扬声器后, 靠近水下扬声器区域的声压级最大 (160 dB), 并且声压级随着距离的增加逐渐衰减, 鱼道进口 2# 处的声压级为 128 dB, 衰减幅度约为 33 dB (图 5)。

2.2 声音对鱼道进口通过率的影响

本研究共释放标记鱼 180 尾, 共有 69 尾标记鱼被鱼道进口 2# 处的天线检测到信号, 这表明鱼类有主动上溯的需求 (表 3)。在 6 次放鱼实验中河道流量、鱼道进口流量和水温均发生变化。通过鱼道 2# 进口处的 PIT 天线检测到的标记鱼信号表明, 实验组进入鱼道的标记鱼数量均高于对照组

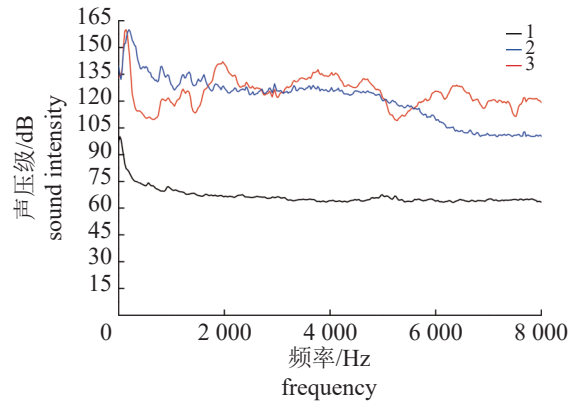


图 4 扬子鳄吼叫声频谱图

1. 水下背景声, 2. 扬子鳄吼叫声 (原声), 3. 使用水听器记录的水下扬子鳄吼叫声。

Fig. 4 Sound of the *A. sinensis* hissing

1. underwater background sound, 2. *A. sinensis* hissing (original sound), 3. underwater *A. sinensis* hissing.

(表 3), 这表明捕食者的声音 (扬子鳄吼叫声) 对鱼类具有一定的威慑作用。通过对比实验组和对照组的鱼道进口通过率发现, 实验组的鱼道进口通过率显著高于对照组 ($X^2 = 5.35, P < 0.05$)。

2.3 不同实验鱼种鱼道进口通过率分析

本研究通过对比不同实验鱼种的鱼道进口通过率, 发现拉萨裸裂尻鱼 (53.3%) 的鱼道进口通过率最高, 其次是双须叶须鱼 (46.2%) 和斯氏高原鳅 (30%)。通过卡方检验对比 3 种实验的鱼道进口通过率发现, 拉萨裸裂尻鱼和双须叶须鱼的鱼道进口通过率显著高于斯氏高原鳅 ($X^2 = 5.97, P < 0.05$), 而拉萨裸裂尻鱼和双须叶须鱼的鱼道进口通过率无显著差异 ($X^2 = 0.27, P > 0.05$)。

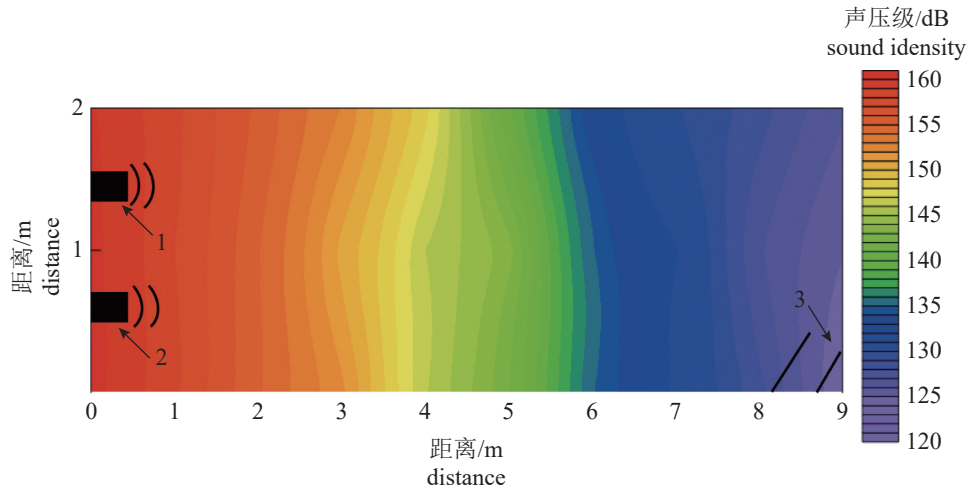


图 5 声音开启后河道的声场分布图

1. 水下扬声器, 2. 水下扬声器, 3. 鱼道进口 2#。

Fig. 5 Acoustic field distribution map of the river channel

1. underwater speaker, 2. underwater speaker, 3. fishway entrance 2#.

