

doi: 10.7541/2021.2019.230

摄食声对草鱼幼鱼的诱集作用

王明云^{1,2} 沈修俊³ 任开元^{1,2} 石小涛² 田卫新² 刘国勇^{1,2}

(1. 三峡大学生物与制药学院, 宜昌 443002; 2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002;
3. 湖北省宜昌市当阳市王店镇农业服务中心, 宜昌 443002)

摘要: 以草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)幼鱼为实验对象, 进行了声音播放实验, 旨在探究草鱼幼鱼对水下录制的草鱼摄食浮萍声音(简称摄食声)的行为反应。以不播放声音的草鱼鱼群作为对照, 探讨了4种单频音(500、1000、2000和3000 Hz)和摄食声对草鱼游泳行为和在水槽内的分布的影响。结果表明: 在播放单频音时, 3min内草鱼的趋音游泳速度和逗留时间与对照组无显著性差异($P>0.05$); 在播放摄食声时, 3min内草鱼的趋音游泳速度和逗留时间显著高于4种单频音组和对照组($P<0.05$); 在播放单频音时, 20min内草鱼的平均游泳速度、水槽内的分布和趋音率与对照组无显著性差异($P>0.05$); 在播放摄食声时, 20min内草鱼的平均游泳速度和趋音率都显著高于4种单频音组和对照组($P<0.05$)。草鱼摄食声对草鱼幼鱼有诱集作用, 为声音诱鱼技术研究提供了科学依据。

关键词: 摄食声; 草鱼; 声音诱鱼; 单频音

中图分类号: Q959.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2021)01-0153-08



鱼类个体和种群的行为、分布和迁移直接或间接受到自然水域中诸多环境因子的影响^[1, 2], 环境因子对鱼类的生存和繁育、摄食和生长起着重要的作用^[3]。已有研究表明声音可以给鱼提供周围环境的诸多重要信息, 在鱼类信息交流、定向、觅食和防卫等方面发挥重要作用^[4, 5]。鱼类对声音的行为反应研究不仅应用于水产养殖^[6], 捕捞作业^[7], 驱赶鱼类远离取水口和物理拦栅等危险的区域^[8], 还可以防止生物入侵^[9, 10]。在鱼道和集运鱼船等过鱼设施中, 还能应用声音配合光和气泡幕来吸引或驱赶鱼类来提高过鱼效率^[9]。

为了选择合适的声音作为过鱼设施和取水口等位置的声源, 已有研究发现鱼类对厌恶的声音(如水下打桩声、船的马达声和敌害生物的声音)往往表现出躲避行为(负趋音行为), 其典型特征就是游动速度加快, 游到更深的水层或者离声源更远的地方^[11]。例如, Vetter等^[12, 13]研究表明船的马达声

可以使鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*Aristichthys nobilis*)产生远离声源的反应。Berthe等^[14]也发现船声可以使睛斑鳉(*Aetobatus ocellatus*)产生明显的逃避行为。灰鲷(*Lutjanus griseus*)会逃离播放水下打桩噪音的水域而游到相对安静的对照水域^[15]。鲱(*Sprattus sprattus*)和大西洋鲱(*Scomber scombrus*)随着水下打桩声强度的增加, 产生的躲避反应更强烈, 50%的鱼类产生躲避反应的声压级为163.3 dB^[11]。Wilson等^[16]通过对几种鲱亚科的鲱对模拟齿鲸发出超声波频率反应的研究, 发现鲱鱼能检测到齿鲸发出的超声波频率, 并产生强烈的躲避反应。

虽然国内外有关鱼类对厌恶的声音的负趋音行为反应已有许多报道, 但针对鱼类的正趋音行为(游向声源或聚集在声源附近)研究却较少, 而且相关研究局限于能发声的几种鱼类(如鳊鱼^[17]和丽鱼^[18]等), 以及对鱼类进行音响驯化的报道^[19]。

收稿日期: 2019-10-25; **修订日期:** 2020-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(51179096和51709152); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划鱼类过坝技术项目(T201703); 三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金(KF2015-07和KF2015-09)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (51179096, 51709152); the University Superior Midage Technology Innovation Team PPlan of Fish Passing Dam Program in Hubei Province (T201703); Open Foundation of Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region (KF2015-07, KF2015-09)]

作者简介: 王明云(1994—), 女, 硕士; 主要从事鱼类生态学研究。E-mail: 924467353@qq.com

通信作者: 刘国勇(1972—), 男, 博士; 主要从事鱼类生态学研究。E-mail: 278113027@qq.com

四大家鱼是长江流域重要的鱼类资源,在我国淡水渔业中具有重要地位。近年来由于多种因素的影响,长江流域的四大家鱼资源量显著减少^[20]。本文以草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)作为研究对象,通过声音播放实验研究鱼类对摄食声的行为反应,为诱集鱼类并帮助其通过过鱼设施提供科学的依据,也为草鱼的投喂管理及捕捞提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用的草鱼来自湖北省宜都市鱼种场,实验鱼健康,平均体长(均值±标准差)为(12.61±2.20) cm。200尾草鱼通过双层塑料氧气袋充气后运至三峡大学生态水工实验室。草鱼暂养在圆形玻璃钢水槽(直径2 m,水深0.5 m)内。暂养期间,水温控制在(19.5±1.4)℃,每天换水1/2左右,24h持续充氧。暂养7d后进行实验,实验鱼不重复使用,以防止产生适应性,影响实验结果的可靠性。

