

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20230316001

http://www.yykxjz.cn/

何晨睿, 李晓兵, 达瓦, 尼玛旦增, 张占, 王艳, 占慧芬, 刘媛媛, 胡晓, 石小涛, 刘国勇. 不同声音对草鱼幼鱼负趋音性行为反应影响研究. 渔业科学进展, 2024, 45(4): 86–96

HE C R, LI X B, DA W, NIMA D Z, ZHANG Z, WANG Y, ZHAN H F, LIU Y Y, HU X, SHI X T, LIU G Y. The negative phonotactic responses of juvenile grass carp *Ctenopharyngodon idellus* subjected to different sounds. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(4): 86–96

不同声音对草鱼幼鱼负趋音性行为反应影响研究*

何晨睿^{1,2} 李晓兵³ 达瓦⁴ 尼玛旦增⁴ 张占⁴ 王艳⁵
占慧芬^{1,2} 刘媛媛^{1,2} 胡晓^{1,2} 石小涛^{1,2} 刘国勇^{1,2①}

(1. 三峡大学水利与环境学院 湖北 宜昌 443002; 2. 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. 西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院
西藏 拉萨 850000; 5. 三峡大学土木与建筑学院 湖北 宜昌 443002)

摘要 声驱鱼技术作为辅助过鱼措施之一,承担着保证鱼类洄游顺利通过过鱼设施,继而保护鱼类资源和恢复河流连通性的重要作用。本研究采用交替播音的形式,以草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)幼鱼为研究对象进行负趋音性实验,旨在探究草鱼幼鱼面对不同声音的行为反应。实验水槽(3.6 m×1.1 m×1.0 m)布置于下牢溪周围水域,平均水深为0.5 m,平均流速为0.06 m/s。实验使用1种单频音(1 000 Hz)和5种复杂音(鱼游动声、引擎声、短吻鳄叫声、打桩声和游艇声),声压级(sound pressure level)为(117.69±2.77) dB re 1 μPa,对照组为未播放声音时草鱼的行为反应数据。结果显示,播放复杂音时,草鱼的反应次数、趋音速度、运动时间比均显著高于单频音和对照组($P<0.001$),草鱼的初次反应时间、平均反应时间均显著低于单频音和对照组($P<0.001$);复杂音中,受到游艇声刺激的草鱼反应次数和趋音速度最大,受到鱼游动声刺激的草鱼反应次数、趋音速度最小;复杂音中,受到游艇声刺激的草鱼初次反应时间最短,为(23.40±5.13) s;受到引擎声刺激的草鱼初次反应时间最长,为(146.00±7.82) s,显著低于其他复杂音($P<0.05$);受到游艇声和打桩声刺激的草鱼平均反应时间最短,分别为(26.52±3.01) s和(28.76±4.07) s;受到鱼游动声刺激的草鱼平均反应时间最长,为(64.76±17.82) s;复杂音中,受到鱼游动声刺激的草鱼运动时间比最高,为(98.47±0.48)%;受到引擎声刺激的草鱼运动时间比最低,为(94.58±0.54)%;播放单频音时,草鱼的反应次数、初次反应时间、平均反应时间、运动时间比均与对照组无显著差异($P>0.05$)。本研究表明,5种复杂音(鱼游动声、引擎声、短吻鳄叫声、打桩声和游艇声)对草鱼幼鱼具有驱赶效果。本研究在丰富鱼类负趋音性研究的同时,为实际工程中声驱鱼辅助过鱼设施的设计和优化提供了科学依据。

关键词 负趋音性; 草鱼; 声驱鱼技术; 开放水域

中图分类号 S917 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2024)04-0086-11

* 国家自然科学基金(52179070; 52279069)和湖北省自然科学基金计划创新群体项目(2023AFA005)共同资助。何晨睿, E-mail: 702067534@qq.com

① 通信作者: 刘国勇, 教授, E-mail: 278113027@qq.com

收稿日期: 2023-03-16, 收修改稿日期: 2023-05-09

水利工程的兴建不仅满足发展清洁能源和促进可持续发展的要求,而且能够解决兼顾防洪、灌溉、发电、航运以及供水等多方面关系国计民生的问题。而随着国家对生态环境关注度的不断提高,水利工程被要求以绿色的原则来建设和发展。只有合理地使用和保护水资源,将经济效益和生态效益有机结合起来,才能满足社会和广大人民群众对水利工程的需求,实现人与自然的和谐发展。为了早日实现这一愿景,关于水利工程对生态环境所带来影响的相关研究日益为人们所重视(陈求稳等, 2020)。为缓解水利工程对环境产生的不利影响,修建过鱼设施成为恢复河流生态系统、保护鱼类资源的重要生态补偿工程(Stone, 2016)。但在实际运行过程中,过鱼设施的鱼类洄游通过效率依旧不甚理想。声驱鱼技术作为辅助过鱼措施和非物理屏障,基于声音信号阻止或调节鱼类行为,目的是定向驱导鱼类远离水电站进水口、溢流坝、船闸等危险区域(Ruebush, 2011),顺利找到鱼道的正确入口(魏园杰等, 2020),有助于提高过鱼设施的过鱼效率。声音、光照、电流等非物理屏障基于鱼类感官(听觉、视觉、嗅觉或侧线)和运动系统被设计并应用(Noatch *et al.*, 2012),相较于物理屏障,非物理屏障对生态环境和航道运行影响更小,对非物理屏障进行效果评估研究具有重要意义(Kelly *et al.*, 2011)。

鱼类能够接收一定响度、频率、声压的声音信号,在受到具有信号意义的声音刺激后,鱼类会产生各种各样的行为反应——趋音性。趋音性,分为正趋音性和负趋音性。鱼类听到声音后靠近声源的行为反应,称为正趋音性,反之为负趋音性(刘志雄等, 2019)。值得注意的是,鱼类并非对所有声音都出现负趋音性。因此,筛选出能够让鱼类产生负趋音性的声音,并对这些声音的有效性进行验证和效果评价一直是声驱鱼技术的关键。

本研究选取 1 种单频音和 5 种复杂音,把草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)在 6 种声音影响下的行为反应与不播放声音的对照组进行对比,筛选出有效的负趋音。所用单频音的频率为 1 000 Hz。大多数鱼类对 300~3 000 Hz 的噪音较为敏感,研究表明,1 000 Hz 高于草鱼的听力阈值(王明云等, 2021; 邢彬彬等, 2018),能够对草鱼行为产生影响。鱼游动声和短吻鳄(*Alligator sinensis*)叫声均为生物发声,其中,鱼游动声为同类所发声,短吻鳄叫声为捕食者所发声。根据声信号的不同,鱼类面对同类所发声会产生不同的行为反应。例如,繁殖期间毒棘豹蟾鱼(*Opsanus tau*)的咕噜声能够震慑雄性同类(Mensing,

