

DOI: 10.12264/JFSC2023-0061

星斑篮子鱼幼鱼的听觉阈值

张旭光¹, 张沈威¹, 唐贤明², 章守宇¹

1. 上海海洋大学海洋牧场工程技术研究中心, 上海 201306;
2. 海南省海洋与渔业科学院, 海南省热带海水养殖技术重点实验室, 海南 海口 571126

摘要: 为了开发一种可行的声音威慑的鱼类行为控制方法以减少篮子鱼对藻类的啃食, 需测定鱼类对声音的感知能力。本研究通过测定听觉诱发电位(auditory evoked potential, AEP), 研究了 14 尾不同体长星斑篮子鱼(*Siganus guttatus*)幼鱼在声音刺激下的脑电反应模式, 基于脑电反应特征确定了星斑篮子鱼幼鱼听觉频率敏感性和对应阈值。结果表明: 星斑篮子鱼幼鱼在频率范围 100~800 Hz 的声音刺激下均表现出明显的听觉诱发电位, 其 AEP 波形幅值随着刺激声音强度的增加而增加; 听觉阈值也随着频率增加而增加, 且对 100~300 Hz 的低频声音较为敏感, 听觉最敏感频率为 200 Hz, 平均听觉阈值为 104 dB; 不同体长个体的听觉敏感性在 200~300 Hz 内出现明显差异, 其中体长大于 4.5 cm 的篮子鱼听觉阈值要明显小于体长小于 4.5 cm 的个体。这表明随着个体发育, 较大体长的鱼听觉阈值也较低, 这可能与它们的听觉器官的发育完善程度有关。总体而言, 星斑篮子鱼幼鱼的听觉较敏感, 听觉阈值低至 100 dB 左右, 与环境背景噪声的强度相接近。因此, 利用声音威慑星斑篮子鱼的声源强度需求低, 可行性强, 可以减少海藻类被啃食的概率, 从而降低海藻养殖的经济损失。

关键词: 星斑篮子鱼; 声音威慑; 听觉诱发电位; 行为控制

中图分类号: 917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)07-0813-08

篮子鱼科(Siganidae)鱼类隶属鲈形目(Perciformes), 是广泛分布于印度-西太平洋海域热带、亚热带珊瑚礁和岩礁区的广盐性鱼类^[1]。在我国东海、南海海域, 篮子鱼种类较为丰富, 达 11 种, 其中长鳍篮子鱼(*Siganus canaliculatus*)、褐篮子鱼(*Siganus fuscescens*)和星斑篮子鱼(*Siganus guttatus*)数量较多^[2]。篮子鱼大多喜食各种海藻, 兼食动物性饵料, 是杂食性鱼类^[2]。渔业生产中通常利用篮子鱼的食藻习性来清除养殖网箱的附着藻类和养殖水域的藻类^[3]。在天然海域, 篮子鱼也可通过啃食珊瑚礁藻类来被动调节珊瑚礁和藻类的竞争关系, 促进珊瑚礁的健康生长^[4]。然而, 篮子鱼对天然海藻的大量啃食也会加剧海藻场的衰退, 尤其

是篮子鱼幼鱼, 喜成群活动, 对海藻场的形成产生巨大的压力, 直接降低了海藻场的生态作用^[5]。同时, 篮子鱼对如龙须菜、紫菜和麒麟菜等人工养殖藻类的摄食, 对当地的藻类养殖经济造成了损害^[5-7]。崔莹等^[8]通过同位素生物标志物研究了海南海域的长鳍篮子鱼和星斑篮子鱼的食性, 发现长鳍篮子鱼的食物包括小型海藻和动物性饵料, 而星斑篮子鱼则以大型海藻为主。相比而言, 星斑篮子鱼对大型海藻场的危害更大。在海藻场受到人类活动的破坏和篮子鱼啃食双重压力的情况下, 控制星斑篮子鱼食藻行为, 对于减少星斑篮子鱼对目标海藻的啃食, 保护脆弱的海藻场生态系统具有重要意义^[5-7]。

收稿日期: 2023-03-19; 修订日期: 2023-06-29.

基金项目: 现代农业产业技术体系资助项目(CARS-50); 海南省重点研发项目(ZDYF2020176).