表 3 实验工况

Tab. 3 Experimental working condition

工况 trail	日期 date	鱼道进口2#流量/(m ³ /s) fishway entrance 2# discharge	水温/°C water temperature	河道流量/(m ³ /s) discharge	声音 sound	监测数量 no.detected	鱼道进口通过率/% fishway entrance import pass rate
1	2023-06-05	0.81	10.2	118	开启	17	56.7
2	2023-07-14	1.32	12.7	120	关闭	8	26.7
3	2023-06-12	0.92	10.5	120	开启	16	53.3
4	2023-07-01	0.84	11.4	118	关闭	12	40
5	2023-07-06	1.03	11.4	120	开启	9	30
6	2023-06-20	0.85	10.7	120	关闭	7	23.3

2.4 识别野外环境下影响鱼道进口通过率的关键因素

以声音和鱼道进口 2#流量为自变量的模型 AIC 值最低, 模型最佳 (表 4)。通过最佳模型中各因子系数估计值, 发现声音 (AU) 和鱼道进口 2#流量 (WS) 对鱼道进口的通过率有显著影响 (图 6) ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 野外环境实验和室内水槽实验的差异性

与复杂的野外条件相比, 室内趋音实验的实验条件可控, 便于精细观察实验鱼的行为反应。因此, 在野外开展相关研究前筛选出对目标鱼类有效的声音是十分必要的^[19]。本研究使用的驱鱼

表 4 基于赤池信息准则 (AIC) 的最佳模型选择

Tab. 4 Model selection base on the Akaike information criterion (AIC)

模型 model	AIC _i	Δ _i AIC	w _i	w _i /w _j
dB+WS	230.58	0	0.42	
dB+WS+S	231.09	1.49	0.20	0.47
dB+WS+WT+S	232.50	1.92	0.16	0.38
dB+WS+WT+Q+S	233.29	2.71	0.11	0.25
dB+WS+WT+Q+S+K	233.60	3.02	0.09	0.22

注: $w_i = \text{EXP}(-0.5\Delta_i \text{AIC}) / [\text{EXP}(-0.5\Delta_1 \text{AIC}) + \text{EXP}(-0.5\Delta_2 \text{AIC}) + \text{EXP}(-0.5\Delta_3 \text{AIC}) + \text{EXP}(-0.5\Delta_4 \text{AIC})]$, w_i 为模型权重, w_j 为最优模型权重。

Notes: $w_i = \text{EXP}(-0.5\Delta_i \text{AIC}) / [\text{EXP}(-0.5\Delta_1 \text{AIC}) + \text{EXP}(-0.5\Delta_2 \text{AIC}) + \text{EXP}(-0.5\Delta_3 \text{AIC}) + \text{EXP}(-0.5\Delta_4 \text{AIC})]$, w_i is the weight of the model, w_j is the weight of the optimal model.