2014);新西兰大眼鲷(*Espempheris adspersa*)会因为同类的声音汇聚在一起(van Oosterom *et al.*, 2016)。而鱼类面对捕食者的声音往往会尽快逃离声源。例如,大西洋鲱(*Clupea harengus*)受到虎鲸(*Orcinus orca*)进食声音刺激后,出现下潜行为,并且游泳速度加快(Doksæter *et al.*, 2009)。引擎声、游艇声和打桩声属于典型的高强度人为噪声,被一些研究证实能够对鱼类行为产生影响。Murchy 等(2017)利用 0.06~10 kHz 船舶噪声有效驱赶了鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*Aristichthys nobilis*);在 Nedelec 等(2016)的相关研究中,游艇声加剧了三斑圆雀鲷(*Dascyllus trimaculatus*)的躲避行为。Hawkins 等(2014)研究发现,受到打桩声刺激的黍鲱(*Sprattus sprattus*)出现逃离声源的现象。我国对声音驱赶鱼类已有较为系统的研究,但仍缺乏鱼类负趋音性行为反应及特征的具体数据。

不同种类的鱼对声音刺激的反应也存在巨大差异(Slabbekoorn *et al.*, 2010)。草鱼属于骨鲮总目(Ostariophysi),是我国重要的淡水养殖鱼类。与非骨鲮鱼类相比,骨鲮鱼类(鲮通过韦伯氏器与内耳相连)对声音刺激反应更加敏感(胡运桑等, 2013)。张沛东等(2005)研究了草鱼在声音刺激下对八字门的行为反应以及移动声源对其的诱集效果(张沛东等, 2004);姜昭阳等(2008)研究了草鱼暴露在 400 Hz 矩形波连续音刺激时对模型网的行为反应;王明云等(2021)研究了摄食声刺激下草鱼幼鱼的行为特征。以上研究表明,草鱼具备接收不同声音信号并对此做出相应行为反应的能力。

目前,声驱鱼技术的有效性已被证实,但实际工程中的相关应用却不多。造成这种问题的原因,一方面在于理论知识尚不全面,另一方面则是理论研究与实际工程存在差距。国内外对鱼类负趋音性的相关研究主要集中于实验室,基于天然开放水域条件下开展的详细研究尚不充足,亟需更多野外验证实验。为此,本研究以草鱼作为对象,于天然开放水体下牢溪(湖北宜昌)中进行负趋音性实验,通过观察反应次数、初次反应时间、平均反应时间、趋音速度、运动时间比等指标研究其负趋音性行为。在填补鱼类负趋音性理论知识的同时,为设计者和管理者布置声驱鱼方案提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 实验场地

实验选址于湖北省宜昌市夷陵区的下牢溪水域(30°46'N~30°58'N, 111°10'E~111°18'E)。下牢溪隶属

长江,于长江中下游分界线处分流,干流汇入葛洲坝水库。下牢溪经牛坪垭、白马岭、姜家庙、南津关等地注入长江,全长 26.7 km。经实地勘察,实验场地定于姜家庙附近水域($30^{\circ}48'17.57''\text{N}$, $11^{\circ}15'16.45''\text{E}$)。该水域地势平坦、水质清澈,平均水深为 0.5 m,平均流速为 0.06 m/s。

1.2 实验用鱼

实验所用草鱼取自湖北省宜都市鱼种场,平均体长为 (14.88 ± 1.09) cm,平均叉长为 (12.46 ± 1.21) cm,平均体重为 (44.58 ± 7.28) g,总数约为 200 条。实验期间,草鱼于方形网箱中暂养,网箱四角系于金属支架,拉直网箱并保持稳定的六面体形状,保证草鱼活动空间的同时防止其跳脱。暂养地设置在实验场地上游 50 m 的同片水域中,水温平均为 $(23\pm 1)^{\circ}\text{C}$,溶氧量 $>8\text{ mg/L}$, $\text{pH}=7.2\sim 7.3$ 。实验过程中实验鱼不重复使用,避免其对实验产生适应性而影响实验结果。

1.3 实验装置

实验装置由室外水槽、声音播放装置和视频录制设备 3 部分组成。水槽整体尺寸为 $5\text{ m}\times 1.13\text{ m}\times 1\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),其中,实验区域长为 3.6 m、宽为 1.1 m。水槽长边与水流方向平行,前、后和底部边壁为玻璃纤维材料,左、右两侧设置拦网防止草鱼游离,槽内与周围水体相连。声音播放系统由笔记本电脑(LAPTOP-AG1RP69D, 华为)、功放(XLS-1000 amplifier, Crown Audio)和 2 个水下扬声器(UWS-045, 广州千叶水科技有限公司)组成。实验过程中,水下扬声器距离水面 0.15 m,距水槽一端 0.6 m,距侧壁 0.5 m (图 1)。水下扬声器完全浸没于水中,扬声器与功放相连,由功放手动控制水下扬声器的开启与关闭,并调试播放的声压大小。海康威视摄像头(DS-3WF01C-2NE)作为视频录制设备从水槽正上方对实验进行全程记录。

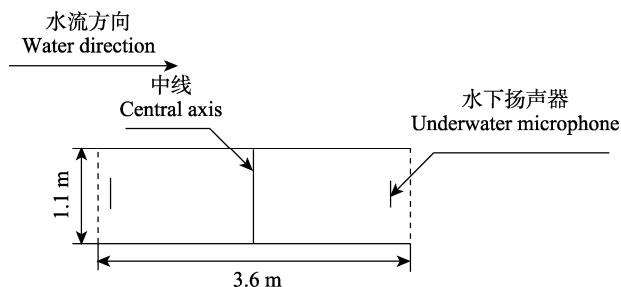


图 1 实验装置简易俯视图

Fig.1 Experiment setup (top view)

1.4 实验声音

实验所用声音类型和录制过程如下:

(1)单频音:频率为 1 000 Hz。单频音通过 Cool Edit Pro 2.1 软件合成。

(2)5 种复杂音:鱼游动声、短吻鳄叫声、引擎声、游艇声和打桩声。复杂音由水听计录制(Reson TC 4032, Slingerup, 丹麦),并运用 Cool Edit Pro 2.1 软件去除录制过程中产生的杂音。其中,鱼游动声录制地点为宜昌市三峡大学实验室的玻璃纤维水槽,水深 50 cm,水听计悬于水下 10 cm 处,目标鱼为草鱼鱼群;引擎声和游艇声的录制地点位于清江隔河岩大坝坝前 1 000 m,渔船开启引擎,录制者手持水听计从水下录制引擎声,游艇与渔船相距 10~15 m,游艇声录制时游艇速度为 40~45 km/h;打桩声录制地点为宜昌市西陵区某桥梁施工现场;短吻鳄叫声录制地点为重庆鳄鱼中心,水听计距离短吻鳄 3 m 左右。水下声音测量时,将装有防撞击装置的水听器完全浸没并悬垂稳定于水中,防止水流扰动和鱼类直接撞击。

(3)对照组:本研究对照组设置为未播放声音时草鱼的行为反应数据。其中,由于对照组的草鱼未发生负趋音反应,所以在统计反应次数、初次反应时间和平均反应时间时,无对照组数据。对照组的趋音速度,取自未播放声音时草鱼的正常游泳速度。对照组的运动时间比,取自未播放声音时草鱼处于运动状态的累计时间与总时间的比值。

声音频谱图经由 Adobe Audition 2019 软件获取相关数据,由 Origin 2022 软件绘制而成(图 2)。频谱图数据采用快速傅里叶(FFT)确定,采样点为 2084,采样率为 44.1 kHz。为得到 6 种声音的水下分布情况,将水槽的横轴以 30 cm 为间距分为 13 个测量点,纵轴以 10 cm 为间距分成 12 个测量点,总计 156 个测量点,由水听计侦听、声级计读取声音大小,相对声压用平均值表示,由 Origin 2022 软件绘制声场图(图 3)。

1.5 行为定义

根据受到声刺激草鱼的行为反应,将鱼群在播音期间的响应行为进行以下定义:

(1)负趋音反应:定义为扬声器开启后 15 s 内草鱼远离声源,并在 30 s 内游过水槽中线。草鱼在规定时间内游过中线的瞬间,即完成一次负趋音反应。

(2)反应时间:定义为从扬声器开启到草鱼完成负趋音反应之间的时间段。该时间段内草鱼的状态,称为反应状态。

(3)连续反应: 定义为草鱼连续出现 2 次及以上负趋音反应的情况。

鱼群反应时间超过 30 s 或不播音时鱼群游过中线的行为不计入反应次数。其他行为特征描述如表 1 所示。

1.6 实验方法

1.6.1 实验步骤 从暂养网箱中随机捞取 5 尾草

鱼放入水槽, 适应 2 h 后开始实验。实验步骤如下:
(1)首先, 观察草鱼鱼群所在位置, 开启靠近鱼群一侧的扬声器, 根据草鱼反应进行下一步。
(2)若草鱼出现负趋音反应, 立即关闭该侧扬声器并打开另外一侧的扬声器; 若草鱼未出现负趋音反应, 则在播放声音 30 s 后停止播音, 让草鱼休息 2 min 后重复步骤 1。

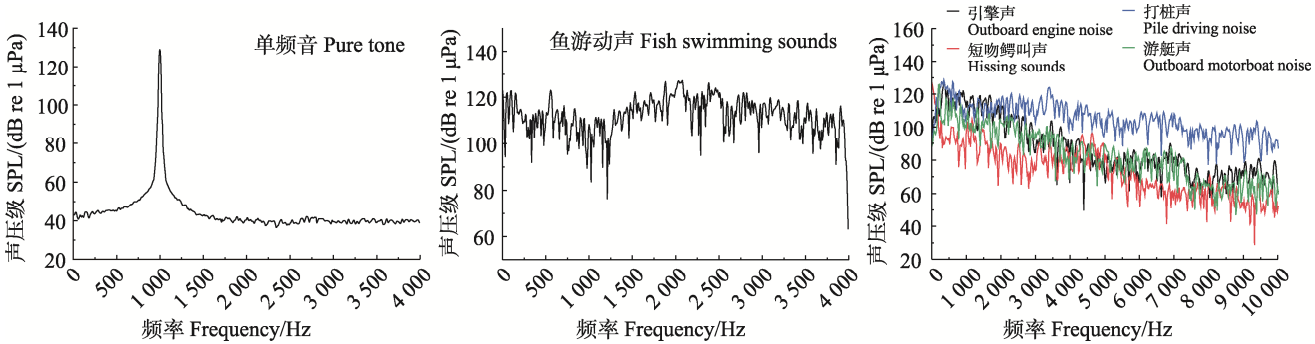


图 2 声音频谱图
Fig.2 The power spectrum of sounds

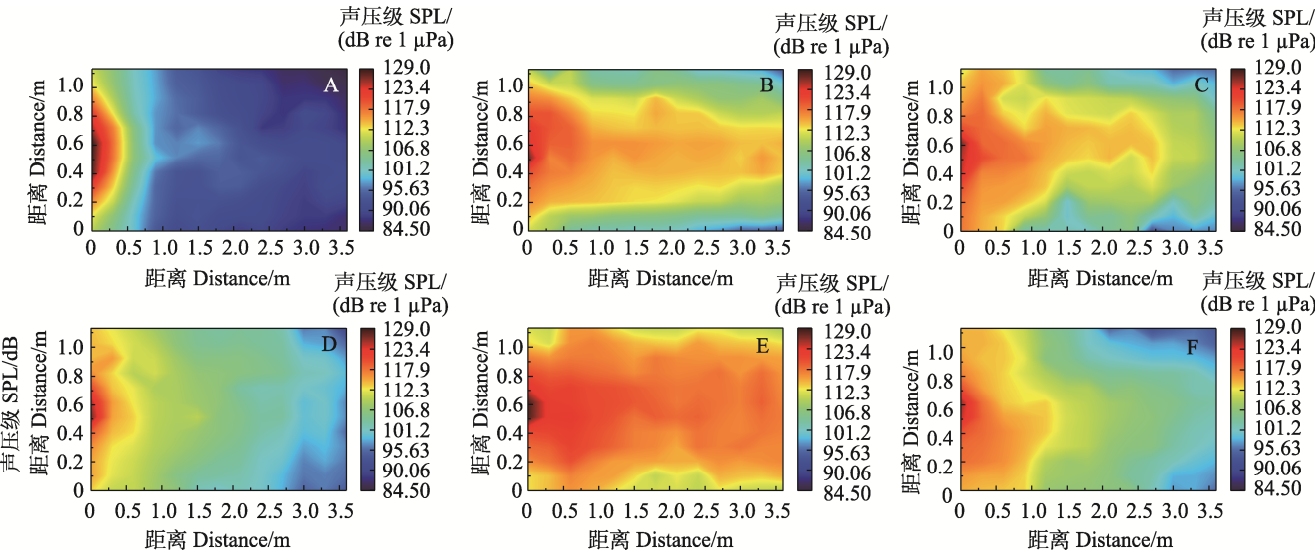


图 3 声场图
Fig.3 Sound field figure

A: 单频音; B: 鱼游动声; C: 引擎声; D: 短吻鳄叫声; E: 打桩声; F: 游艇声
A: Pure tone; B: Fish swimming sounds; C: Outboard engine noise; D: Hissing sounds;
E: Pile driving noise; F: Outboard motorboat noise