作者简介: 张旭光(1980-), 男, 副教授, 从事鱼类感觉行为学研究. E-mail: xg-zhang@shou.edu.cn

通信作者: 唐贤明, 研究员, 研究方向为养殖生态与环境, E-mail: hn.tangxm@aliyun.com; 章守宇, 教授, 研究方向为海洋牧场工程技术, E-mail: syzhang@shou.edu.cn

目前,对篮子鱼食藻行为的控制研究主要集中在不同藻类次级代谢物的化学威慑方面^[9-11]。Dale 等^[10]发现巨大鞘丝藻(*Lyngbya majuscula*)的次级代谢物 Ypaoamide 能有效抑制刺篮子鱼(*Siganus spinus*)和银篮子鱼(*Siganus argenteus*)的摄食,但摄取过多的 Ypaoamide 也会造成篮子鱼中毒或死亡。羽藻属藻类(*Bryopsis* sp.)可通过与细菌共生产生脂肪酸肽毒素 Kahalalides 来减少被啃食的概率^[11]。在生产中,养殖户也使用茶籽饼等进行化学威慑^[7],但因为茶籽饼对环境的污染而被禁止。这些化学物质的使用一方面会造成水体化学污染,对鱼类等水生动物产生中毒反应;另一方面,在开放水域会由于水流的影响而导致浓度降低,减弱化学威慑的有效距离和效果。对星斑篮子鱼摄食浒苔的行为观察发现,星斑篮子鱼听到声音会立即停止摄食迅速游至深水处,表明它们对声音和振动敏感^[6]。因此,声音威慑可能是一种可行的星斑篮子鱼新型驱离方式。相对于化学物质,声音对环境及生物有害影响较小,而且声音在水下传播的速度较快,可以更快速地实现大范围内鱼类驱离^[12]。Adam 等^[13]和 Piper 等^[14]用 12 Hz 低频声音对水力发电站入口处的欧洲鳗鲡(*Anguilla anguilla*)进行了声驱离实验,发现 78% 的欧洲鳗鲡远离了水电站入口,而进入的鳗鲡行为方式也发生明显改变,其中调头和徘徊的行为明显增加,表明了声音威慑对鱼类驱离的有效性。利用声音进行威慑的前提是确定鱼类的能听到的频率范围,进而选择合适的声音频率^[12,15]。本研究利用听觉诱发电位法研究了星斑篮子鱼对声音频率的敏感性,旨在后续进行声学威慑提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用星斑篮子鱼由海南空运至上海,全长 3.8~5.0 cm,平均体重 0.77~1.51 g。实验鱼暂养在直径为 120 cm 的圆形循环水槽中,水温设置为 25 ℃,盐度控制在 31,正常自然光照,暂养期间投喂人工颗粒饲料。实验前选取活力较好且无外伤的篮子鱼进行听觉实验。

1.2 实验方法

利用听觉诱发电位法研究鱼类的听觉,其主要原理是利用不同频率的声音刺激并诱发鱼类的脑电信号,并根据脑电信号的波形和幅值特征来判断实验鱼是否听到声音信号^[12,15-16]。实验系统主要包括隔音系统、声刺激系统、声音校正系统和数据记录系统(图 1)。实验鱼由自制的夹持器固定在半径为 25 cm 的圆形水槽中,头背部露出水面 1~2 mm,并通过循环蠕动呼吸泵对实验鱼进行人工灌流,以保持其生命活力。水槽放置在隔音室(2.5 m×2.5 m×2 m,上海声诺)内的防震台(ZDT07-07,江西连胜)上,以减少外界噪声干扰。隔音室内的背景噪声为 25 dB。

声音刺激通过信号发生器(SigGenRZ, Tucker Davis Technologies, TDT, 美国)设置产生,通过信号衰减器后输送至功率放大器(D75A, Crown, 英国),再与水槽底部的水下扬声器(UW-30, University Sound, 美国)相连。声音刺激设置为 100、200、300、400、600、800 Hz 的短纯音,时程 30 ms,声压为 140 dB,以 3 dB 的梯度递减至 70 dB。为消除刺激信号伪迹,设置了两个相位相反的刺激声音进行波形叠加平均处理。实验时,将一个水听器[8103, B&K, 丹麦,灵敏度 -211 ± 2 dB re 1V/ μ Pa]置于实验鱼头部附近实时对水槽内实际声压进行测量,测量的声音信号通过电荷放大器(2692, B&K, 丹麦)输入数模转换模块(RZ6, Tucker Davis Technologies TDT, 美国),通过信号同步器(SA1, TDT, 美国)实现采集的听觉诱发电位(auditory evoked potential, AEP)信号和水下声音信号同步输入,并根据同步信号计算水中声音信号的实际声压级。

实验时,记录电极和参考电极(rochester electro-medical, 美国)分别轻插于实验鱼后脑和双眼之间的皮肤上,接地电极直接置于水体中。采集的脑电信号通过光纤与前置放大器(RA4LI, TDT, 美国)和数模转换器(RZ6, TDT, 美国)相连。

实验鱼的听觉阈值定义为可重复产生 AEP 波形的最小声音刺激强度,确定方法与过去发表的工作相同^[15-17]。对单一频率相同强度的刺激声音

分别进行 1000 次重复刺激诱发, 并将 1000 次的诱发电位波形进行反相位叠加和平均化处理, 得到 AEP 波形。每条鱼进行二次重复实验, 以确定听觉阈值的稳定性和可重复性。