1.2 实验装置

声音播放实验在矩形实验装置中进行,实验装置主要包括实验水槽、声音播放系统及监控系统。实验水槽为5 m×2 m×1 m的矩形玻璃纤维水槽,槽内水深0.50 m。为了便于观察和精确定量实验鱼的游泳行为,用黑色记号笔在实验水槽底部画上等分线(图1)。声音播放系统由笔记本电脑、功放(XLS-1000 amplifier, Crown Audio)和水下扬声器组成。在距离水槽的一端0.95 m、距水槽侧壁0.4 m放置两个水下扬声器(UWS-045, 广州千叶水科技有限公司);为了减小震动,水下扬声器通过钢丝绳悬挂在离水槽底部0.03 m。监控系统由录像机和装置上方距离地面3.5 m处的一台红外摄像机(海康威视)组成,通过录像机对实验进行观察和记录数据。

1.3 供试声音

草鱼摄食声的录制在湖北省当阳市王店渔场

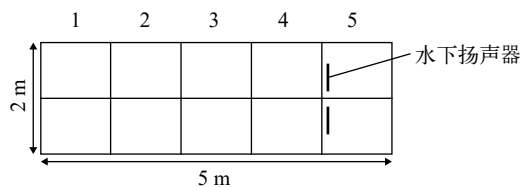


图1 实验装置示意图(俯视)

Fig. 1 Experimental apparatus (top view)

1—5为水槽区域,区域1—5为等距离分布

The number 1—5 referring to the regions in the tank and the region 1—5 are equally spaced

的草鱼育苗池中进行。育苗池为3 m×10 m×1.5 m的矩形土池,池内水深1.00 m。池内有体长为10—15 cm的草鱼幼鱼260尾,每天投喂鱼体重量的50%的浮萍(*Lemna minor*),分早晚2次投喂。录音系统由水听器(Reson TC 4032, Slangerup, Denmark)和数字录音机(Nagra SD, Audio Technology, Switzerland; 取样频率 44.1 kHz)组成。录音前草鱼空腹24h,录音前2h将水听器固定在投饵点下面和距离水面0.15 m的水中。投喂浮萍后开始录制草鱼摄食浮萍的声音,作为草鱼摄食声。采用Cool editor pro 2.1 软件对摄食声进行快速傅里叶(FFT)转换并绘制频率图谱。用Cool editor pro 2.1软件分别合成4种单频音(500、1000、2000和 3000 Hz)。

为了描绘水槽内播放供试声音后的声场特征,将水听器连接到声级计,分别测量了播放4种单频音和摄食声时的声场,及不播放任何声音时(空白对照)水槽内的声场。从靠近水下扬声器的水槽一端开始,每隔0.5 m布置一个测量断面,并在每个横断面上平均分布5个垂线(包括水槽边沿)进行测量,共计55个测点。所有测点离水槽底部约0.15 m。将所有测出的声压点运用自然零点法插值,用origin 8.1软件绘制出声场图。

1.4 实验方法

根据崑山良己^[21]指出的声诱集鱼类的水中声压级为110—130 dB re 1 μPa (后文声压级的单位均简写为dB)。通过功放(XLS-1000 amplifier, Crown Audio)来调控播放声音的强度,本次实验播放声音的声源强度通过声级计(AWA6291, 杭州爱华, 中国)测量为130 dB。

将充氧曝气36h后的自来水作为实验用水,在实验开始前将水槽中水温调节至与暂养水槽中水温一致。关闭增氧机,随机选取5尾鱼作为一个鱼群,放入实验水槽中让其适应2h后开始播放声音。实验中录制播放声音前20min,及播放声音中的20min的行为反应。同一群实验鱼不重复使用,每个处理重复6次,实验在8:00—18:30开展。空白对照组为不播放声音的实验鱼,除了不播放声音以外、空白对照组的实验方法与各声音处理组相同。

1.5 数据处理

本实验中的视频通过logger pro3.13 软件进行逐帧分析并获取实验数据,以不播放声音时鱼的行为作为对照。由于整个实验中5条鱼聚集程度高(两两之间的距离小于15 cm),以鱼群的重心移动速度作为鱼群游泳速度。基于“两点法”使用像素矢量位移优化法,计算出鱼群在水槽内的游泳速度^[22]。

游泳速度按照以下公式计算:

$$V = \frac{D \cdot fps}{fi}$$

式中, D 为鱼群实际位移距离; fps 为视频每秒传输帧数; fi 为完成矢量位移所用帧数; V 为游泳速度, 单位(m/s)

数据处理工作分为两步: 第一步, 对播放声音开始3min内的逗留时间和趋音游泳速度进行分析: (1)趋音游泳速度: 在3min内鱼群游向声源区的最大游泳速度。(2)逗留时间: 从鱼群第一次到达4—5区开始到离开4—5区域所用的时间; 第二步, 统计播放声音后20min内的水槽中的分布、平均游泳速度、各区域停留时间和趋音率。其中, 停留时间是鱼从到达该区域至离开该区域的时间。