表 1 行为特征指标描述

Tab.1 The description of behavioral characteristics

参数 Parameters	描述 Descriptions
反应次数 Times of response	草鱼产生负趋音反应的累计次数
趋音速度 Maximum swimming speed towards different sound/(cm/s)	草鱼处于负趋音反应状态时的最大游泳速度
初次反应时间 First reaction time/s	草鱼首次产生负趋音反应的反应时间
平均反应时间 Average reaction time/s	草鱼处于负趋音反应状态的累计时间与反应次数的比值
运动时间比 Ratio of exercise time/%	草鱼处于运动状态的累计时间与总时间的比值

(3)若草鱼继续出现负趋音反应,则重复步骤 1,即交替开启两侧扬声器,通过不断改变声源驱使草鱼继续出现负趋音反应;若草鱼停止负趋音反应,则中止播音,让草鱼休息 2 min 后重复步骤 1。每次实验时长为 10 min,实验开始 10 min 后,无论草鱼对声音反应与否都终止播音。

实验共 7 组,每组实验重复 5 次,其中,对照组不播放声音。整个过程无人员走动和其他声音干扰,避免与实验无关的因素对实验结果产生影响。

1.6.2 数据处理 实验录制完毕后,运用 logger pro 3.13 软件进行逐帧打点,然后使用像素矢量位移优化法得到草鱼的游泳速度。数据处理采用实验视频统计方法,主要参考 Buchanan 等(2006)的主成分分析图像处理法(principal component analysis, PCA)进行鱼体识别,最终以每帧的像素矢量变化量(位移与帧数)和指定区域内鱼群个体数量作为统计量分析。具体方法如下:

首先,运用 logger pro 3.13 软件将 1 min 实验视频转换成 1 500 帧图片,然后进行鱼体识别 PCA 图像处理,再逐帧统计分析实验鱼的运动轨迹和变化时间,最后,根据通过 logger pro 3.13 软件所统计的实验鱼像素矢量位移坐标数据,利用下列公式计算实验鱼的实际运动位移距离和游泳速度。

两点之间像素矢量位移转换实际位移距离,公式为:

$$D = \sum_{i=1}^n \sqrt{[(x_i - x_{i+1}) \cdot k_x]^2}$$

式中, x_i 、 y_i 为 logger pro 3.13 软件像素点坐标值; i 为起始帧数; n 为完成运动位移所用的帧数; k_x 、 k_y 为实际距离修正值, $k_x=1.469$, $k_y=0.38$; D 为实际位移距离,单位为 cm。

游泳速度按照以下公式计算:

$$V = \frac{D \cdot f_{ps}}{f_i}$$

式中, D 为实验鱼的实际位移距离; f_{ps} 为视频每秒传输帧数; f_i 为完成矢量位移所用帧数; V 为游泳速度,单位为 cm/s。

每组实验草鱼的反应次数通过所录视频观察并记录。统计值以平均值±标准差(Mean±SD)表示。统计整理后的数据采用 Excel 和 SPSS Statistics 24 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),检验单频音(1 000 Hz)和复杂音(鱼游动声、引擎声、短吻鳄叫声、游艇声和打桩声)对空白对照组中草鱼的行为指标及分布的影响, $P<0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 反应次数

实验使用的单频音和复杂音声压级控制在 (117.69 ± 2.77) dB re $1 \mu\text{Pa}$, 对照组为未播放声音时草鱼的行为反应数据。播放单频音时,95%的草鱼对单频音没有反应,一部分静止不动,另一部分在该侧扬声器周围来回游动。单频音环境下,草鱼的反应次数为 (1.60 ± 0.75) 次,连续反应的次数为 0。复杂音环境下,草鱼的反应次数与单频音存在显著差异($F=41.5$, $P<0.001$),90%的草鱼出现连续反应。鱼游动声、引擎声、短吻鳄叫声、打桩声和游艇声 5 种复杂音环境下草鱼的反应次数分别为 (15.20 ± 2.06) 、 (26.20 ± 1.77) 、 (23.40 ± 1.69) 、 (32.00 ± 2.30) 和 (35.60 ± 2.46) 次(图 4)。复杂音中,受到游艇声刺激的草鱼反应次数最高,受到鱼游动声刺激的草鱼反应次数显著低于其他复杂音($P<0.05$)。

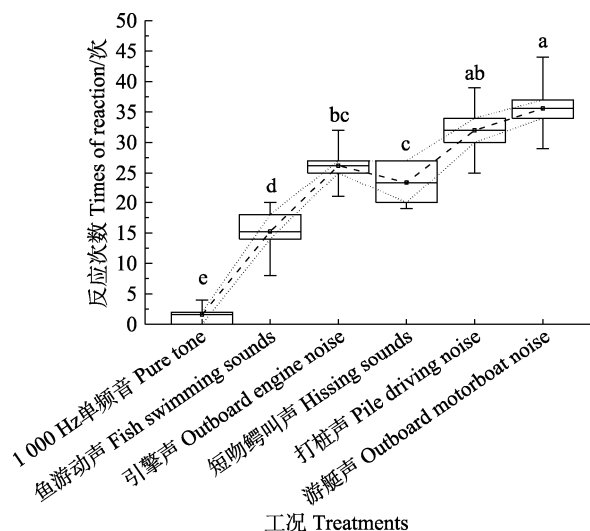


图 4 不同声音下草鱼的反应次数

Fig.4 The responses of *C. idellus* under different sounds

不同字母表示差异显著($P<0.05$);下同。

Different letters on the column indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

2.2 初次反应时间和平均反应时间

复杂音环境下草鱼的初次反应时间($F=31.83$, $P<0.001$)和平均反应时间($F=149.92$, $P<0.001$)均显著低于单频音。如图 5 所示,复杂音中,受到游艇声刺激的草鱼初次反应时间最短,为 (23.40 ± 5.13) s;受到引擎声刺激的草鱼初次反应时间最长,为 (146.00 ± 7.82) s,显著低于其他复杂音($P<0.05$)。如图 6 所示,

