



## 草鱼敏感的负趋音筛选

杨吉<sup>1,2</sup>, 邬玉娇<sup>1,2</sup>, 李晓兵<sup>3</sup>, 尼玛旦增<sup>4</sup>, 达瓦<sup>4</sup>, 张占<sup>4</sup>,  
刘国勇<sup>1,2</sup>, 许家炜<sup>5</sup>, 柯森繁<sup>1,2</sup>, 李卫东<sup>1,2</sup>, 李冬晴<sup>1,2</sup>, 石小涛<sup>1,2\*</sup>

- (1. 三峡大学水利与环境学院, 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. 西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院, 西藏 拉萨 850000;
- 5. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 声学屏障是一种阻拦鱼类进入危险区域进而保护鱼类资源的重要手段, 为筛选鱼类敏感的负趋音作为声学屏障, 本研究采用 6 种单频音 (500~3 000 Hz) 和 1 种宽频音 (扬子鳄吼叫声) 作为实验用音对草鱼幼鱼进行负趋音的筛选研究, 通过在水槽两端交替播音来对比草鱼幼鱼对不同声音的行为反应。结果显示, 大多数实验鱼对声音有反应, 扬子鳄吼叫声与其他声音组的差异显著。单频音实验组中播放 500 Hz 单频音时平均反应次数最大, 为 (1.7±0.6) 次, 而播放扬子鳄吼叫声时平均反应次数高达 (5.0±0.9) 次, 显著高于其他实验音。在总平均速度中, 宽频音组中草鱼的总平均速度显著高于其他组, 表明草鱼对扬子鳄吼叫声敏感, 产生逃窜行为。研究表明, 草鱼对扬子鳄吼叫声具有负趋音性, 扬子鳄吼叫声是一种对草鱼具有驱赶、威慑作用的声音。本研究可为过鱼设施中辅助诱驱鱼手段及水利结构中避免鱼类的夹带提供参考依据。

**关键词:** 草鱼; 幼鱼; 扬子鳄; 负趋音性; 单频音; 宽频音

**中图分类号:** S 973.4

**文献标志码:** A

水利工程 (水电站、农田水利工程等) 可通过增加水的调度进行发电、作物灌溉以增加社会效益, 但其对水生态系统<sup>[1-2]</sup> 和淡水鱼类<sup>[3]</sup> 产生了不利影响, 大坝的修建会阻碍洄游性鱼类的上溯, 引水结构和抽水活动更会造成幼鱼或成鱼的损伤和死亡<sup>[4]</sup>。为解决该问题, 可采取部署物理屏障等措施防止鱼类进入危险区域。虽然物理屏障可以防止一些鱼类被夹带<sup>[5]</sup>, 但其成本高昂<sup>[6]</sup>, 难以安装和维护<sup>[7]</sup>, 因此, 作为不对鱼类造成伤害的非结构性措施, 声音辅助诱趋鱼措施被广泛

应用于水利工程<sup>[8]</sup>。

水环境中充斥的生物和非生物的声音对鱼类的生存和繁殖至关重要<sup>[9-10]</sup>, 其在鱼类之间的交流、交配行为、猎物和捕食者的发现、定向和迁徙及栖息地选择中发挥重要功能<sup>[11]</sup>。已有研究表明, 鱼类对单频音和宽频音具有不同的行为反应。在声压为 83 dB (dB 为声压级单位) 时, 蓝鳍金枪鱼 (*Thunnus thynnus*) 对 400~500 Hz 的单频音最为敏感<sup>[12]</sup>; 270 Hz 振动的板材声对虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 具有吸引作用<sup>[13]</sup>。大西洋鲑 (*Salmo salar*)

收稿日期: 2023-02-10 修回日期: 2023-05-06

资助项目: 国家自然科学基金 (52279069); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目 (T201703)

第一作者: 杨吉 (照片), 从事生态水力学研究, E-mail: [romanticntd@163.com](mailto:romanticntd@163.com)

通信作者: 石小涛, 从事生态水力学、鱼类过坝技术研究, E-mail: [fishlab@163.com](mailto:fishlab@163.com)



幼鱼对 10 Hz 的声音存在逃避行为<sup>[14-15]</sup>。鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 通常对宽频音表现出负趋音反应<sup>[16]</sup>。在渡船声的影响下, 黑带娇丽鱼 (*Amatitlania nigrofasciata*) 的躲避行为增加, 欧洲鲈 (*Hemiculter leucisculus*) 和三刺鱼 (*Gasterosteus aculeatus*) 都有明显的逃避行为<sup>[17-18]</sup>。这些现象表明鱼类能够对各种声音做出反应且可以区分不同大小或频率的声音, 这种检测声音并确定声源方向的能力被称为声源定位<sup>[19]</sup>。在其他感官无法有效运作的条件下, 声源定位可以为鱼类寻找猎物、避开捕食者和危险水域提供重要的空间线索<sup>[20]</sup>。因此, 找出不同鱼类敏感的负趋音作为声学屏障以减少鱼类可能受到的危害至关重要。

目前, 国外已建过鱼设施大部分是以鲑科 (*Salmonidae*) 鱼类为主要过鱼对象<sup>[21]</sup>, 而中国过鱼设施的主要过鱼对象大部分是鲤科 (*Cyprinidae*) 鱼类<sup>[22]</sup>, 通过聚焦研究鲤科鱼类可解决我国大量过鱼设施对鱼类基础数据的共性需求<sup>[23]</sup>。本研究结合前人的经验, 采用单频音和宽频音两种形式对草鱼进行实验, 通过草鱼幼鱼应对水下不同声音的行为反应, 判断并筛选其敏感的负趋音, 为过鱼设施中辅助诱驱鱼手段及水利结构中避免鱼类的夹带提供参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验装置与材料