趋音率 (η) 为草鱼在不同供试声音暴露下的趋音反应程度,

$$\eta = \frac{t_i}{T} \times 100\%$$

式中, t_i 为实验鱼在规定水槽区域内的游动时间, i 为区域4—5; T 为实验总时间。

鱼群在水槽中的分布是通过logger pro3.13 软件分析获得, logger pro3.13 软件打点的时间间隔为1s, 记录鱼每秒在水槽各部分所处的位置, 然后将位置坐标导入绘制的声场图中。

实验所得数据用SPSS Statistics 19软件来分析, 统计值使用平均值±标准差(Mean±SD)表示, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同声音处理条件下(空白对照组, 4个单频音组和摄食声组)的行为指标及分布是否存在显著的差异。

2 结果

2.1 水槽中的声场及摄食声的频谱

草鱼在摄食浮萍的过程中产生的摄食声频率范围在 200—11000 Hz, 主频率在200—4000 Hz, 频率峰值在1200 Hz 左右(图2)。

声压级在靠近水下扬声器的区域最高, 离扬声器的越远, 声压级越小。播放水下摄食声时最大的声压级为靠近水下扬声器的前方及两个扬声器之间, 为130 dB, 到另一端时声压级降为112 dB; 在播放1000 Hz单频音时最大的声压级为靠近水下扬声器的前方及两个扬声器之间, 为130 dB, 到另一端时声压级降为98 dB; 在不播放任何声音时, 水槽内的声压级为65—83 dB。

2.2 3min内鱼群的行为

在不播放任何声音时鱼群的游向声源区的趋音游泳速度为(0.588±0.023) m/s。在播放单频音的

实验中, 约15%鱼群在开始播放声音的30s内游离水下喇叭, 而后沿着水槽边壁缓慢游动; 85%的鱼群对单频音声音没有反应, 实验鱼要么静止在原地, 要么是沿着水槽边壁来回游动。在播放单频音的3min内鱼群游向声源区的趋音游泳速度为0.5—0.7 m/s(图3)。各单频音与空白对照在3min内鱼群游向声源区的趋音游泳速度不存在显著差异($P>0.05$)。在播放摄食声实验中, 开始播放声音的30s内鱼群游至水下喇叭附近并停留在喇叭附近, 而后围绕水下扬声器游动。在播放摄食声的3min内鱼群游向声源区的趋音游泳速度为(1.23±0.21) m/s, 鱼群趋音游泳速度显著高于空白对照及各单频音($P<0.05$, $F=28.634$)。

在不播放任何声音的3min内鱼群在区域4—5的逗留时间为(77.6±16.8)s, 在播放500、1000、

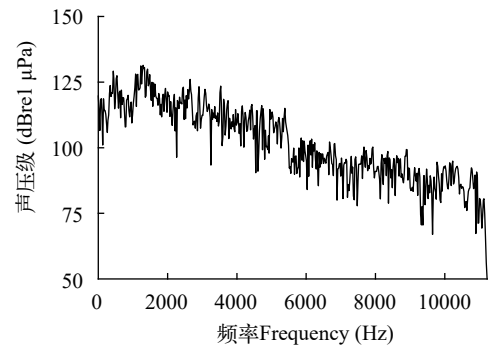


图2 草鱼摄食浮萍的声音频谱图

Fig. 2 The power spectrum of sounds during feeding of *Lemna minor* from *Ctenopharyngodon idellus*

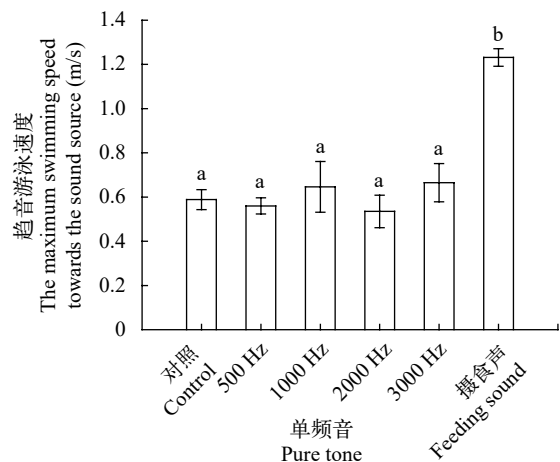


图3 实验鱼在播放声音3min内的趋音游泳速度

Fig. 3 The maximum swimming speed towards the different sound source in the first three minutes

不同字母则表示差异显著($P<0.05$); 下同

Means with different lowercase letters are significantly different ($P<0.05$). The same applies below

2000 和 3000 Hz 等单频音的 3min 内鱼群在区域 4—5 的逗留时间分别为 (79.8±12.4)s、(81.2±15.3)s、(80.2±17.4)s、(75.9±11.6)s (图 4)。各单频音组与空白对照组在最初播放声音的 3min 内鱼群在区域 4—5 的逗留时间不存在显著差异 ($P>0.05$)。在播放摄食声的 3min 内鱼群在区域 4—5 的逗留时间为 (136.7±12.6)s, 最初播放声音的 3min 内鱼群在区域 4—5 的逗留时间显著高于空白对照及各单频音 ($P<0.05$, $F=126.77$)。

2.3 20min 内鱼群的行为

在不播放任何声音的空白对照组中, 大多数时间里鱼群沿着水槽边壁缓慢游动或者在水槽某一位置静止不动, 小部分群体在槽内作无规则游动 (图 5a)。

在播放单频音的 20min 内的大多数时间里鱼群沿着水槽边壁缓慢游动或者在水槽某一位置静止不动, 小部分时间内鱼群在水槽中央作无规则游动, 极少数鱼群靠近喇叭附近 (图 5b, 版面所限, 仅绘其中 1000 Hz 一例)。