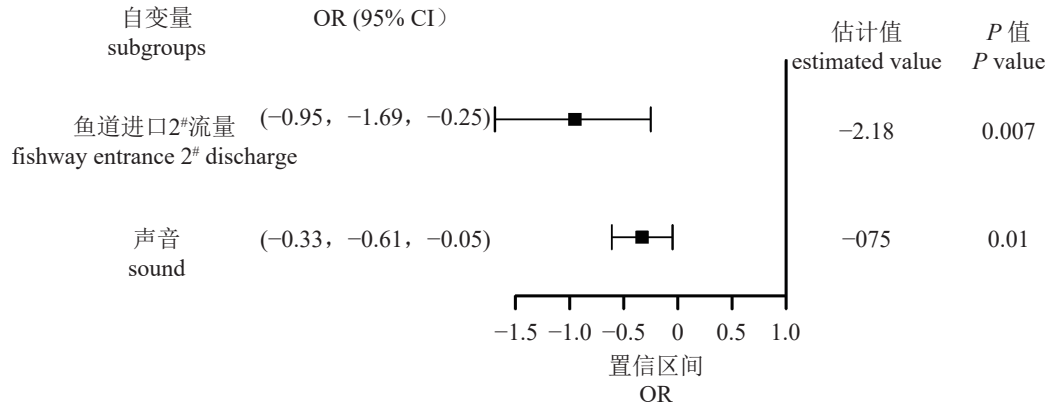


图 6 最优模型森林图

Fig. 6 Best model forest diagram

声(扬子鳄的吼叫声)在室内研究中能使鱼类产生明显的远离声源的负趋音行为^[15-16, 20]。但室内环境和天然环境中声音的粒子震动方式、池壁和池底的反射等有所差异,从而导致室内和野外环境中声场分布的差异性^[21]。Liu^[15]等的室内声场图表明其声场呈条状分布,声强横向衰减速率快,纵向声强几乎没有衰减,但声强的高能区仅在水下扬声器附近 1 m 处。而本研究的声场图呈扇形分布,横向(平行水流)衰减速率快,纵向(垂直)衰减速率缓慢,虽然声音横向衰减程度和室内实验大致相同,但声强的高能区为水下扬声器附近 3 m 处。导致结果产生差异的主要原因可能是受水流的影响。因为在野外监测的过程中,湘河水利枢纽 4 台发电机组处于满发状态,水轮机下泄流量大。室内水槽的池壁和池底对声波的反射易造成声波变形^[21-23]。Qin 等^[16]的室内频谱显示,水下播放的扬子鳄吼叫声和原始音频无太大的变形,且峰值维持 5 000 Hz 内。而本研究频谱图显示水下扬子鳄吼叫声与原始音频相比产生了较大的差异,这可能是由于监测期间,电站 4 台机组处于满载状态,导致河流环境噪音过大致使声音产生变形。相关研究表明,鱼类对宽频音的反应更为强烈,产生这种现象的原因可能是听力阈值的存在。Vetter 等^[24]发现一些鲤科(Cyprinidae)鱼类能听到频率大于 3 000 Hz 的声音,其中鲢和鳊能接收 0.10~5.00 kHz 的宽频音。本研究的水下扬子鳄吼叫声为宽频音,频率范围为 0.05~5.00 kHz,在 0.05~1.50 kHz 内到达波峰(图 4),这与 Vetter 等^[24]的研究结果一致,表明水下扬子鳄吼叫声也处于骨鳔鱼类可以接收到的声音频率范围。

鱼类会对捕食者的声音产生反捕食行为^[25],如龙珍满等^[26]发现四大家鱼幼鱼在捕食胁迫下均呈“C”型快速游泳模式远离捕食者。扬子鳄曾广泛

分布于长江流域中下游地区,野生个体仅在中国安徽省南部和浙江省少数地区分布,并会捕食鱼类^[27-29]。虽然雅鲁藏布江流域并未发现有扬子鳄的分布,但不能忽略早期雅鲁藏布江流域的鱼类与扬子鳄具有共同的生活史^[27]。

3.2 不同鱼种的鱼道进口通过率差异

鱼类的听觉系统由内耳、鳔和侧线组成,内耳为主要的听觉器官;鳔能强化声波震动,使鱼类能够间接感受到声压;侧线主要用来感受水流、水流压力、温度变化和低频振动^[30-31]。本研究以 2 种鲤科鱼类(拉萨裸裂尻鱼、双须叶须鱼)和 1 种鳅科鱼类(斯氏高原鳅)为对象,通过对比其鱼道通过率,发现拉萨裸裂尻鱼和双须叶须鱼的鱼道通过率显著高于斯氏高原鳅。导致拉萨裸裂尻鱼和双须叶须鱼鱼道进口通过率高于斯氏高原鳅的原因,可能是因为拉萨裸裂尻鱼和双须叶须属于鲤形目(科)骨鳔鱼类,具有韦伯氏器,声音能通过韦伯氏器等结构被有效传递到内耳中,其对声音的刺激也更为敏感^[32]。而斯氏高原鳅为非骨鳔鱼类,对声音的敏感程度不如鲤科鱼类。Liu 等^[15]的研究结果表明裸腹叶须鱼对扬子鳄吼叫声有明显的负趋音行为。此外,本研究监测期间鱼道进口 2# 的平均流速为 0.39 m/s (小于拉萨裸裂尻鱼和双须叶须鱼的平均临界游泳速度,大于斯氏高原鳅的平均临界游泳速度^[33-34]),这也可能是导致鲤科鱼类鱼道进口通过率高于鳅科鱼类的原因之一。