实验水槽参照 Vetter 等<sup>[24]</sup>的方法, 采用尺寸为 9.0 m×0.6 m×1.0 m 的狭长混凝土水槽, 水槽底部及侧面贴上边长为 0.6 m 的白色瓷砖, 以便观察实验鱼在水槽中的位置。在水下喇叭的前方距离水槽两端 1.2 m 的位置放置拦网, 防止实验鱼游入喇叭后方, 实验区域实长 6.6 m (图 1)。实验过程中, 槽内水温为 20~25 °C, 水深保持在 0.5 m。水槽上方架设两台摄像机 (红外网络摄像头, 焦距 4 mm, 帧率 24 Hz, 海康威视), 每次实验开始前, 进行视频录制, 以记录实验鱼在声音播放时的行为反应。

实验材料为草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*), 属鲤形目 (*Cypriniformes*) 鲤科雅罗鱼亚科 (*Leuciscinae*) 草鱼属 (*Ctenopharyngodon*), 鲤形目鱼类除了具有耳、鱼鳔、侧线等器官外, 还具有韦伯氏器<sup>[25]</sup>, 使得鲤形目鱼类的听觉系统更为完善, 听力更加敏感、范围更广, 且草鱼为中国主要淡水

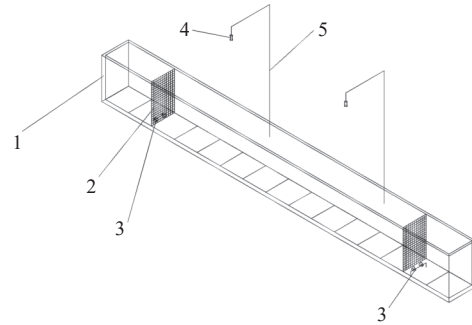


图 1 实验水槽

1.水槽, 2.隔网, 3.水下扬声器, 4.摄像头, 5.支撑杆。

Fig. 1 Experimental flume

1. flume, 2. netting, 3. underwater loudspeaker, 4. camera, 5. supporting rod.

鱼类养殖对象, 分布于中国各大水系, 故使用草鱼作为实验用鱼。草鱼取自当阳市草鱼养殖场, 体长为 7~15 cm。实验前, 将购得的草鱼放在直径为 2 m 的钢化玻璃缸中, 进行 48 h 的饥饿暂养, 全天不间断充氧, 选择体表无伤, 活性良好的鱼进行实验。

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。

### 1.2 实验方法

实验地点位于湖北宜昌, 于 4—5 月进行, 采用单频音和宽频音这两种不同的音频对草鱼进行趋音性实验, 以获得更准确、可使结论推导范围更广的结果。

实验中单频音实验共用鱼 30 尾, 宽频音实验共用鱼 30 尾。每次实验观察单尾鱼的行为反应, 单频音和宽频音实验各重复 30 组, 共 60 组。每组实验 10 min, 在每次实验开始前记录实验鱼在水槽中自由游泳 10 min 的视频作为空白对照。

**鱼类趋音行为的定义** 正趋音反应: 当播放声音开始 15 s 内游向声源, 并且从远离声源的一端在 30 s 内鱼游过水槽中线 (5 m 处), 记为 1 次反应。负趋音反应: 当播放声音开始 15 s 内游离声源, 并且从靠近声源的一端在 30 s 内鱼游过水槽中线 (5 m 处), 记为 1 次反应。中性反应: 既不符合“正趋音反应”, 又不符合“负趋音反应”。连续反应: 如果鱼有“负趋音反应”, 就继续进行声音实验。当鱼游过中线时, 一端停止播放声音, 另外一端开始播放声音。这样来回交替更换声源位置, 记录鱼来回游动次数。如果鱼有 2 次或更

多次趋音反应即有“连续反应”。

**游泳速度的定义** 实验鱼在 1 次经过水槽中线后并在 30 s 内再次经过水槽中线, 这种躲避声音的行为记为一次反应。在这 2 次经过水槽中线的时间内实验鱼的平均速度为反应速度; 平均反应速度为所有反应速度的平均值; 实验鱼的最大反应速度为实验鱼的反应速度最大值; 总平均速度为在实验时间 10 min 内实验鱼的平均速度。

**声音的采集** 单频音的合成: 使用 Cool editor pro 软件合成 500、1 000、1 500、2 000、2 500 和 3 000 Hz 的单频音。宽频音的录制: 扬子鳄 (*Alligator sinensis*) 吼叫声在安徽鳄鱼繁殖研究中心录制, 用竹竿绑住水听器放于离扬子鳄 1.5 m 的位置, 待其吼叫时进行录制, 再选取其中有效的声音部分用 Cool editor pro 软件进行处理, 得到一段 4.8 s 的音频。

**单频音实验** 实验开始前让鱼在实验水槽中适应 2 h 左右。开始实验时, 观察鱼的位置, 当鱼靠近一端的水下喇叭时播放一段 30 s 的单频音 (500、1 000、1 500、2 000、2 500 和 3 000 Hz), 若实验鱼在 15 s 内游离声源并在 30 s 内游过水槽中线 (5 m), 则记为 1 次反应, 并关掉正在播放的水下喇叭, 打开另一端的水下喇叭继续播放声音, 若鱼继续反应, 则如此反复交替更换声源, 直到实验结束, 单次实验时间为 10 min。

为尽量减少之前实验音对鱼的影响, 待实验鱼休息 15 min 后, 再播放另一种单频音, 直到 6 种单频音都播放完毕。单频音实验共用草鱼 30 尾。待实验完成后, 将实验鱼保存好, 待进行下一步宽频音实验。

**宽频音实验** 实验以扬子鳄吼叫声作为声音刺激源, 使用进行过单频音实验的鱼作为实验鱼, 让鱼休息 15 min 后开始播放扬子鳄吼叫声, 若实验鱼有反应则来回更换声源, 直到实验结束, 单次实验时间为 10 min。

在实验开始前, 先让实验鱼在水槽中适应 2 h 左右。开始实验时, 观察鱼的位置, 当鱼靠近一端的水下喇叭时播放扬子鳄吼叫声, 若鱼有反应, 则继续交替放音, 直到实验结束。宽频音实验共用草鱼 30 尾。6 种单频音加上空白对照组和 1 种宽频音, 共 8 类实验 ( $n=8$ )。