在播放摄食声的 20min 内, 约 50% 的时间里鱼群沿着水槽边壁缓慢游动或者在水槽某一位置静止不动, 约 50% 的时间里鱼群围绕着喇叭附近作椭圆形运动 (图 5c)。

在不播放任何声音的空白对照组中, 鱼群停留在区域 1 和区域 5 的时间更长, 而停留在区域 2、区域 3 和区域 4 的时间短; 播放 4 种单频音 (500、1000、2000 和 3000 Hz) 时, 鱼群在水槽各区域的停留时间与对照组一致, 即停留在区域 1 和区域 5 的时间长, 停留在区域 2、区域 3 和区域 4 的时间短 (表 1)。但是在播放摄食声时, 鱼群在区域 4 和区域 5 的停留

时间比鱼群在区域 1、区域 2 和区域 3 的时间长; 其中鱼群在区域 4 和区域 5 的停留时间高于空白对照组和各单频音组 (表 1)。

草鱼幼鱼群对摄食声的趋音率最高, 为 (70.38±0.94)%, 500 Hz 次之, 2000 Hz 的趋音率最低 (图 6)。各单频音组 (500、1000、2000 和 3000 Hz) 与空白对照组的趋音率无显著性差异 ($P>0.05$), 但是播放摄食声时草鱼幼鱼群趋音率显著高于空白对照和单频音实验组 ($P<0.05$)。

不播放任何声音的空白对照, 20min 内鱼群的平均游泳速度为 (0.064±0.008) m/s; 在播放单频音的 20min 里, 20min 内草鱼鱼群的平均速度为 (0.058—0.082) m/s, 各单频音组 (500、1000、2000 和 3000 Hz) 的平均速度与对照组无显著性差异 ($P>0.05$, 图 7)。但是在播放摄食声时, 20min 内鱼群平均游泳速度达到 (0.117±0.003) m/s, 显著高于空白对照组和各单频音组 ($P<0.05$, $F=6.731$)。

3 讨论

3.1 实验鱼的趋音性

Popper 等^[23]指出趋音性指动物对声音刺激产生定向运动的特性, 正趋音性表现为朝向声源的定向运动或聚集在声源附近, 负趋音性表现为远离声源的运动。同一种鱼类对不同声音会产生不同的反应, 表明鱼类具有辨别不同声音的能力^[23]。而影响鱼类辨声能力可能与其是否具有特殊的听觉辅助结构, 如韦伯氏器有关^[24], 也与声音所携带的生理意义有关^[17]。

鱼类接受到食物的嗅觉刺激后, 会选择不同的方式趋向食物刺激源^[25]。竹村暘等^[26]的相关研究也表明鱼类接受到摄食声的听觉刺激后, 鱼类也会趋向食物刺激源。殷雷明^[22]使用摄食声诱集大黄鱼的研究中, 播放摄食声的 1min 内大黄鱼也出现了游向声源区的游泳速度增加、在声源区附近停留时间增加的现象。在本研究中, 播放摄食声的最初 3min 内的趋音游泳速度、在区域 4—5 的逗留时间等都显著高于空白对照组和 4 种单频音组 (图 3 和图 4)。在播放 4 种单频音的 20min 内, 鱼群在水槽各区域的停留时间与对照组相一致, 停留时间在区域 1 和区域 5 的时间更长; 实验鱼在水槽边壁的时间停留比较长, 这与鱼群的贴壁行为相一致^[27, 28]。然而在播放摄食声时, 鱼群停留在靠近声源的区域 4—5 的时间更长。在播放摄食声的 20min 内, 约 50% 的时间里鱼群围绕声源做椭圆形运动, 可见摄食声改变了鱼群在各区域的停留时间, 鱼群向声源附近靠近, 在此区域聚集成群, 此结果说明摄

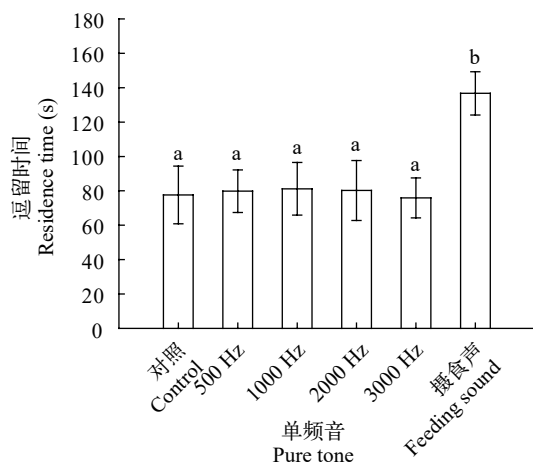


图 4 实验鱼在播放声音 3min 内在区域 4—5 的逗留时间

Fig. 4 The sojourn time of experimental fish in region 4 and 5 of the tank in the first three minutes under different sounds

食声对鱼群具有较好的诱集作用(图 5、图 6、图 7 和表 1)。张沛东等^[19]使用 400 Hz 正弦波, 结合投饵对草鱼进行了音响驯化, 5d 后草鱼聚集率可达 100%。音响驯化需要播放声音配合投饵来驯化一定周期, 使鱼对供试的声音形成条件反射后才能产生诱集作用。而在本研究中, 播放摄食声后不需要投饵, 就能诱集草鱼。这与竹村喝等^[26]使用摄食声