受到游艇声和打桩声刺激的草鱼平均反应时间最短, 分别为 (26.52 ± 3.01) s 和 (28.76 ± 4.07) s; 受到鱼游动声刺激的草鱼平均反应时间最长, 为 (64.76 ± 17.82) s。

2.3 趋音速度

如图7所示, 不播放任何声音时草鱼的游泳速度为 (11.60 ± 1.25) cm/s。单频音环境下, 草鱼趋音速度为 (12.19 ± 1.43) cm/s, 与对照组不存在显著差异($P > 0.05$)。复杂音播放期间, 95%的草鱼出现游泳速度加快、远离声源游过中线的行为, 趋音速度显著高于对照组和单频音($F = 39.75$, $P < 0.001$)。复杂音中, 受到游艇声刺激的草鱼趋音速度最大, 受到鱼游动声刺激的草鱼

趋音速度最小。在鱼游动声、引擎声、短吻鳄叫声、打桩声和游艇声5种复杂音环境下, 草鱼的趋音速度分别为 (40.26 ± 3.69) 、 (42.00 ± 3.72) 、 (47.69 ± 3.72) 、 (47.54 ± 1.95) 和 (53.60 ± 2.02) cm/s。

2.4 运动时间比

如图8所示, 不播放任何声音时, 草鱼的运动时间比为 $(74.25 \pm 2.45)\%$ 。单频音环境下, 草鱼的运动时间比为 $(75.22 \pm 3.23)\%$, 与对照组无显著差异($P > 0.05$)。复杂音环境下, 草鱼的平均运动时间比达到97.53%, 显著高于对照组和单频音($F = 50.36$, $P < 0.001$)。复杂音中, 受到鱼游动声刺激的草鱼运动时间比最高, 为

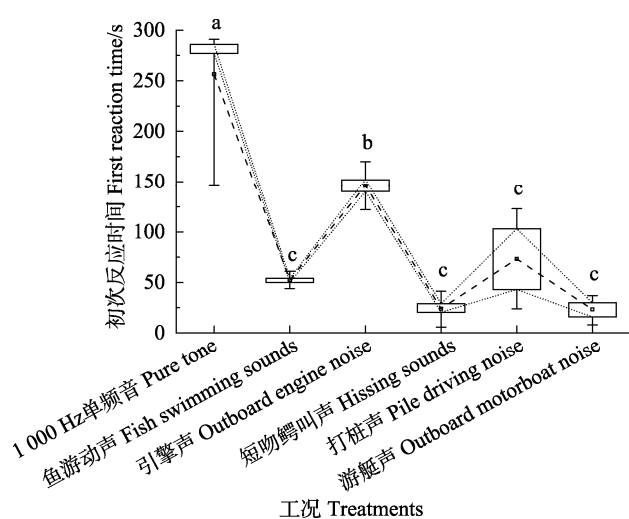


图5 不同声音下草鱼的初次反应时间
Fig.5 The first reaction time of *C. idellus* under different sounds

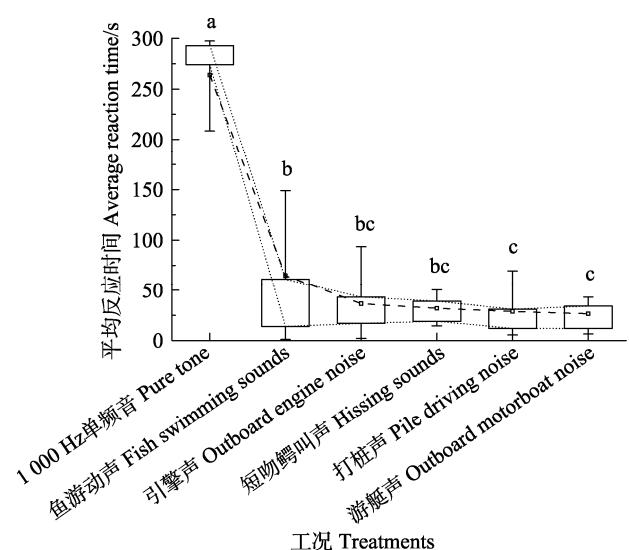


图6 不同声音下草鱼的平均反应时间
Fig.6 The average reaction time of *C. idellus* under different sounds

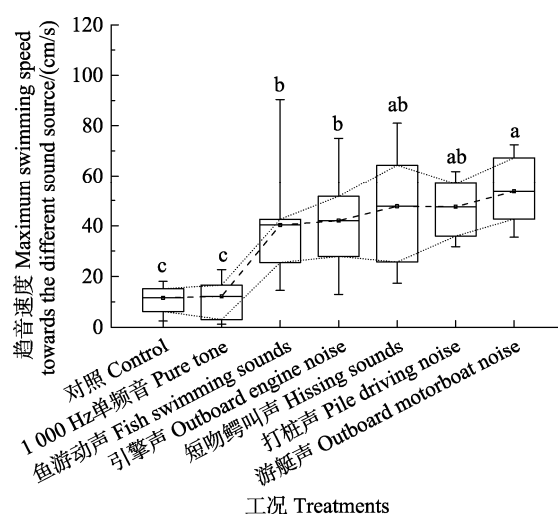


图7 不同声音下草鱼的趋音速度
Fig.7 The maximum swimming speed of *C. idellus* under different sounds

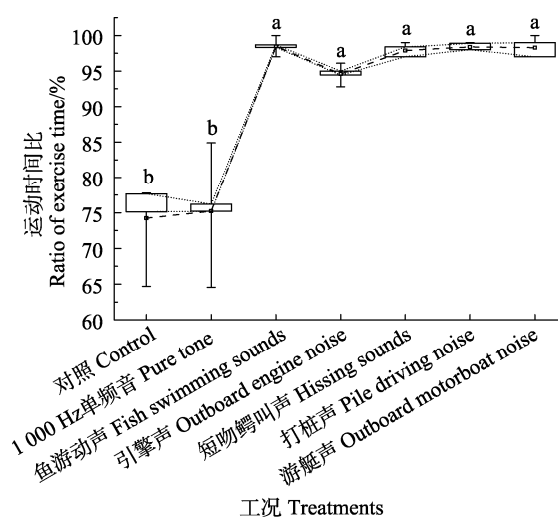


图8 不同声音下草鱼的运动时间比
Fig.8 The ratio of exercise time of *C. idellus* under different sounds

(98.47±0.48)%;受到引擎声刺激的草鱼运动时间比最低,为(94.58±0.54)%。鱼游动声、引擎声、短吻鳄叫声、打桩声和游艇声 5 种复杂音之间的运动时间比无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 单频音对草鱼负趋音性的影响