### 1.3 数据分析

**水下喇叭附近声场的表征** 将声级计与水听器相连, 测量水下喇叭播放声音后的声音强

度。测量时, 单频音及扬子鳄吼叫声的声强值都取 5 s 内的平均值, 然后用 Origin 8.1 软件画出测出的声场图, 且只测量实验区域的声场, 即两个拦网之间的区域 (长 6.6 m, 宽 0.6 m)。将水槽划分为  $0.1\text{ m}\times 0.4\text{ m}$  的网格, 在靠近水槽边壁的位置划分为  $0.05\text{ m}\times 0.40\text{ m}$  的网格进行测量, 共测量 153 个点, 测量水深为 22 cm。测量所有播放的单频音及宽频音, 用 Origin 8.1 软件画出测量的声场图。

**声音的反映** 通过测量均方根电压 (rms) 并使用 Cool Edit Pro 2.1 软件转换为以 dB 为单位的相对声压水平, 计算每个频率的相对声压级 (SPL)。采用 2 048 点快速傅里叶变换 (汉宁窗) 和采样率为 44.1 kHz 的方法计算了声波的频率和功率谱, 用 Origin 8.1 软件画出声强频率图。

**数据分析方法** 使用跟踪软件 Logger Pro 3.8.5.1 软件对录像进行分析。Logger Pro 打点的时间间隔为 1 s, 每个视频共打点 600 个, 以确定每个时刻实验鱼的位置。以每条鱼作为观察对象, 对游泳速度和消耗时间进行量化, 并统计鱼的反应次数、游过水槽中线的总次数、反应速度、最大反应速度、总平均速度及首次游过水槽中线所需时间, 使用单因素方差分析 (One Way-ANOVA) 分析鱼的反应次数和游泳速度等数据。

## 2 结果

### 2.1 声音在水槽中的分布

对播放的 6 种单频音和扬子鳄吼叫声进行声场图的绘制, 图 2-a~f 为播放 500~3 000 Hz 的单频音时所绘制的声场图。

播放单频音时, 最大声强在水槽中喇叭附近, 为 130~145 dB; 最低声强在水槽末端, 为 80~95 dB。在整个水槽中声强有一定的衰减, 最大衰减幅度为 60 dB, 最小衰减幅度为 42.5 dB。图 g 为水槽中的背景噪音, 最大约为 76.8 dB, 最小约为 60 dB。图 h 为播放扬子鳄吼叫声时所绘制的声场图, 播放时, 水槽中的最大声强为 130 dB, 最小声强为 80 dB, 在水槽中的衰减幅度约为 50 dB。

### 2.2 部分声音的声强和频率

图 3 中除了反映 1 500 Hz 单频音和扬子鳄吼叫声外, 还对水下喇叭播放出的扬子鳄吼叫声进行了描述。从图中可以看出, 空气中的扬子鳄吼叫声与水下录制的扬子鳄吼叫声频率无太大差别, 其峰值集中在 100~500 Hz。