诱集五条鲮和鲤及殷雷明^[22]使用摄食声诱集大黄花的研究结果一致。这些研究表明摄食声是通过在自然界的摄食行动中而形成的具有特定生理意义的刺激信号——报食信号, 不需要驯化, 对鱼类有天然的诱集作用。

3.2 摄食声诱集作用的可能机制

一些研究表明, 对幼鱼进行摄食声诱集时, 诱

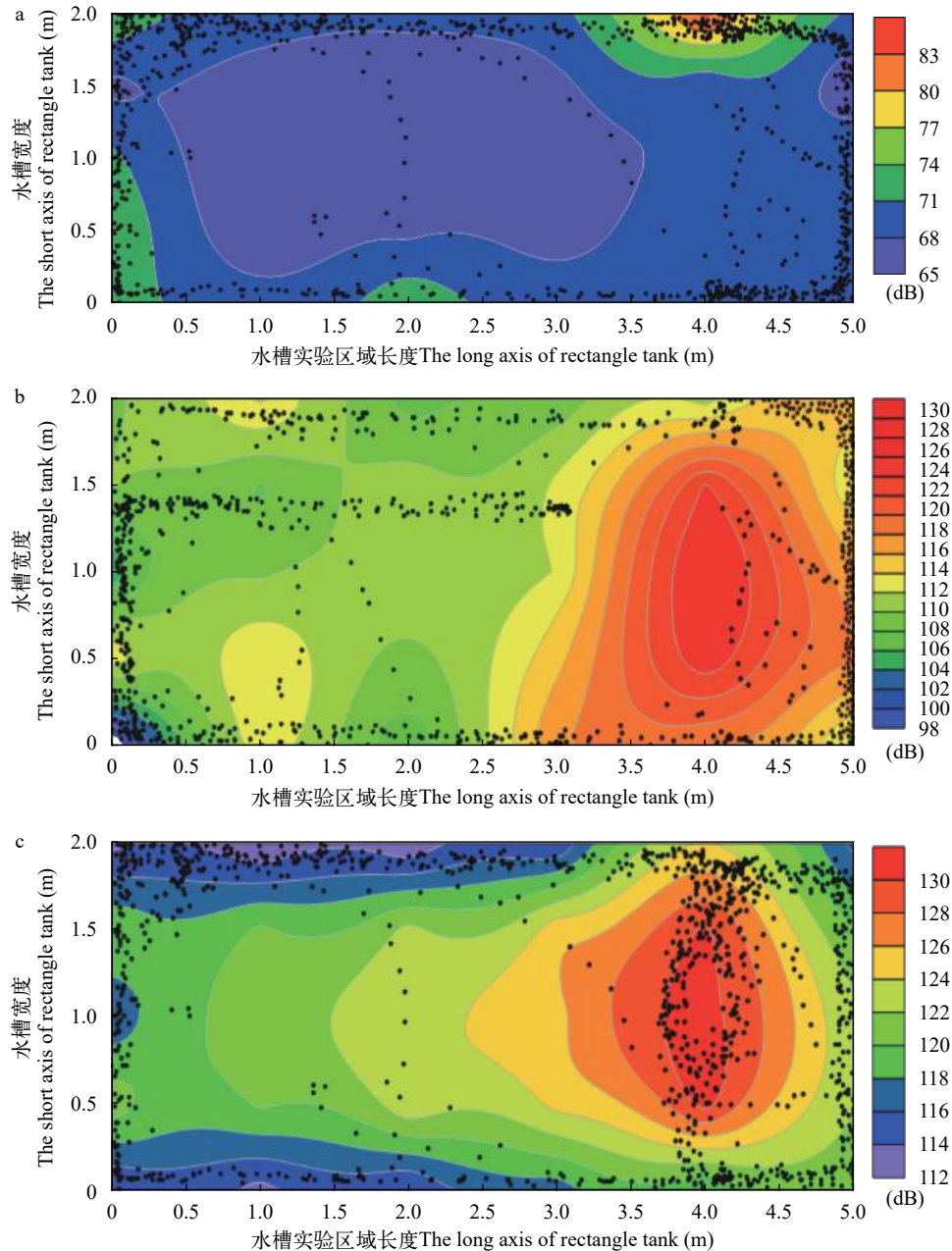


图 5 播放不同声音时水槽中的声场和鱼群重心分布散点图

Fig. 5 Sound pressure level and distribution of experimental fish in the tank under different sounds

彩色云图表示声场图, 声场图中各颜色所对应的声压级用右边的比尺表示; 黑点表示鱼群的重心, 散点图记录每秒鱼群的重心在水槽中的位置。a. 空白对照; b. 1000 Hz 单频音; c. 摄食音

The sound intensity level (dB re 1 μ Pa) was plotted during the control and the active broadcast of underwater speakers. The colors represented the sound intensity level, indicated in the scale on the right. Black spot represent the core of fish group. The distribution of the core of fish group at each second was shown in the scatter plot. a. Control; b. 1000 Hz; c. Feeding sounds

表 1 不同声音下鱼群在试验水槽各区域的停留时间

Tab. 1 Time of the distribution of experimental fish in different areas of the tank under different sounds in the 20 minutes of playbacks (s)