3.3 鱼道流量对鱼道进口通过率的影响

鱼道进口的水流条件是影响鱼道进口通过率的重要条件^[35]。一些研究表明,鱼类进入鱼道的数量和鱼道流量之间呈正相关趋势,石小涛等^[36]发现鱼道进口过鱼数量和种类与鱼道进口流量呈

正相关。但本研究通过 Logistic 回归模型识别出鱼道流量对鱼道进口通过率存在显著影响 ($P < 0.05$), 且鱼道进口通过率和鱼道流量之间呈负相关 (图 6)。导致与前人研究相反结果的原因, 可能是由于监测期间鱼道流量增幅较大。本研究监测期间, 鱼道进口 2# 的流量为 $0.81 \sim 1.32 \text{ m}^3/\text{s}$, 在高流量情况下对部分实验鱼的上溯可能形成了流速障碍, 从而导致进口通过率与鱼道流量呈负相关 (图 6)。此外, 在现场监测过程中发现高流速情况下鱼道进口 2# 处存在回流区, 回流区的存在使水流诱鱼的效果并不理想。如李广宁等^[37]发现当鱼道进口的诱鱼水流与回流区的旋转水流方向一致时, 水流诱鱼的效果会被增强, 从而增加水流诱鱼的覆盖范围。当鱼道进口的诱鱼水流与回流的旋转水流方向相反时, 会被迫改变水流方向, 导致诱鱼水流的影响范围大大减小。即使鱼道进口诱鱼水流的流速相对较高, 但是由于诱鱼水流的动量较小, 从而导致鱼类难以穿越回流区。

3.4 声音对鱼道进口通过率的影响

相对于宽阔的河道而言, 鱼道进口的工程尺度相对较小, 存在“针眼效应”, 且鱼道设计流量普遍偏低, 往往造成诱鱼水流的流量不足, 导致鱼道进口的诱鱼效果不佳, 从而降低了鱼道进口的通过率^[37]。为避免鱼类误入电站尾水回流区并使鱼快速找到鱼道进口, 需要辅助诱驱鱼措施来引导鱼类^[12]。声音辅助诱驱鱼措施作为不对鱼类造成伤害的非物理屏障, 被广泛应用于水利工程中^[38]。如 Riesgraf 等^[39]的研究结果表明, 当水下摩托艇的声音开启后, 鲤 (*Cyprinus carpio*) 在船闸附近的停留时间显著减少。本研究在鱼道进口 2# 上游的河道内布置水下扬声器并播放扬子鳄吼叫声, 结果表明实验组整体进入鱼道的数量显著高于对照组 ($P < 0.05$)。此结果与 Riesgraf 等^[39]的研究结果一致, 表明扬子鳄吼叫声在一定程度上能够威慑鱼类。

尽管扬子鳄吼叫声在野外环境下有一定的变形, 但本研究结果证实了室内趋音实验的结果有一定的参考价值。与复杂的野外条件相比, 室内趋音实验的条件可控, 便于精细观察实验鱼的行为反应。因此, 在野外开展相关研究前筛选出对目标鱼类有效的声音是十分必要的。

3.5 河道环境对鱼道进口通过率的影响

河道流量变化对鱼类的洄游过坝具有重要的

影响^[40-41]。本研究发现, 河道流量对鱼道进口通过率没有显著影响 ($P > 0.05$)。而焦易林等^[42]的研究结果表明, 短须裂腹鱼 (*S. wangchiachii*) 的上溯动机和河道流量之间存在显著相关性, 且短须裂腹鱼的上溯动机随着河道流量的减少而增加。不同研究中河道流量变化幅度的差异是导致结果产生差异的主要原因, 本研究仅监测了湘河水利枢纽 4 台机组处于满发状态的进口通过率, 且监测期间处于西藏湘河地区的雨季, 河道流量变化不太明显。而黑水河松新电站河道水文形式变化频繁且涨落速率快, 河道流量变化幅度较大, 导致大部分实验鱼选择在河道流量较低时上溯^[43]。