Vetter 等(2015)探究鲢鱼负趋音性时,分别使用 500、1 000、1 500 和 2 000 Hz 4 种单频音对鲢鱼进行刺激,只有不到 1%的鲢鱼远离声源并发生负趋音反应。Liu 等(2019)的研究也表明,单频音对草鱼驱赶效果不佳,85%的草鱼没有负趋音反应。本研究与以上结论吻合,1 000 Hz 单频音环境下,95%的草鱼未在规定时间内远离声源,趋音速度、运动时间比与对照组无显著差异。根据单频音和复杂音频谱图的对比(图 2),单频音的频率变化较复杂音更单一、范围更窄。从空间分布来看,本研究是通过草鱼在实验区域横向位移的变化分析其负趋音性。根据单频音与复杂音声场对比(图 3),单频音环境中,声强的横向衰减较复杂音更快,说明相较于复杂音,草鱼在远离声源时更容易摆脱单频音对其的影响。以往研究证明,相比频率和强度保持不变的声音,鱼类更倾向于频率和强度不断变化的声音(Vetter *et al.*, 2016)。另外,鱼类具有声音适应能力,鱼类听觉能够迅速适应同频率和声强的声音,且长期处于这种环境的鱼类听力会明显下降,最终表现为无趋音性(中性反应)。单频音对鱼类听力的具体影响还需要长期实验进行验证。

3.2 复杂音对草鱼负趋音性的影响

负趋音性的主要特征是鱼类在听到声音后产生远离声源的行为。本研究中,受到复杂音刺激的 30 s 内草鱼远离声源的次数显著高于对照组和单频音组(图 4)。值得注意的是,受到引擎声刺激的草鱼初次反应时间和平均反应时间分别为(146.00±7.82) s 和 (36.46±5.36) s,这说明随着负趋音反应的发生,引擎声环境下的草鱼反应时间明显减少,打桩声同样出现该现象。Murphy 等(2016)利用船舶噪声驱赶鳙鱼和鲢鱼的研究中,认为这是鱼类逐渐把躲避声音刺激与自身位移联系起来的反应。负趋音性的另一个行为特征是鱼类在听到声音后游泳速度的上升。林听听等(2020)在不同声压级船舶噪声对大黄鱼(*Larimichthys crocea*)幼鱼影响的研究中发现,超过 60 dB 的船舶噪声会加快大黄鱼幼鱼的游泳速度。Hawkins 等(2014)模拟打桩声对鲢鱼进行刺激,鲢鱼群在播音后立即

向各个方向扩散。本研究中,复杂音环境下,草鱼的趋音速度(图 7)和运动时间比(图 8)均显著高于对照组和单频音组,这说明复杂音使其游泳速度上升、静止时间减少、游动更频繁。以上结果表明,5 种复杂音(鱼游动声、引擎声、短吻鳄叫声、打桩声和游艇声)对草鱼鱼群具有驱赶效果。

3.3 野外半封闭水槽实验和室内水槽实验的差异性

Qin 等(2020)研究发现,拉萨裸裂尻鱼(*Schizopygopsis younghusbandi*)在 132.5 dB 短吻鳄叫声刺激下反应次数和趋音速度显著高于对照组,与本研究结论吻合。但相同声强的游艇声、打桩声环境下,90%的拉萨裸裂尻鱼未表现出明显负趋音性,与本研究结论存在差异。造成这种差异的原因,除了鱼种不同,还可能与水流和实验场地的选取有关。Ladich 等(2013)研究指出,室内环境和天然环境中声音的质子运动(振动)方式存在差异,相较于室内环境,天然水体中鱼类更偏好依靠质子运动而不仅仅是声压接收声音信号。另外,野外环境和室内环境下的声场分布同样出现差异性。Qin 等(2020)在静水环境下的声场图显示,其声场整体呈条状分布,声强大小沿横向递减,纵向声强几乎没有衰减。而本研究在动水环境中,声场以声源为中心呈扇形递减。与 Qin 等(2020)的声场图相比,本研究声强横向衰减(平行于水流方向)更缓慢,而纵向衰减(垂直于水流方向)更迅速。声场横向分布的差异性,主要原因可能是水流对其的影响,但具体作用机制缺乏文献研究。声场纵向分布的差异性,可能是室内环境下,声场受边壁效应的影响较大,而本研究在野外所用的水槽两侧不是固体边壁而是拦网,与天然水体连通,能够缓解边壁效应对声场产生的影响。由此可判断,室外天然水体的声场规律与室内静水环境存在差异,环境差异导致的声场差异可能是鱼类行为变化的原因。本研究仍然有不足之处,半封闭的水槽无法完全消除边壁效应。之所以不选择完全开放的网箱作为实验装置,是因为水槽能够更清晰地观测草鱼行为指标的变化情况。亟需更多野外实验对声场变化和鱼类行为反应进行深入研究。

3.4 其他行为的可能机制

除了声音对鱼类的影响以外,水流被认为是天然河道中影响鱼类行为的关键环境因子(Castro-Santos *et al.*, 2010; 齐亮等, 2012)。本研究中,声音传播方向与水流方向的角度会影响草鱼的行为反应。当声音传播方向与水流方向相同时,草鱼的反应时间比与水流方向相反时更短,播放单频音时平均减少 0.47 s,播

放复杂音时平均减少 3.6 s。因此,在实际工程中,声源设置若与水流方向相结合,声驱鱼效率可能进一步提高。但是,目前国内尚无声音与水流耦合驱鱼的相关文献,因此,亟需进行该方面研究。集群行为同样能够对鱼类负趋音性行为产生影响。有研究表明,鱼类的集群行为能够在其游泳过程中节省能量,并且影响其上溯行为(Hemelrijk *et al.*, 2015)。本研究中,往往鱼群中某条草鱼产生负趋音反应,其他草鱼会随之产生反应,这会提升该组的平均反应次数,说明集群行为可能对草鱼负趋音性产生推动作用。另外,为了最大程度地避免光照对鱼群的影响,本研究大多选择有云天气或阴天进行,防止实验区域出现大范围阴影。然而,还是观察到草鱼经常在水槽边壁 2~5 cm 的阴影中徘徊逗留,受到声音刺激后草鱼也喜欢沿着阴影远离声源,这种行为与鱼类偏好浅水阴影区域的习性一致。Murphy 等(2017)研究证明,在播音期间,鳙鱼(*Hypophthalmichthys nobilis*)的活动区域分布主要取决于声场,而不是阴影区域。关于草鱼对声音和阴影的偏好优先度则需要进一步的系统性研究。目前实验主要使用声音作为单一因素刺激鱼群,而现有研究证明,光照(Mc *et al.*, 2010; 王琼等, 2018)、气泡幕(Zielinski *et al.*, 2014)、电流(Johnson *et al.*, 2014)、化学物质和电磁(Robbins *et al.*, 2011)等其他非物理屏障同样能够有效驱赶鱼类。所以接下来的工作重点是如何将声音与其他非物理屏障结合,以进一步提高辅助驱鱼设施的运行效率。