组 Group	区域1 Region 1	区域2 Region 2	区域3 Region 3	区域4 Region 4	区域5 Region 5
空白 Control	413.0±8.38 ^b	124.4±13.28 ^b	106.6±16.81	157.6±14.80 ^a	398.4±23.62
500 Hz	353.0±10.58 ^b	117.6±16.11 ^a	140.4±16.85	171.2±5.97 ^a	418.1±8.69
1000 Hz	347.4±12.46 ^b	141.8±10.74 ^b	140±7.62	152.2±13.85 ^a	418.6±25.95
2000 Hz	395.6±22.68 ^b	137.8±4.50 ^b	119±14.29	154.0±26.40 ^a	393.6±12.51
3000 Hz	378.6±23.85 ^b	133.1±19.15 ^b	127.8±17.04	132.8±16.17 ^a	428.0±17.96
摄食声 Feeding Sound	129.8±17.21 ^a	102.2±13.50 ^a	123.4±11.28	389.6±5.31 ^b	455.4±9.10

注: 平均数后上标小写字母不同表示处理组间差异显著($P<0.05$)

Note: Values in the same column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$)

集效果由高到底依次为: 摄食原声>摄食噪声>单频音^[22]。摄食原声包括: 低频带宽范围内的饵料落水声、鱼群争食声和争夺饵料过程的加速游泳噪声; 高频带宽范围内吞食和咀嚼饵料的噪声, 及环境噪声。摄食原声较完整地还原从投饵到摄食过程的“声境”, 因此, 摄食原声的诱集效果最好。本实验结果与殷雷明^[22]的实验结果类似, 也发现摄食原声有较好的诱集作用。

Richard^[29]发现低频脉冲音可以模拟肉食性鱼类活跃捕食时的水流扰动声, 该声音能吸引多种肉食性鱼类; 而草食性的岩礁鱼类(Reef fish)则不被这种模拟声音吸引。这表明与鱼类摄食活动有关的声音(如游动声、咀嚼声)对不同种鱼类的诱集效果, 可能跟该声音与特定鱼类在自然条件下的摄食“声境”之间的相似程度有关。相似程度大, 则诱集作用强; 反之亦然。本研究中使用草鱼摄食天然饵料的的声音作为诱集声音, 人工养殖的草鱼幼鱼一般投喂硬颗粒饵料, 很难有机会接触到浮萍等天然饵料。而本研究表明草鱼摄食天然饵料——浮萍的摄食声对人工养殖的草鱼幼鱼也有诱集作用, 这可能是由于摄食天然饵料的摄食声中含有的鱼群争食声、加速游泳噪声、吞食和咀嚼饵料的噪声, 与摄食硬颗粒饵料的摄食声中含有较多相似的成分^[22], 这也暗示草鱼摄食浮萍的摄食声在一定程度上可以模拟草鱼摄食其他饵料的声音, 而草鱼摄食浮萍的摄食声对其他草食性和杂食性鱼类是否具有诱集作用, 需要进一步研究。

一些学者研究声音对鱼的诱集作用时, 发现仅仅声音刺激、而没有实物或者视觉或嗅觉等的辅助时, 鱼类不会发生趋音反应或者会逐渐丧失最初的趋音反应。例如, Estramil等^[18]发现仅仅暴露于同种类的叫声时, 丽鱼(*Pundamilia nyererei*)不会产生趋音反应, 而如果同类的叫声伴随着同类的视觉信息时, 丽鱼会产生趋音反应^[30]。花鲈(*Lateolabrax japonicus*)和丝背细鳞鲷(*Stephanolepis cir-*

rhifer)在最初接受摄食声刺激的5min内有正趋音反应, 继续接受摄食声刺激而没有食物奖励的情况下, 超过10min后就会离开声源^[31]。殷雷明^[22]在用摄食声诱集大黄鱼研究中, 发现在1min内的诱集率和诱集停留时间都低于结合投饵的音响驯化。因此提出“放声配合饵料”才是提高摄食声诱集效果的关键。在本研究中, 播放摄食声音3min内和20min内有少部分实验鱼离开水下扬声器附近(图5c), 可能也是由于只有摄食声、而没有饵料奖励, 少部分实验鱼逐渐丧失最初的趋音反应。

在一些鱼类趋音行为的研究中, 研究者往往考察短时间内鱼的反应。例如, 殷雷明^[22]研究播放摄食声1min内大黄鱼的行为反应, Rollo等^[32]对圆颌虎鱼播放求偶声, 考察5min内的反应。更长时间的声音暴露的效应则很少研究, 而更长时间的声音暴露可能更有应用价值^[33]。在本研究中, 在20min的放音时间内, 70%的时间段内草鱼围绕在声源附近的区域(图6), 平均游速也显著高于单频音和空白对照(图7), 表明在20min内摄食声对草鱼仍具有较强的诱集作用。