水温是影响鱼类洄游的重要环境因子^[44]。鱼道水温对鱼类的上溯动机存在显著影响, 且上溯动机随着水温的上升而增加^[45]。但本研究构建的模型中发现, 水温对鱼道进口通过率无显著影响 ($P > 0.05$) (表 3)。本研究监测期间为西藏地区的雨季, 温差变化幅度并不大, 这可能是导致温度对鱼道进口通过率没有显著影响的原因之一, 但在实际监测中发现, 大部分实验鱼选择在低温条件 ($10.2 \sim 11.0 \text{ }^\circ\text{C}$) 下进入鱼道, 此结果表明 $10.2 \sim 11.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 可能比较适合实验鱼的上溯。水温的变化会直接或间接地影响鱼类的摄食活动、代谢和游泳能力^[46]。曾本和等^[47]在西藏土著鱼类的温度耐受性实验中发现, 拉萨裸裂尻鱼在水温低于 $7 \text{ }^\circ\text{C}$ 时不摄食, 水温为 $8 \sim 11 \text{ }^\circ\text{C}$ 时活动正常。

本研究利用射频识别技术分析了解流域湘河水利枢纽 4 台机组满发状态下声驱鱼技术能否提高鱼道进口的通过效率, 并通过构建多因素耦合模型识别出声音和鱼道进口 2# 流量是影响鱼道进口通过率的关键因素。本研究分析了在实际工程中, 声驱鱼技术能否提高鱼道进口的通过率, 对声驱鱼技术在实际工程中的应用提供了借鉴和参考。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Vörösmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 555-561.
- [2] Cumberlidge N, Ng P K L, Yeo D C J, et al. Freshwater crabs and the biodiversity crisis: importance, threats, status, and conservation challenges[J]. *Biological Con-*

- ervation, 2009, 142(8): 1665-1673.
- [3] Baumgartner L J, Reynoldson N K, Cameron L, *et al.* Effects of irrigation pumps on riverine fish[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2009, 16(6): 429-437.
- [4] 温静雅, 陈昂, 曹娜, 等. 国内外过鱼设施运行效果评估与监测技术研究综述 [J]. *水利水电科技进展*, 2019, 39(5): 49-55.
Wen J Y, Chen A, Cao N, *et al.* A review of effectiveness assessment and monitoring technologies for fish passage facilities[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(5): 49-55 (in Chinese).
- [5] 陈凯麒, 常仲农, 曹晓红, 等. 我国鱼道的建设现状与展望 [J]. *水利学报*, 2012, 43(2): 182-188,197.
Chen K Q, Chang Z N, Cao X H, *et al.* Status and prospect of fish pass construction in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(2): 182-188,197 (in Chinese).
- [6] 黄晓龙, 白艳勤, 崔磊, 等. 电驱鱼技术在鱼类保护中的应用 [J]. *生态学杂志*, 2021, 40(10): 3364-3374.
Huang X L, Bai Y Q, Cui L, *et al.* Application of electric fish driving technology in fish protection[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(10): 3364-3374 (in Chinese).
- [7] Ruebush B C. *In-situ* tests of sound-bubble-strobe light barrier technologies to prevent the range expansions of Asian carp[D]. Champaign-Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011: 37-48.
- [8] 魏园杰, 石敏, 曹梦茜, 等. 过鱼设施中辅助诱驱鱼技术要点研究 [J]. *科技风*, 2020(10): 195.
Wei Y J, Shi M, Cao M X, *et al.* Study on the key points of technique of fish inducing and expelling in fish passage[J]. *Technology Wind*, 2020(10): 195 (in Chinese).
- [9] 何大仁 蔡厚才. 鱼类行为学 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1998.
He D R, Cai H C. *Fish behavior* [M]. Xiamen: Xiamen University Press, 1998 (in Chinese).
- [10] 朱存良. 鱼类行为生态学研究进展 [J]. *北京水产*, 2007(104): 20-24.
Zhu C L. *Advances in fish behavioral ecology*[J]. *Journal of Beijing Fisheries*, 2007(104): 20-24 (in Chinese).
- [11] 刘猛, 危起伟, 杜浩, 等. 胭脂鱼听觉阈值研究 [J]. *中国水产科学*, 2013, 20(4): 750-757.
- Liu M, Wei Q W, Du H, *et al.* Auditory thresholds of Chinese sucker *Myxocyprinus asiaticus*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(4): 750-757 (in Chinese).
- [12] 胡运桑, 石小涛, 刘德富, 等. 声音导鱼技术的分析与展望 [J]. *水生态学杂志*, 2013, 34(4): 89-94.
Hu Y S, Shi X T, Liu D F, *et al.* Technology analysis and outlook for the sound guidance fish[J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(4): 89-94 (in Chinese).
- [13] Lovell J M, Findlay M M, Nedwell J R, *et al.* The hearing abilities of the silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and bighead carp (*Aristichthys nobilis*)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2006, 143(3): 286-291.
- [14] 王明云, 沈修俊, 任开元, 等. 摄食声对草鱼幼鱼的诱集作用 [J]. *水生生物学报*, 2021, 45(1): 153-160.
Wang M Y, Shen X J, Ren K Y, *et al.* The attractive effect of feeding sound to juvenile grass carp *Ctenopharyngodon idella*[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 45(1): 153-160 (in Chinese).
- [15] Liu G Y, Wu Y J, Shen X J, *et al.* Laboratory experiments demonstrate that the hissing of the Chinese alligator can effectively inhibit movement of flower fish *Ptychobarbus kaznakovi*[J]. *Hydrobiologia*, 2019, 836(1): 97-108.
- [16] Qin X H, Liu Y H, Shen X J, *et al.* Spatial avoidance of tu-fish *Schizopygopsis younghusbandi* for different sounds may inform behavioural deterrence strategies[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2020, 27(1): 10-19.
- [17] 孙宇, 张友利, 谢方参. 西藏湘河水利枢纽过鱼建筑物设计 [J]. *水利科技与经济*, 2021, 27(1): 9-14,26.
Sun Y, Zhang Y L, Xie F C. Design of fish crossing structure of Xianghe River water control project in Tibet[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2021, 27(1): 9-14,26 (in Chinese).
- [18] 西藏自治区水产局. 西藏鱼类及其资源 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
Xizang Autonomous Region Fisheries Bureau. *Fishes and fish resources in Xizang, China*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995 (in Chinese).
- [19] Putland R L, Mensinger A F. Acoustic deterrents to manage fish populations[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2019, 29(4): 789-807.