参 考 文 献

- BUCHANAN A, FITZGIBBON A. Interactive feature tracking using K-D trees and dynamic programming. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. IEEE, 2006
- CASTRO-SANTOS T, LETCHER B H. Modeling migratory energetics of Connecticut River American shad (*Alosa sapidissima*): Implications for the conservation of an iteroparous anadromous fish. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2010, 67(5): 806–830
- CHEN Q W, ZHANG J Y, MO K L, *et al.* Effects of hydropower development on aquatic eco-environment and adaptive managements. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 793–810 [陈求稳, 张建云, 莫康乐, 等. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施. 水科学进展, 2020, 31(5): 793–810]
- DOKSÆTER L, GODØ O R, HANDEGARD N O, *et al.* Behavioral responses of herring (*Clupea harengus*) to 1–2 and 6–7 kHz sonar signals and killer whale feeding sounds. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 125(1): 554–564
- HAWKINS A D, ROBERTS L, CHEESMAN S. Responses of free-living coastal pelagic fish to impulsive sounds. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(5): 3101–3116
- HEMELRIJK C K, REID D A P, HILDENBRANDT H, *et al.* The increased efficiency of fish swimming in a school. Fish and Fisheries, 2015, 16(3): 511–521
- HU Y S, SHI X T, LIU D F, *et al.* Technology analysis and outlook for the sound guidance fish. Journal of Hydroecology, 2013, 34(4): 89–94 [胡运桑, 石小涛, 刘德富, 等. 声音导鱼技术的分析与展望. 水生生态学杂志, 2013, 34(4): 89–94]
- JIANG Z Y, ZHANG G S, YU J B, *et al.* Study of behavioral response of *Cyprinus carpio* and *Ctenopharyngodon idellus* to a model net by rectangular continuants of 400 Hz. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(1): 73–77 [姜昭阳, 张国胜, 于江波, 等. 鲤、草鱼在 400 Hz 矩形波连续音驯化下对模型网的行为反应研究. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(1): 73–77]
- JOHNSON N S, THOMPSON H T, HOLBROOK C, *et al.* Blocking and guiding adult sea lamprey with pulsed direct current from vertical electrodes. Fisheries Research, 2014, 150: 38–48
- KELLY A, ENGLE C, ARMSTRONG M, *et al.* History of introductions and governmental involvement in promoting the use of grass, silver, and bighead carps. In: CHAMPMAN D C, HOFF M H (ed). Invasive Asian Carps in North America, American Fisheries Society, Symposium 74, 2011, 163–174
- LADICH F, FAY R R. Auditory evoked potential audiometry in fish. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2013, 23(3): 317–364
- LIN T T, LIU X, WANG C B, *et al.* Effects of ship noise pressure level on swimming, feeding behaviors and immunophysiological indicators of *Larimichthys crocea* juveniles. Marine Fisheries, 2020, 42(1): 61–72 [林听听, 刘鑫, 王昌勃, 等. 船舶噪声声压级对大黄鱼幼鱼游泳、摄食行为及免疫生理指标的影响. 海洋渔业, 2020, 42(1): 61–72]
- 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*. Hydrobiologia, 2019, 836: 97–108
- 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. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(5): 42–48, 61 [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. 长江科学院院报, 2019, 36(5): 42–48, 61]
- MC S P, HOCUTT C H. Effects of turbidity on estuarine fish response to strobe lights. Journal of Applied Ichthyology, 2010, 3(3): 97–105
- MENSINGER A F. Disruptive communication: Stealth signaling

- in the toadfish. *Journal of Experimental Biology*, 2014, 217(3): 344–350
- MURCHY K A, CUPP A R, AMBERG J J, *et al.* Potential implications of acoustic stimuli as a non-physical barrier to silver carp and bighead carp. *Fisheries Management and Ecology*, 2017, 24(3): 208–216
- MURCHY K A, VETTER B J, BREY M K, *et al.* Not all carp are created equal: Impacts of broadband sound on common carp swimming behavior. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2016, 27(1): 010032
- NEDELEC S L, MILLS S C, LECCHINI D, *et al.* Repeated exposure to noise increases tolerance in a coral reef fish. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 428–436
- NOATCH M R, SUSKI C D. Non-physical barriers to deter fish movements. *Environmental Reviews*, 2012, 20: 1–12
- QI L, YANG Y, WANG Y, *et al.* Fish behavior characteristics in response to change of hydrodynamic environment. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(4): 438–445 [齐亮, 杨宇, 王悦, 等. 鱼类对水动力环境变化的行为响应特征. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(4): 438–445]
- 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. *Fisheries Management and Ecology*, 2020, 27(1): 10–19
- ROBBINS W D, PEDDEMORS V M, KENNELLY S J. Assessment of permanent magnets and electropositive metals to reduce the line-based capture of Galapagos sharks, *Carcharhinus galapagensis*. *Fisheries Research*, 2011, 109(1): 100–106
- RUEBUSH B C. *In-situ* tests of sound-bubble-strobe light barrier technologies to prevent range expansions of Asian carp. Master's Thesis of University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011
- SLABBEKOORN H, BOUTON N, OPZEELAND I V, *et al.* A noisy spring: The impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology and Evolution*, 2010, 25(7): 419–427
- STONE R. Conservation dam-building threatens Mekong fisheries. *Science*, 2016, 354: 1084–1085
- VAN OOSTEROM L, MONTGOMERY J C, JEFFS A G, *et al.* Evidence for contact calls in fish: Conspecific vocalisations and ambient soundscape influence group cohesion in a nocturnal species. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19098
- VETTER B J, MURCHY K A, CUPP A R, *et al.* Acoustical deterrence of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) to a broadband sound stimulus. *Journal of Great Lakes Research*, 2016, 43: 163–171
- VETTER B J, CUPP A R, FREDRICKS K T, *et al.* Acoustical deterrence of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*). *Biological Invasions*, 2015, 17(12): 3383–3392
- WANG M Y, SHEN X J, REN K Y, *et al.* The attractive effect of feeding sound to juvenile grass carp *Ctenopharyngodon idellus*. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45(1): 153–160 [王明云, 沈修俊, 任开元, 等. 摄食声对草鱼幼鱼的诱集作用. *水生生物学报*, 2021, 45(1): 153–160]
- WANG Q, LIN C Y, LUO J, *et al.* Phototaxis of individual and group *Hypophthalmichthys molitrix* in flowing and still water. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(5): 60–66 [王琼, 林晨宇, 罗佳, 等. 流水和静水条件下鲢幼鱼对不同强度光源的趋性研究. *水生态学杂志*, 2018, 39(5): 60–66]
- 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. *Technology Wind*, 2020(10): 1 [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. *科技风*, 2020(10): 1]
- XING B B, YIN L M, ZHANG G S, *et al.* Progress on the auditory characteristics of fish and their application. *Marine Fisheries*, 2018, 40(4): 495–503 [邢彬彬, 殷雷明, 张国胜, 等. 鱼类的听觉特性与应用研究进展. *海洋渔业*, 2018, 40(4): 495–503]
- ZHANG P D, ZHANG G S, ZHANG X M, *et al.* Behavioral response of common carp and grass carp to a character 八-shaped door by sound stimulus. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2005, 20(3): 212–217 [张沛东, 张国胜, 张秀梅, 等. 鲤、草鱼在声音刺激下对八字门的反应研究. *大连水产学院学报*, 2005, 20(3): 212–217]
- ZHANG P D, ZHANG G S, ZHANG X M. Attraction of common carp and grass carp by moving sound. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2004, 11(4): 339–343 [张沛东, 张国胜, 张秀梅. 移动声源对鲤、草鱼的诱引效果. *中国水产科学*, 2004, 11(4): 339–343]
- ZIELINSKI D P, VOLLER V R, SVENDSEN J C, *et al.* Laboratory experiments demonstrate that bubble curtains can effectively inhibit movement of common carp. *Ecological Engineering*, 2014, 67: 95–103