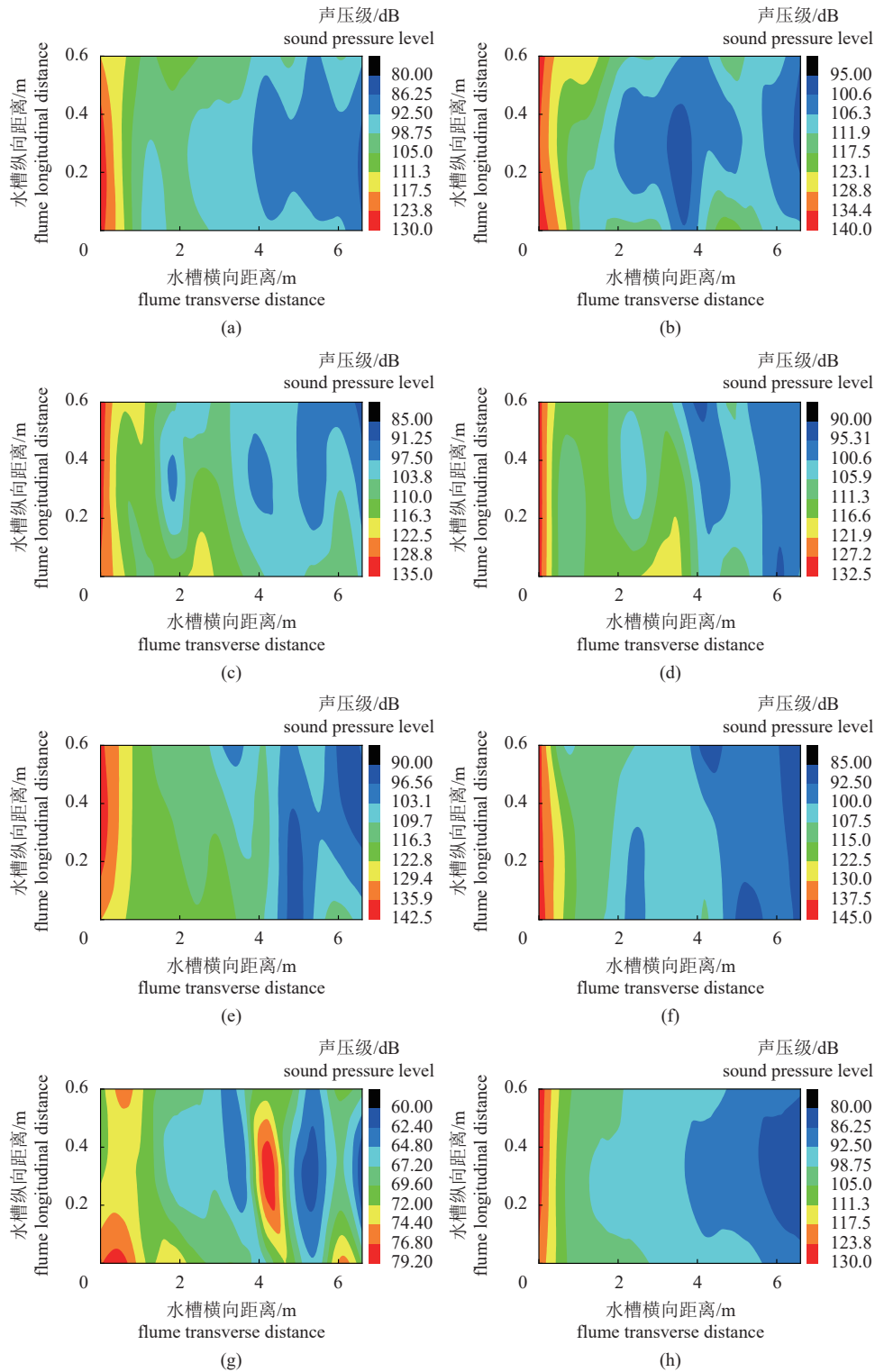


图 2 水槽中的声场分布图

(a) 500 Hz, (b) 1000 Hz, (c) 1500 Hz, (d) 2000 Hz, (e) 2500 Hz, (f) 3000 Hz, (g) 背景声场, (h) 扬子鳄吼叫声, 图 6 同。

Fig. 2 Sound field distribution in flume

(a) 500 Hz, (b) 1000 Hz, (c) 1500 Hz, (d) 2000 Hz, (e) 2500 Hz, (f) 3000 Hz, (g) background sound field, (h) *A. sinensis* roar, the same as Fig. 6.

### 2.3 草鱼的反应

实验鱼的反应次数如图 4 所示。从图中可以

看出, 在空白对照组中, 实验鱼的反应次数为 (0.9±0.3) 次, 而在播放单频音时, 实验鱼的反应



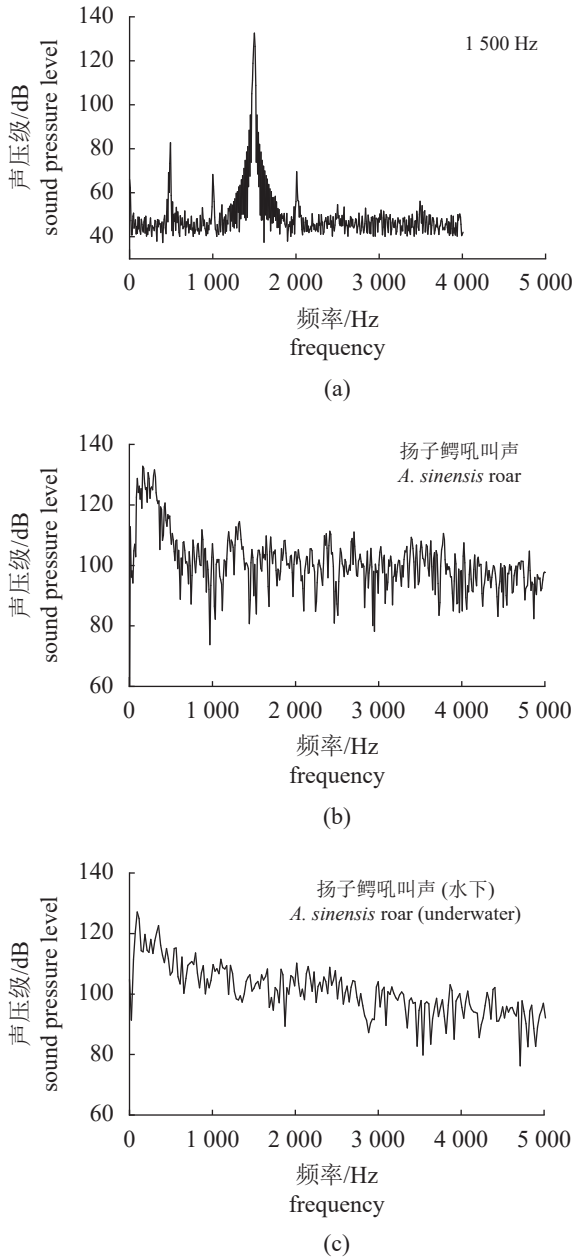


图3 几种典型的声强频率图

(a) 1 500 Hz; (b) 扬子鳄吼叫声; (c) 扬子鳄吼叫声(水下)。

Fig. 3 Several typical sound intensity frequency diagrams

(a) 1 500 Hz; (b) *A. sinensis* roar; (c) *A. sinensis* roar (underwater).

次数为(0.4~1.7)次。其中在播放 500 Hz 时, 实验鱼的平均反应次数最大, 为(1.7±0.6)次, 而播放 1 500 Hz 的单频音时, 实验鱼的反应次数最少, 为(0.4±0.3)次。与单频音和空白对照组相比, 在播放扬子鳄吼叫声时, 实验鱼的平均反应次数显著增加, 高达(5.0±0.9)次 ( $F=8.158, P<0.000 1$ )。

实验鱼游过水槽中线的总次数如图 5 所示。在实验时间 10 min 内, 实验鱼反应的总次数为实

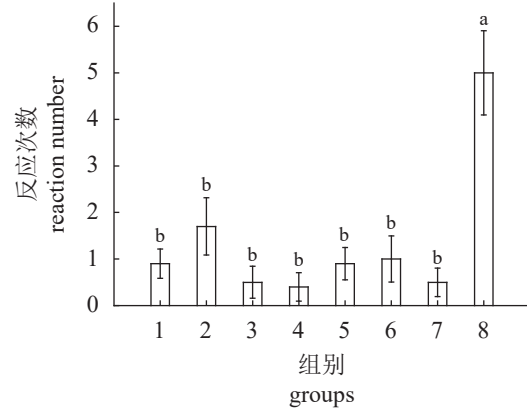


图4 不同声音下草鱼的反应次数

(1) 空白对照; (2) 500 Hz; (3) 1 000 Hz; (4) 1 500 Hz; (5) 2 000 Hz; (6) 2 500 Hz; (7) 3 000 Hz; (8) 扬子鳄吼叫声。图中不同字母表示有显著差异 ( $P<0.05$ ), 图 5、图 7、图 8 同。

Fig. 4 Times of response of *C. idella* under different sounds

(1) blank control; (2) 500 Hz; (3) 1 000 Hz; (4) 1 500 Hz; (5) 2 000 Hz; (6) 2 500 Hz; (7) 3 000 Hz; (8) *A. sinensis* roar. There were significant differences between different letters in the figure ( $P<0.05$ ), Fig. 5, Fig. 7, Fig. 8 are the same.