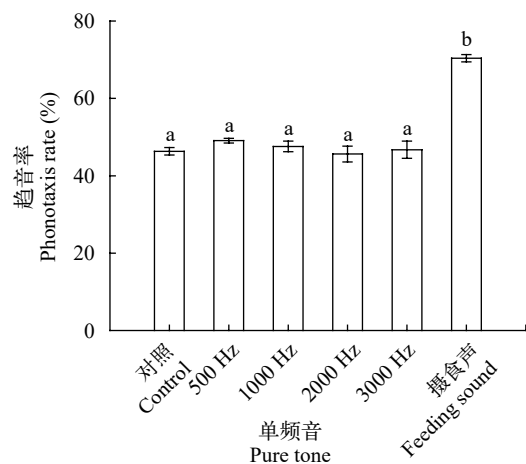


图 6 不同声音下草鱼的趋音率

Fig. 6 Phonotaxis rate of experimental fish under different sounds in the 20 minutes of playbacks

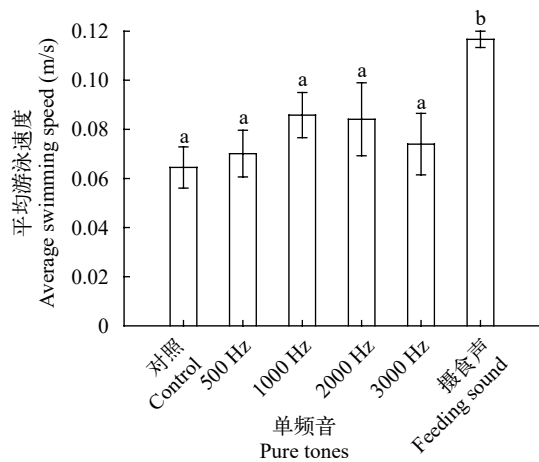


图7 实验鱼在播放声音20min内的平均游泳速度

Fig. 7 Average swimming speed of experimental fish under different sounds in the 20 minutes of playbacks

参考文献:

- [1] Picciulin M, Sebastianutto L, Codarin A, *et al.* In situ behavioural responses to boat noise exposure of *Gobius cruentatus* (Gmelin, 1789; fam. Gobiidae) and *Chromis chromis* (Linnaeus, 1758; fam. Pomacentridae) living in a marine protected area [J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 2010, **386**(1): 125-132.
- [2] Zhang N, Lin C Y, Xu J W, *et al.* The effect of water flow on the phototaxis of juvenile grass carp [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(6): 1253-1261. [张宁, 林晨宇, 许家炜, 等. 水流对草鱼幼鱼趋光行为的影响 [J]. *水生生物学报*, 2019, **43**(6): 1253-1261.]
- [3] Fay R R, Popper A N. Evolution of hearing in vertebrates: the inner ears and processing [J]. *Hearing Research*, 2000, **149**(1): 1-10.
- [4] Slabbekoorn H, Bouton N, Opzeeland I V, *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.
- [5] Casper B M, Smith M E, Halvorsen M B, *et al.* Effects of exposure to pile driving sounds on fish inner ear tissues [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2013, **166**(2): 352-360.
- [6] Papoutsoglou S E, Karakatsouli N, Papoutsoglou E S, *et al.* Common carp (*Cyprinus carpio*) response to two pieces of music ("Eine Kleine Nachtmusik" and "Romanza") combined with light intensity, using recirculating water system [J]. *Fish Physiology & Biochemistry*, 2010, **36**(3): 539-554.
- [7] Frangky E K, Yasuhisa M, Yuichi Y, *et al.* Studies on underwater sounds produced by yellowtail *Seriola quinqueradiata* and amberjack *Seriola dumerili* in net pens at culture grounds in Middle Kagoshima Bay [J]. *Fisheries Science*, 1998, **64**(3): 353-358.
- [8] Ross Q, Dunning D, Menezes J, *et al.* Reducing impingement of alewives with high-frequency sound at a power plant intake on Lake Ontario [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 1996, **16**(3): 548-559.
- [9] Ruebush B C, Sass G G, Chick J H, *et al.* In-situ tests of Sound-Bubble-Strobe Light Barrier technologies to prevent range expansions of Asian carp [J]. *Aquatic Invasions*, 2012, **7**(1): 37-48.
- [10] Dennis C E, Zielinski D P, Sorensen P W. A complex sound coupled with an air curtain blocks invasive carp passage without habituation in a laboratory flume [J]. *Biological Invasions*, 2019, **21**(9): 2837-2855.
- [11] Hawkins A D, Roberts L, Cheesman S. Responses of free-living coastal pelagic fish to impulsive sounds [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, **135**(5): 3101-3116.
- [12] Vetter B J, Murchy K A, Cupp A R, *et al.* Acoustical deterrence of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) to a broadband sound stimulus [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2016, **43**(1): 163-171.
- [13] 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.
- [14] Berthe C, Lecchini D. Influence of boat noises on escape behaviour of white-spotted eagle ray *Aetobatus ocellatus* at Moorea Island (French Polynesia) [J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2016, **339**(2): 99-103.
- [15] Everley K A, Radford A N, Simpson S D. Pile-driving noise impairs antipredator behavior of the European sea bass *Dicentrarchus labrax* [J]. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2015(875): 273-279.
- [16] Wilson M, Schack H B, Madsen P T, *et al.* Directional escape behavior in Allis shad (*Alosa alosa*) exposed to ultrasonic clicks mimicking an approaching toothed whale [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2011, **214**(Pt 1): 22-29.
- [17] Lugli M, Pavan G, Torricelli P. The response of the male freshwater goby to natural and synthetic male courtship sound playback following exposure to different female sexual stimuli [J]. *Monitore Zoologico Italiano-Italian Journal of Zoology*, 2004, **16**(1): 55-70.
- [18] Estramil N, Bouton N, Verzijden M N, *et al.* Cichlids respond to conspecific sounds but females exhibit no phototaxis without the presence of live males [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2014, **23**(3): 305-312.
- [19] Zhang P D, Zhang G S, Zhang X M, *et al.* Effects of acoustic domestication on carp and grass carp [J]. *Journal of Jimei University (Natural Science Edition)*, 2004, **9**(2): 110-115. [张沛东, 张国胜, 张秀梅, 等. 音响驯化对鲤鱼和草鱼的诱引作用 [J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2004, **9**(2): 110-115.]
- [20] Cao W X. Several issues concerning the protection of fish