- [20] 杨吉, 鄢玉娇, 李晓兵, 等. 草鱼敏感的负趋音筛选 [J]. 水产学报, 2024, 48(4): 049718.
Yang J, Wu Y J, Li X B, *et al.* Screening acoustic deterrents against *Ctenopharyngodon idella*[J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(4): 049718 (in Chinese).
- [21] Ladich F, Fay R R. Auditory evoked potential audiometry in fish[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2013, 23(3): 317-364.
- [22] Popper A N, Hawkins A. The Effects of Noise on Aquatic Life[M]. Springer US, 2012.
- [23] Perry R W, Romine J G, Adams N S, *et al.* Using a non-physical behavioural barrier to alter migration routing of juvenile chinook salmon in the Sacramento-San Joaquin River Delta[J]. *River Research and Applications*, 2014, 30(2): 192-203.
- [24] Vetter B J, Murchy K A, Cupp A R, *et al.* Acoustic deterrence of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) to a broadband sound stimulus[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, 43(1): 163-171.
- [25] Lawrence B J, Smith R J F. Behavioral response of solitary fathead minnows, *Pimephales promelas*, to alarm substance[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1989, 15(1): 209-219.
- [26] 龙珍满, 朱峰跃, 段辛斌, 等. 四大家鱼幼鱼运动能力对捕食胁迫的响应 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(2): 342-351.
Long Z M, Zhu F Y, Duan X B, *et al.* Responses of locomotor ability of juveniles of the four major Chinese carps to predation stress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(2): 342-351 (in Chinese).
- [27] Wang Z H, Yao H, Ding Y Z, *et al.* Testing reintroduction as a conservation strategy for the critically endangered Chinese alligator: movements and home range of released captive individuals[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(24): 2586-2593.
- [28] Huang C C. The ecology of the Chinese alligator and changes in its geographical distribution[C]//Proceedings of the 5th Working Meeting of the IUCN/SSC Crocodile Specialist Group, Gland, Switzerland: IUCN, 1982.
- [29] Ross J P. Crocodiles: Status survey and conservation action plan[M]. 2nd ed. Gland: IUCN/SSC Crocodile Specialist Group. 1998.
- [30] 申钧. 鱼类听觉器官的结构与功能 [J]. 生理科学进展, 1983, 14(1): 58-62.
Shen J. Structure and function of the auditory organs in fish[J]. *Advances in physiological science*, 1983, 14(1): 58-62 (in Chinese).
- [31] 刘志雄, 张迪岩, 杨文俊, 等. 光驱诱鱼技术和声驱诱鱼技术研究现状与应用前景 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36(5): 42-48,61.
Liu Z X, Zhang D Y, Yang W J, *et al.* Technique of fish inducing and expelling by light and sound: research status and application prospect[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(5): 42-48,61 (in Chinese).
- [32] Fink S V, Fink W L. Interrelationships of the ostariophysan fishes (Teleostei)[J]. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 1981, 72(4): 297-353.
- [33] 柯森繁, 金志军, 李志敏, 等. 我国 8 个水电站 15 种过鱼对象游泳能力研究 [J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1608-1619.
Ke S F, Jin Z J, Li Z M, *et al.* Swimming ability of fifteen target fish from eight hydropower stations in China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(5): 1608-1619 (in Chinese).
- [34] Hou Y, Cai L, Wang X, *et al.* Swimming performance of 12 Schizothoracinae species from five rivers[J]. *Journal of Fish Biology*, 2018, 92(6): 2022-2028.
- [35] 谭红林, 谭均军, 石小涛, 等. 鱼道进口诱鱼技术研究进展 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1198-1209.
Tan H L, Tan J J, Shi X T, *et al.* Research progress on the technique of fish attracting in fishway entrance[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 1198-1209 (in Chinese).
- [36] 石小涛, 白天翔, 许家炜, 等. 金沙江下游支流黑水河松新电站鱼道过鱼效果监测与评估 [J]. 湖泊科学, 2023, 35(3): 972-984.
Shi X T, Bai T X, Xu J W, *et al.* Monitoring and evaluation of effectiveness through fishway in Songxin Hydro-power Station of Heishui River, lower reaches of Jinsha River[J]. *Journal of Lake Science*, 2023, 35(3): 972-984 (in Chinese).
- [37] 李广宁, 孙双科, 郝志红, 等. 电站尾水渠内鱼道进口位置布局 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 81-89.
Li G N, Sun S K, Qie Z H, *et al.* Arrangement of fishway entrance in power station tailrace channel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(24): 81-89 (in Chinese).