验鱼游过水槽中线次数的总和。该图中, 空白对照组反映了实验鱼的活跃程度。从图中可以看出, 在进行 1 500、3 000 Hz 的单频音时, 实验鱼在水槽中来回游动的次数略低于空白对照组, 但是无显著差异。其他单频音实验时, 实验鱼来回游动的次数无明显增加。该现象证明单频音对实验鱼在水槽中的行为表现无显著影响。但是在播放扬子鳄吼叫声时, 实验鱼在水槽中来回游动的次数明显增加 ( $F=14.319, P<0.000 1$ )。该现象表明宽频音显著影响了实验鱼的行为。

通过对比图 4 和图 5, 在播放宽频音时, 实

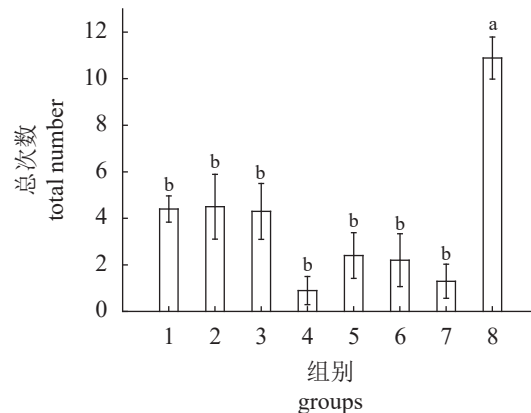


图5 不同声音下草鱼游过水槽中线的总次数

Fig. 5 Total number of *C. idella* swimming through the middle line of the flume under different sounds

实验鱼的反应次数和反应总次数都显著高于空白对照组和单频音实验组。虽然在播放宽频音时实验鱼的反应总次数(均值为 10.9±0.9)并不完全为反应次数(均值为 5.0±0.9), 但是由于宽频音的作用, 引起了实验鱼逃避声源的反应, 故相较于单频音, 宽频音更具有驱鱼效果。

### 2.4 草鱼的代表性反应

在实验中, 8 尾实验鱼的代表性反应如图 6 所示。在不播放声音时, 实验鱼在水槽中自由游动或待在拦网附近。与空白对照组相比, 在进行单频音实验时, 实验鱼在水槽中的游泳行为无明显不同, 但是在进行宽频音实验时, 在播放声音后, 实验鱼就立刻表现出了强烈的逃离声源的行为反应。并在贴网一段时间后继续, 在水槽中线附近来回游动。

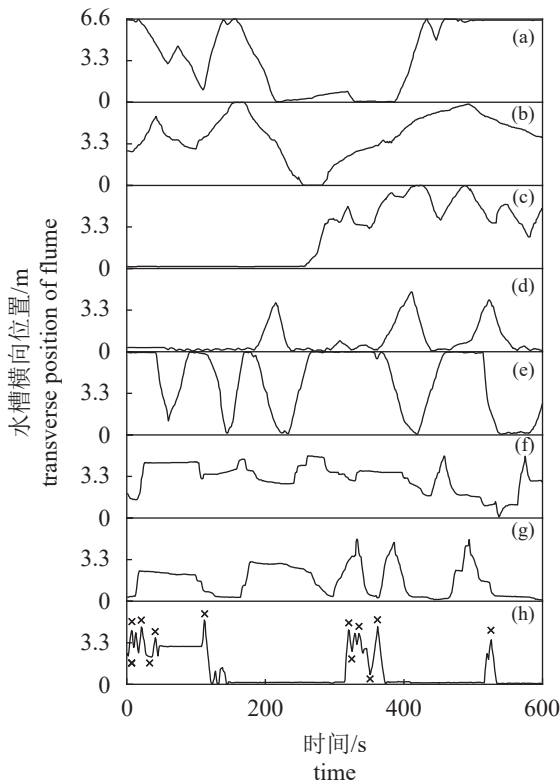


图 6 草鱼分别对单频音及宽频音的代表性反应曲线  
图中“×”代表实验鱼的负趋音反应。

Fig. 6 Representative response curves of *C. idella* to single tone and broadband tone

'×' represents negative phonotaxis of the experimental fish.

### 2.5 实验鱼的游泳速度

在播放扬子鳄吼叫声时, 实验鱼的平均反应

速度均值为 0.20 m/s, 而空白对照组为 0.14 m/s; 在播放 500~3 000 Hz 的单频音时, 实验鱼的平均反应速度为 (0.11~0.17 m/s)。可以看出在播放单频音时, 实验鱼的平均反应速度与空白对照组差异不显著, 而在播放扬子鳄吼叫声时, 实验鱼的平均反应速度虽高于单频音与空白对照组, 却无显著差异 ( $F=1.156, P=0.348$ )。在不同声音下实验鱼的最大反应速度范围为 (0.12~0.29 m/s), 其中在播放扬子鳄吼叫声时, 实验鱼的最大反应速度最大。在播放 3 000 Hz 的单频音时实验鱼的最大反应速度最小, 这与实验鱼的平均反应速度结果一致。

虽然在播放扬子鳄吼叫声时, 实验鱼的最大反应速度略高于空白对照组与单频音实验组, 但是无显著差异 ( $F=1.232, P=0.308$ )。从图 7 中可以看出, 在播放扬子鳄吼叫声时, 实验鱼的总平均速度为 (0.10±0.01 m/s), 与空白对照组 (0.06±0.01 m/s)、500 Hz (0.06±0.01 m/s)、1 000 Hz (0.05±0.01 m/s) 及 2 000 Hz (0.05±0.02 m/s) 的单频音实验组相比无显著差异, 但与 1 500 Hz (0.03±0.01 m/s)、2 500 Hz (0.030±0.005 m/s) 及 3 000 Hz (0.04±0.01 m/s) 的单频音实验组相比具有显著差异 ( $F=6.372, P<0.000 1$ )。