- resources in the Yangtze river basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2008, **17**(2): 163-169. [曹文宣. 有关长江流域鱼类资源保护的几个问题 [J]. *长江流域资源与环境*, 2008, **17**(2): 163-169.]
- [21] Hatakeyama. The auditory ability of fish [J]. *Fisheries Engineering*, 1992(19): 111-119. [畠山良己. 魚の聴覚能力 [J]. *水産工学*, 1992(19): 111-119.]
- [22] Yin L M. Study on the behavior and mechanism of phonoattractor in yellow croaker [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017: 47-69. [殷雷明. 大黄鱼声诱集行为反应与机理研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 47-69.]
- [23] Popper A N, Carlson T J. Application of sound and other stimuli to control fish behavior [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1998, **127**(5): 673-707.
- [24] Ladich F, Fay R R. Auditory evoked potential audiometry in fish [J]. *Reviews in Fish Biology & Fisheries*, 2013, **23**(3): 317-364.
- [25] Jones K A. Food Search Behaviour in Fish and the Use of Chemical Lures in Commercial and Sports Fishing [M]// Hara T J (Eds.). *Fish Chemoreception*. Fish & Fisheries Series, vol 6. Dordrecht: Springer, 1992: 288-320.
- [26] Takemura A, Nishida N, Kobayashi Y. The effect of natural sounds on food attraction of fish [J]. *Nagasaki University's Academic Output SITE*, 1988, **63**(3): 1-4. [竹村 昶, 西山知照, 小林洋一. 魚類の摂餌音の誘引効果について [J]. 長崎大学水産学部研究報告, 1988, **63**(3): 1-4.]
- [27] Kane A S, Salierno J D, Gipson G T, *et al.* A video-based movement analysis system to quantify behavioral stress responses of fish [J]. *Water Research*, 2004, **38**(18): 3993-4001.
- [28] Lockwood B, Bjerke S, Kobayashi K, *et al.* Acute effects of alcohol on larval zebrafish: a genetic system for large-scale screening [J]. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, 2004, **77**(3): 647-654.
- [29] Richard J D. Fish attraction with pulsed low-frequency sound [J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1968, **25**(7): 1441-1452.
- [30] Verzijden M N, Ripmeester E A P, Ohms V R, *et al.* Immediate spectral flexibility in singing chaffinches during experimental exposure to highway noise [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2010, **213**(15): 2575-2581.
- [31] Kim D S, Yun G D. The spectrum of feeding sound and the response of seabass, filefish and swellfish [J]. *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*, 1982, **18**(2): 71-75.
- [32] Rollo A, Andraso G, Higgs J D. Attraction and localization of round goby (*Neogobius melanostomus*) to conspecific calls [J]. *Behaviour*, 2007, **144**(1): 1-21.
- [33] Filiciotto F, Giacalone V M, Fazio F, *et al.* Effect of acoustic environment on gilthead sea bream (*Sparus aurata*): Sea and onshore aquaculture background noise [J]. *Aquaculture*, 2013, **414**(2): 36-45.

THE ATTRACTIVE EFFECT OF FEEDING SOUND TO JUVENILE GRASS CARP *CTENOPHARYNGODON IDELLUS*

WANG Ming-Yun^{1,2}, SHEN Xiu-Jun³, REN Kai-Yuan^{1,2}, SHI Xiao-Tao², TIAN Wei-Xin² and LIU Guo-Yong^{1,2}

(1. College of Biological & Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Agricultural Services Center of Wangdian Town in Dangyang County, Yichang 443002, China)

Abstract: To assess the effect of feeding sound on behaviors of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*), the recorded underwater feeding sounds of natural food *Lemna minor* by 10—15 cm body length grass carps were played back to the experimental fish in phonotaxis experiments. The fish swimming behaviors and distributions in the experimental tank after exposures to different sounds (pure tones 500—3000 Hz and the feeding) were investigated in a fibre-glass tank using no sound playing as a control. The results showed that the fish exposed to the feeding sound had the highest swimming speed towards the sound source after 3 minutes and the longest sojourn time in region 4 & 5 closest to the sound source, while the fish exposed to the pure tone had same swimming speed towards the sound source and same sojourn time in region 4 & 5 as the control. In the 20 minutes of playbacks, the fish exposed to the feeding sound had the highest average swimming speed and the longest time of distribution in region 4 & 5, compared with the control and the fish exposed to the pure tones. Our results indicated that feeding sounds had attracting effect on juvenile grass carps. These findings provide scientific basis for acoustic attracting fish.

Key words: Feeding sound; *Ctenopharyngodon idellus*; Acoustic attractant; Pure tones