- [38] Taft E P. Fish protection technologies: a status report[J]. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3(S1): 349-359.
- [39] Riesgraf A T, Finger J S, Zielinski D P, *et al.* Evaluation of a broadband sound projected from the gates of a navigation lock in the Mississippi River shows it to be a weak deterrent for common carp and unable to block passage[J]. *Management of Biological Invasions*, 2022, 13(1): 220-232.
- [40] 任玉峰, 赵良水, 曹辉, 等. 金沙江下游梯级水库生态调度影响研究 [J]. *三峡生态环境监测*, 2020, 5(1): 8-13.
- Ren Y F, Zhao L S, Cao H, *et al.* Influence of ecological regulation of cascade reservoirs in the lower Jinsha River[J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2020, 5(1): 8-13 (in Chinese).
- [41] Capra H, Plichard L, Bergé J, *et al.* Fish habitat selection in a large hydropeaking river: strong individual and temporal variations revealed by telemetry[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 578: 109-120.
- [42] 焦易林, 石小涛, 许家炜, 等. 金沙江支流黑水河松新电站短须裂腹鱼 (*Schizothorax wangchiachii*) 过坝后上溯行为 [J]. *湖泊科学*, 2023, 35(2): 622-631.
- Jiao Y L, Shi X T, Xu J W, *et al.* Upstream behavior of *Schizothorax wangchiachi* after crossing dams at Songxin hydropower Station in Heishui River, a tributary of the Jinsha River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(2): 622-631 (in Chinese).
- [43] 严鑫, 成必新, 杨少荣. 山区河流生态修复案例: 黑水河生态环境问题诊断及对策 [C]//中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集 (一). 上海勘测设计研究院有限公司, 中国三峡建设(集团)有限公司, 2021:8.
- Yan X, Cheng B X, Yang S R. An ecological-restoration case study of mountain river: analysis and restoration measures of eco-environmental issues in the heishuihe river [C]//Chinese Society of Environmental Sciences Environmental Engineering Branch. 2021 Annual Meeting of Science and Technology of Chinese Society of Environmental Sciences-Environmental Engineering Technology Innovation and Application Branch Field Proceedings (1). Shanghai Institute of Survey and Design Research Co. , Ltd., China Three Gorges Construction (Group) Co. , Ltd., 2021 : 8. (in Chinese).
- [44] Zimmer M, Schreer J F, Power M. Seasonal movement patterns of Credit River brown trout (*Salmo trutta*)[J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2010, 19(2): 290-299.
- [45] Bayse S M, McCormick S D, Castro-Santos T. How lipid content and temperature affect American shad (*Alosa sapidissima*) attempt rate and sprint swimming: implications for overcoming migration barriers[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2019, 76(12): 2235-2244.
- [46] 张先炳, 胡亚萍, 杨威, 等. 水温对淡水温水性鱼类生命活动的影响 [J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(4): 117-122.
- Zhang X B, Hu Y P, Yang W, *et al.* Effect of water temperature on the life activities of temperate freshwater fish[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(4): 117-122 (in Chinese).
- [47] 曾本和, 张怵怵, 牟振波, 等. 3 种西藏土著鱼类幼鱼水温耐受性的初步研究 [J]. *水产科学*, 2019, 38(1): 115-118.
- Zeng B H, Zhang B B, Mu Z B, *et al.* Tolerance of juveniles of three species native fishes in Tibet to water temperature[J]. *Fisheries Science*, 2019, 38(1): 115-118 (in Chinese).