(编辑 马瑾艳)

The Negative Phonotactic Responses of Juvenile Grass Carp *Ctenopharyngodon idellus* Subjected to Different Sounds

HE Chenrui^{1,2}, LI Xiaobing³, DA Wa⁴, NIMA Danzeng⁴, ZHANG Zhan⁴, WANG Yan⁵,
ZHAN Huifen^{1,2}, LIU Yuanyuan^{1,2}, HU Xiao^{1,2}, SHI Xiaotao^{1,2}, LIU Guoyong^{1,2①}

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

2. Hubei International Science and Technology Cooperation Base of Fish Passage, Yichang 443002, China;

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

4. Tibet Water Conservancy and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Lasa 850000, China;

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

Abstract Acoustic fish driving technology, as an auxiliary fish passage measure and a non-physical barrier, is based on the use of sound signals to prevent or regulate fish behavior. The purpose of these techniques is to guide the fish away from dangerous areas, such as the water inlets of hydroelectric power stations, spillways, and ship locks, allowing them to easily locate the entrance to the fishway, which would help improve fish passage efficiency. Studying the negative phonotaxis behavior of fish is vital for establishing non-physical barriers using acoustic characteristics. However, there has been little research on verifying the effectiveness of acoustic fish deterrence technology in field environments. Therefore, this study used alternating sound playback to conduct negative phonotaxis experiments on grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) juveniles to explore their behavioral responses to different sounds. The experimental tank (3.6 m×1.1 m×1.0 m) was created in the waters of Xialao Creek in Yichang City, Hubei Province, with an average water depth of 0.5 m and an average flow rate of 0.06 m/s. The experiment used one single-frequency sound (1 000 Hz) and five complex sounds (fish swimming, engine, short-nosed crocodile call, pile driving, and yacht sounds), with a sound pressure level of (117.69±2.77) dB re 1 μPa. The effectiveness of acoustic fish-repellent technology has been proven, but there are only a few applications in practical engineering. On the one hand, the theoretical knowledge is not comprehensive, and on the other hand, there is a gap between theoretical research and practical engineering. Moreover, there are differences in proton movement (vibration) modes between indoor and natural environments. Compared with fish in an indoor environment, fish in natural waters tend to receive sound signals by proton movement rather than sound pressure. At the same time, the distribution of the sound field in natural and indoor environments also differs; thus, field experiments are necessary for the advancement of acoustic fish-repellent technology. Globally, studies on the negative phonotaxis of fish have mainly been conducted *in vitro*. Detailed studies using natural open water conditions are insufficient, and further field verification experiments are needed. Therefore, this study conducted experiments in natural open water, compared the sound field changes in the natural and indoor environments, and studied negative phonotaxis behavior by observing reaction time, initial reaction time, average reaction time, phonotaxis speed, movement time ratio, and other indicators. The results showed that when the complex sounds were played, the reaction times, tone trend speed and movement time ratio of grass carp were significantly higher than that of single tone and control group ($P<0.001$), and the initial reaction time and average reaction time of grass carp were significantly lower than that of single tone and control group ($P<0.001$). Among the complex sounds, the grass carp stimulated by the yacht sound had the largest response times

① Corresponding author: LIU Guoyong, E-mail: 278113027@qq.com

and speed, while the grass carp stimulated by the fish swimming sound had the smallest response times and speed. In the complex sound, the first response time of grass carp stimulated by yacht sound was the shortest, which was (23.40 ± 5.13) s. The first response time of grass carp stimulated by engine sound was (146.00 ± 7.82) s, which was significantly lower than that of other complex sounds ($P < 0.05$). The average response time of grass carp stimulated by the sound of yacht and pile was (26.52 ± 3.01) s and (28.76 ± 4.07) s, respectively. The average response time of grass carp stimulated by fish swimming sound was (64.76 ± 17.82) s. In the complex sound, the motion time ratio of grass carp stimulated by fish swimming sound was the highest, which was $(98.47 \pm 0.48)\%$. The motion time ratio of grass carp stimulated by engine sound was $(94.58 \pm 0.54)\%$. There were no significant differences in reaction times, initial reaction time, average reaction time and exercise time ratio between grass carp and control group when playing single frequency tone ($P > 0.05$). The experimental results indicated that the five complex sounds used in this study (fish swimming, engine, short-nosed crocodile call, pile driving, and yacht sounds) all had a deterrent effect on grass carp juveniles. This study not only enriches current knowledge of the negative phonotaxis behavior of fish but also provides a scientific basis for the design and optimization of sound-based fish deterrent facilities in practical engineering.

Key words Negative phonotaxis; *Ctenopharyngodon idellus*; Technique of fish repelling using sound; Open-field trial