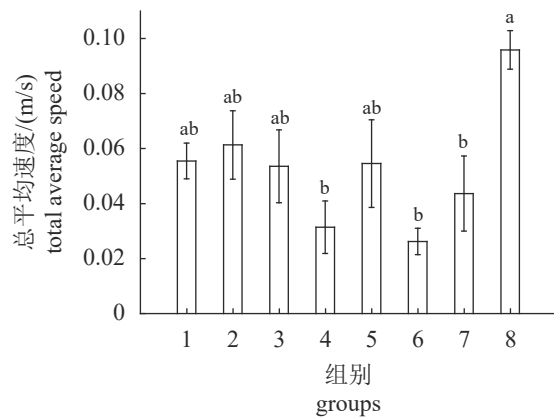


图 7 草鱼的总平均速度

Fig. 7 Total average speed of *C. idella*

通过比较实验鱼对不同声音的平均反应速度、最大反应速度及总平均速度可知, 在空白对照组中或在播放声音后, 实验鱼能在 30 s 内 2 次经过水槽中线, 所产生的反应速度相差不多。

### 2.6 实验鱼首次游过水槽中线所需时间

实验开始时, 首次播放声音后, 实验鱼游过水槽中线所需时间如图 8 所示。从图中可以看出, 播放扬子鳄吼叫声时, 实验鱼首次游过水槽中线

时间最短, 虽与空白对照组、500、1 000 及 2 500 Hz 单频音实验组无显著差异。但与 1 500、2 000 及 3 000 Hz 单频音实验组差异显著 ( $F=6.446$ ,  $P<0.000 1$ )。在进行 3 000 Hz 的单频音实验时, 实验鱼首次游过水槽中线所需时间最长, 其次是 1 500 及 2 500 Hz 的单频音实验。

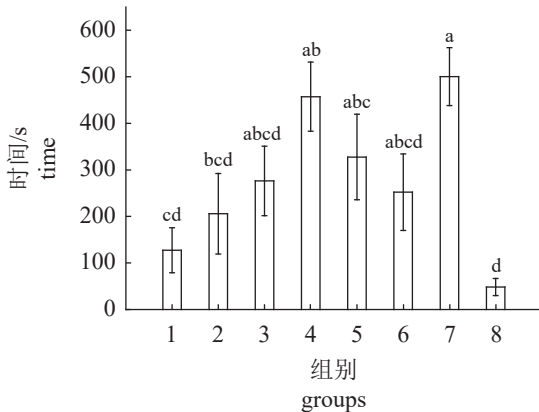


图 8 草鱼首次游过水槽中线所需时间

Fig. 8 Time required for *C. idella* to swim across the middle line of the flume for the first time

### 3 讨论

鱼类对声音的趋性按其行为响应特征可分为正趋音性和负趋音性, 正趋音性即声源对鱼类产生吸引效果, 鱼类会因正趋音的存在靠近声源; 而负趋音相反, 声源对鱼类产生驱离效果, 鱼类会因负趋音的存在远离声源。

水温变化会对鱼类的生理、分布和生存产生影响, 升高的水温会提高新陈代谢速率, 并迫使鱼类迁移到较冷的水域<sup>[26]</sup>。鱼类作为变温动物, 依靠行为策略来调节体温。不同种类的鱼通过热导航, 根据所经历的环境温度来调整行为策略, 从而找到它们适宜的最佳温度<sup>[27]</sup>。草鱼对水温适应性较强, 适宜温度在 20~32 °C, 覆盖了 4—5 月的昼夜温差变化。本实验过程中水温维持在 20~25 °C, 在草鱼适宜温度范围内, 可忽略水温对草鱼行为反应的影响。

实验通过对比草鱼在不同声音下的表现, 找出了草鱼敏感的负趋音, 即扬子鳄吼叫声。在前人的研究中, Vetter 等<sup>[24]</sup>以鳙 (*Aristichys nobilis*) 为对象进行鱼类趋音性研究, 并通过交替改变声源位置的方法, 观察鳙对单频音 (500~2 000 Hz) 和宽频音 (0.06~10.00 kHz) 的行为反应, 结果表明鳙对船声 (宽频音) 更为敏感, 表现出负趋音性,

而对单频音的反应不强烈。刘国勇等<sup>[28]</sup>使用水下扬声器播放扬子鳄嘶嘶声 (0.05~5.00 kHz) 录音的宽频音, 评估裸腹叶须鱼 (*Ptychobarbus kaznakovi*) 的反应次数和横向游泳速度, 研究表明, 扬子鳄嘶嘶声是驱除裸腹叶须鱼的有效威慑声音。这与实验的结果一致, 该结果表明部分鲤科鱼类对宽频音的反应更为强烈。

鱼类对单频音的反应远不如对宽频音的反应强烈, 产生此现象的原因可能是听力阈值的存在<sup>[29]</sup>。鱼类的可听频率维持在固定区间内, 不同鱼类的听力阈值有所不同。声强超过鱼类的听力范围会严重损伤鱼类的听觉系统, 造成不可逆的伤害<sup>[30]</sup>。实验的用音都在草鱼的听力范围内, 不会对其造成损伤。有研究表明, 大多数鱼类能听到的声音频率范围为 50~1 000 Hz, 少数鱼类能听到大于 3 kHz 频率的声音, 仅有极少数鱼类能够听到大于 100 kHz 频率的声音<sup>[31-32]</sup>。Ladich 等<sup>[33]</sup>对 51 科 111 种鱼类的基线听力能力进行了描述和比较, 发现多数鲤科鱼类对 300~3 000 Hz 频率比较敏感。Vetter 等<sup>[24]</sup>的一项研究表明, 一些鲤科鱼类的听力阈值可能会高于 3 000 Hz, 其中鲢和鳙可以检测到 0.1~5.0 kHz 的宽范围频率, 它们的最低平均听力阈值为 500 Hz<sup>[34]</sup>。本研究的扬子鳄吼叫声宽音频频段范围为 0~5 000 Hz, 在 100~500 Hz 达到波峰, 并在 5 000 Hz 内维持在较高水平, 这与 Vetter 等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。