A preliminary study on the acoustic deterrence system at Xianghe fishway in Xiang River, a tributary of the Yarlung Zangbo River

LI Jiaxin^{1,2}, LI Xiaobing³, BAI Yanqin^{2,4}, SHI Xiaotao^{2,4}, ZHANG Zhan⁵, NIMA Danzeng⁵,
DA Wa⁵, YANG Ji^{2,4}, LI Xinyu^{2,4}, SUN Pan^{2,4}, WANG Yan⁶, LIU Guoyong^{2,4*}

(1. College of Biological and Pharmaceutical Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei International Science and Technology Cooperation Base of fish Passage,
China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China ;

4. College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China ;

5. Tibet Water Conservancy and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Lhasa 850000, China;

6. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Acoustic deterrence system (ADS) are pivotal for fish attraction and protection, holding considerable value in fish conservation efforts. Despite this, Chinese research on ADS has predominantly centered on identifying sounds sensitive to fish in laboratory settings, with a dearth of practical engineering studies. This study aimed to determine if sound-driven fish technology could augment fish passage in field conditions. Underwater speakers were strategically positioned at upstream river channel near the entrance of fishway 2# in the Xianghe River, a Yarlung Zangbo River tributary, broadcasting alligator sinensis predator sounds (*Alligator sinensis*) on a continuous 24-hour loop. The negative phonotaxis behavior of target fish species (*Schizopygopsis younghusbandi*; *Ptychobarbus dipogon* and *Triplophysa stoliczkai*) was monitored as they traversed the Xianghe River's hydrological hub, employing a Passive Integrated Transponder (PIT) system. To account for the influence of hydrological and environmental factors on this behavior, a multiple-factor logistic regression model was developed. The optimal model was selected based on Akaike Information Criterion (AIC), pinpointing the critical factors influencing fish negative phonotaxis. Findings indicated that: ① the experimental group's fishway entry rate significantly exceeded that of the control group ($P < 0.05$); ② sound exposure and the discharge at fishway entrance 2# were pivotal in affecting fishway passage rate ($P < 0.05$); ③ post-sound activation, the entry rates for *S. younghusbandi* and *P. dipogon* markedly surpassed that of *T. stoliczkai* ($P < 0.05$); ④ during the study, the flow rate at the fishway entrance 2# between 0.81-1.32 m/s, with a negative correlation observed between flow rate and fishway passage rate ($P = 0.007$). Excessive flow rate were found to diminish fishway passage rates. decreased with the increase of fishway flow rate. This research demonstrates that ADS can deter fish from hazardous zones like power station tailwaters while enhancing the likelihood of fish entering fishways in practical engineering applications. This study seeks to offer scientific foundation and reference for the engineering implementation of ADS and the refinement of ecological dispatching at hydroelectric stations.

Key words: acoustic deterrence system; negative phonotaxis behavior; AIC; Logistic model; *Alligator sinensis* hissing; Xianghe Dam; Yarlung Zangbo River

Corresponding author: LIU Guoyong. E-mail: fishlab@163.com

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (52279069); Innovative Research Group Program of Natural Science Foundation of Hubei Province (2023AFA005)