另外, 实验选取扬子鳄吼叫声作为宽频音, 而草鱼对此表现出负趋音性, 其可能的原因是因捕食胁迫的存在。在遭遇捕食者时, 由于视觉、声音、气味等对鱼类感官的影响, 鱼类会表现出反捕食行为以应对当前的威胁<sup>[35-37]</sup>。有研究表明, 在实际捕食胁迫下, 草鱼会在具备较高游泳性能的基础上缩短反应时滞以保证其能有效躲避捕食者, 会基于自身游泳运动能力及当前环境中的捕食风险水平优化其逃逸反应<sup>[37]</sup>。朱存良<sup>[38]</sup>提出鱼类会对其同类的负伤声和逃避声、外敌的摄食声和游泳声以及渔船、渔具发出的异常声等呈负趋音性, 鳄鱼作为肉食性动物, 因此草鱼幼鱼会对扬子鳄吼叫声产生逃离反应。

在实际环境中, 水下声音复杂多变, 在远岸的水体中, 由于风浪和底质的影响, 会有声场波动, 鱼类会因为这种短暂声场变化而产生反应, 但不会对鱼类的生理产生影响。在近岸的水体中, 由于人类活动的影响, 会产生非自然噪声, 例如

近岸处的城市噪声, 码头旁的船舶噪声等, 这类声音频率过大且长期存在, 会给生活在周边的鱼类产生不可逆的影响, 比如反应迟钝、听觉系统损伤等<sup>[39]</sup>。为解决该问题, 可参考本研究结论, 在岸边布置扬声器, 使用不同鱼类的敏感负趋音控制指定鱼种的离岸距离, 保护鱼类。

研究表明, 可利用宽频音建立声学屏障<sup>[40]</sup>, 防止鱼类受到引水结构的夹带等意外伤害, 为鱼类保护提供新思路。当然, 研究存在一定的不足。由于实验场地的限制, 水槽的宽度有限, 在播放声音后, 声音在水槽中有反射, 导致声场分布杂乱, 对实验鱼的行为会有一些影响<sup>[24]</sup>, 如果在池塘或天然河流等地进行实验, 会消除这部分的误差。另外, 在此次实验中, 只记录了实验鱼反复越过水槽中线的次数, 在实际环境中, 鱼类的逃窜路径十分复杂, 逃窜路线的复杂程度是摆脱危险的关键, 如果能全方位地观察鱼类的游泳形态(加速度、转弯率等)<sup>[41]</sup>, 研究将更深入。

(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, 468(7315): 555-561.
- [2] Grill G, Lehner B, Lumsdon A E, *et al.* Reply to Comment on ‘an index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales’[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(3): 038002.
- [3] 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 Conservation*, 2009, 142(8): 1665-1673.
- [4] 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.
- [5] Gale S B, Zale A V, Clancy C G. Effectiveness of fish screens to prevent entrainment of westslope cutthroat trout into irrigation canals[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2008, 28(5): 1541-1553.
- [6] Moyle P B, Israel J A. Untested assumptions: effectiveness of screening diversions for conservation of fish populations[J]. *Fisheries*, 2005, 30(5): 20-28.
- [7] Poletto J B, Cocherell D E, Mussen T D, *et al.* Fish-protection devices at unscreened water diversions can reduce entrainment: evidence from behavioural laboratory investigations[J]. *Conservation Physiology*, 2015, 3(1): cov040.
- [8] Taft E P. Fish protection technologies: a status report[J]. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3 Suppl 1: 349-359.
- [9] Popper A N, Fay R R. Rethinking sound detection by fishes[J]. *Hearing Research*, 2011, 273(1-2): 25-36.
- [10] Slabbekoorn H, Bouton N, van Opzeeland I, *et al.* A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(7): 419-427.
- [11] Popper A N, Hawkins A D. An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes[J]. *Journal of Fish Biology*, 2019, 94(5): 692-713.
- [12] Dale J J, Gray M D, Popper A N, *et al.* Hearing thresholds of swimming Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis*[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2015, 201(5): 441-454.
- [13] Solé M, Lenoir M, Fortuño J M, *et al.* Sea lice are sensitive to low frequency sounds[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(7): 765.
- [14] Knudsen F R, Enger P S, Sand O. Awareness reactions and avoidance responses to sound in juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L.[J]. *Journal of Fish Biology*, 1992, 40(4): 523-534.
- [15] Knudsen F R, Enger P S, Sand O. Avoidance responses to low frequency sound in downstream migrating Atlantic salmon smolt, *Salmo salar*[J]. *Journal of Fish Biology*, 1994, 45(2): 227-233.
- [16] Vetter B J, Cupp A R, Fredricks K T, *et al.* Acoustical deterrence of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*)[J]. *Biological Invasions*, 2015, 17(12): 3383-3392.
- [17] McLaughlin K E, Kunc H P. Changes in the acoustic environment alter the foraging and sheltering behaviour of the cichlid *Amititlania nigrofasciata*[J]. *Behavioural Processes*, 2015, 116: 75-79.
- [18] Voellmy I K, Purser J, Flynn D, *et al.* Acoustic noise reduces foraging success in two sympatric fish species via different mechanisms[J]. *Animal Behaviour*, 2014, 89: 191-198.
- [19] Febrina R, Sekine M, Noguchi H, *et al.* Modeling the preference of ayu (*Plecoglossus altivelis*) for underwater



- sounds to determine the migration path in a river[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 299: 102-113.
- [20] Hawkins A D, Popper A N. Directional hearing and sound source localization by fishes[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 144(6): 3329-3350.
- [21] Katopodis C, Williams J G. The development of fish passage research in a historical context[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 48: 8-18.
- [22] Shi X T, Kynard B, Liu D F, *et al.* Development of fish passage in China[J]. *Fisheries*, 2015, 40(4): 161-169.
- [23] 蔡露, Christos K, 金瑶, 等. 中国鲤科鱼类游泳能力综合分析 and 应用 [J]. *湖泊科学*, 2022, 34(6): 1790-1803.  
Cai L, Christos K, Jin Y, *et al.* Comprehensive analysis and application of Chinese Cyprinidae swimming ability[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(6): 1790-1803 (in Chinese).
- [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] 张耀光, 王德寿. 嘉陵江鲢科鱼类骨学研究 ( I )——韦伯氏器的比较 [J]. *西南师范大学学报 (自然科学版)*, 1995, 20(1): 53-58.  
Zhang Y G, Wang D S. Studies on the osteology of the bagrid catfishes from the Jialing river ( I )——comparison of the weberian apparatus[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 1995, 20(1): 53-58 (in Chinese).
- [26] Morales-Marín L A, Rokaya P, Sanyal P R, *et al.* Changes in streamflow and water temperature affect fish habitat in the Athabasca River basin in the context of climate change[J]. *Ecological Modelling*, 2019, 407: 108718.
- [27] Haesemeyer M. Thermoregulation in fish[J]. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 2020, 518: 110986.
- [28] 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.
- [29] 邢彬彬. 鱼类听觉能力研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.  
Xing B B. The study of auditory capacities in fish[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018 (in Chinese).
- [30] Zhang F, Zhu L F, Shi X T, *et al.* Influence of pump noise on the health of fish in a large pumping station[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2022, 34(3): 522-531.
- [31] Xu J J, Fu S J, Fu C. Physiological and behavioral stress responses to predators are altered by prior predator experience in juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*)[J]. *Biology Open*, 2019, 8(5): bio041012.
- [32] Wang Y, Fu S J, Fu C. Behavioral adjustments to prior predation experience and food deprivation of a common cyprinid fish species vary between singletons and a group[J]. *PeerJ*, 2019, 7: e7236.
- [33] Ladich F, Fay R R. Auditory evoked potential audiometry in fish[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2013, 23(3): 317-364.
- [34] Vetter B J, Brey M K, Mensinger A. F. Reexamining the frequency range of hearing in silver (*Hypophthalmichthys molitrix*) and bighead (*H. nobilis*) carp[J]. *PLoS One*, 2018, 13(3): e0192561.
- [35] 王亚, 付成, 胡月, 等. 四种鲤科鱼类对捕食胁迫行为响应的种间比较 [J]. *水生生物学报*, 2021, 45(5): 1154-1163.  
Wang Y, Fu C, Hu Y, *et al.* Interspecific comparison of the behavioral responses to predation stress in four cyprinids[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45(5): 1154-1163 (in Chinese).
- [36] Fürtbauer I, Pond A, Heistermann M, *et al.* Personality, plasticity and predation: linking endocrine and behavioural reaction norms in stickleback fish[J]. *Functional Ecology*, 2015, 29(7): 931-940.
- [37] 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).
- [38] 朱存良. 鱼类行为生态学研究进展 [J]. *北京水产*, 2007(1): 20-24.  
Zhu C L. Advances in fish behavioral ecology [J]. *Journal of Beijing Fisheries*, 2007, No. 104 (1): 20-24(in Chinese).
- [39] Kusku H. Acoustic sound-induced stress response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to long-term underwater sound transmissions of urban and shipping noises[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(29): 36857-36864.

- [40] 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[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2017, 24(3): 208-216.
- [41] Seamone S, Blaine T, Higham T E. Sharks modulate their escape behavior in response to predator size, speed and approach orientation[J]. *Zoology*, 2014, 117(6): 377-382.

## Screening acoustic deterrents against *Ctenopharyngodon idella*

YANG Ji<sup>1,2</sup>, WU Yujiao<sup>1,2</sup>, LI Xiaobing<sup>3</sup>, NIMA Danzeng<sup>4</sup>, DA Wa<sup>4</sup>, ZHANG Zhan<sup>4</sup>,  
LIU Guoyong<sup>1,2</sup>, XU Jiawei<sup>5</sup>, KE Senfan<sup>1,2</sup>, LI Weidong<sup>1,2</sup>, LI Dongqing<sup>1,2</sup>, SHI Xiaotao<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Hydraulic and Environment Engineering, 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. Tibet Water Conservancy and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Lasa 850000, China;

5. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The construction of dams will hinder the migration of migratory fish, and the water diversion structure and pumping activities will cause damage and death of juvenile or adult fish. In order to solve this problem, measures such as deploying physical barriers can be taken to prevent fish from entering dangerous areas. However, such physical barriers are expensive and difficult to install and maintain. Therefore, as a non-structural measure that does not cause harm to fish, acoustic deterrents are widely used in water conservancy projects. The acoustic deterrent is an important means to prevent fish from entering dangerous areas and protect fish resources. In order to screen sounds as potential acoustic deterrents, this research used six single-frequency sounds (500-3 000 Hz) and a broadband sound (*Alligator sinensis* roar) as experimental sounds to screen deterrents against *Ctenopharyngodon idella* juveniles. The behavioral responses of *C. idella* juveniles to different sounds were compared by alternately broadcasting at both ends of the flume. The results showed that most of the experimental fish responded to the sound, and the roar of the *A. sinensis* had significantly different effects from other sound groups. In the single-frequency sound experimental group, the average number of responses was the largest when playing 500 Hz single-frequency sound, which was (1.7±0.6) times, while the average number of responses was as high as (5.0±0.9) times when playing the roar of *A. sinensis*, which was significantly higher than other experimental sounds. In the total average speed, the total average speed of *C. idella* in the broadband sound group was significantly higher than that in other groups, indicating that *C. idella* was sensitive to the roar of *A. sinensis* and escaped. Studies have shown that *C. idella* shows negative phonotaxis to the roar of the *A. sinensis*, and the roar of the *A. sinensis* is a sound that has a driving and deterrent effect on *C. idella*. This research can provide a reference for the auxiliary means of inducing fish in fish passing facilities and avoiding fish entrainment in water conservancy structures.

**Key words:** *Ctenopharyngodon idella*; juvenile; *Alligator sinensis*; negative phonotaxis; single frequency sound; broadband audio

**Corresponding author:** SHI Xiaotao. E-mail: [fishlab@163.com](mailto:fishlab@163.com)

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (52279069); Excellent Young and Middle-aged Science and Technology Innovation Team Project of Colleges and Universities in Hubei Province (T201703)