1.3 统计分析

实验鱼个体差异和不同刺激声音是影响听觉阈值差异的主要因子。因此, 本研究主要统计了实验鱼对不同频率声音的听觉阈值差异和不同

鱼之间的听觉阈值差异。统计前, 首先验证数据是否满足正态分布和方差齐次检测。单因素重复测量方差分析(one way RM ANOVA)用于检测不同鱼对不同频率的反应是否存在差异, 如果存在差异, 则事后检验(Holm-Sidak test)用于分析组间差异, 差异显著度设为 0.05。所有数据均以平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)来表示, 统计分析由 SigmaPlot (14.0)完成。

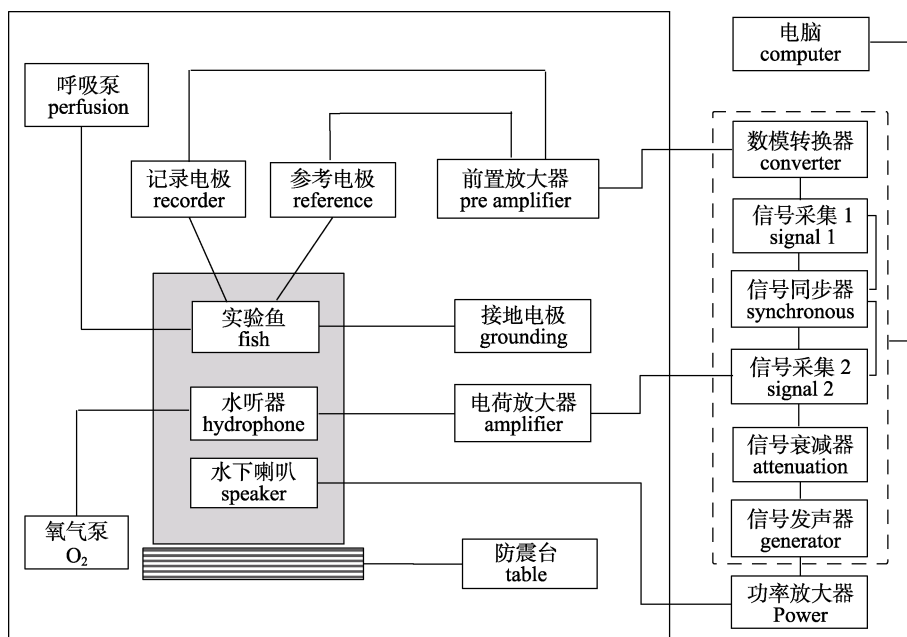


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2 结果与分析

2.1 星斑篮子鱼的 AEP 波形特征

典型的星斑篮子鱼的 AEP 波形振幅随着刺激声音强度的降低逐渐减弱。在高强度声音刺激下, AEP 波形相对于水平基线有明显的起伏波动(图 2), 通常表现为相对于水平基线的一个负向波动, 在这个负向波动上存在 4~5 个正向峰信号, 之后依次产生相对于基线的一个正向波动和较小的负向波动; 但在低强度声音刺激下, AEP 波形相对于水平基线的波动明显减弱, 在接近阈值附近, 基本接近水平基线, 正向峰信号开始慢慢消失, 但仍有个别较弱的峰信号, 如图 2 箭头所示。如图 3 所示, 100 Hz 下低频声音诱发的波形先是存在一

个负向峰, 之后的波形则相对于基线波动较缓; 200 Hz 下诱发的 AEP 波形首先将产生相对于基线的一个负向峰, 在这个负向峰上存在几个小的正向峰, 之后依次产生相对于基线的一个正向峰和负向峰; 300 Hz 下诱发的 AEP 波形首先产生相对于基线的一个负向起伏, 紧接着一个正向峰, 该正向峰上面可能出现多个小的正向峰; 400 Hz 下诱发的 AEP 波形则是先产生相对于基线的一个正向起伏, 紧接着一个较缓的负向峰, 该负向峰上面可能出现多个小的负向峰; 600 Hz 下诱发的 AEP 波形首先产生相对于基线的一个负向起伏, 紧接着一个正向峰, 之后产生一个缓慢的负向峰; 800 Hz 下诱发的波形首先产生相对于基线的一个负向起伏, 紧接着一个正向峰, 之后依次产生一

个缓慢的负向峰与正向峰。

AEP 波形中还发现明显“2 倍关系”，即 AEP 波形中正向峰的数量明显要多于刺激声音波形的峰信号。这也是确定记录的脑电信号是否为 AEP 信号的一个关键特征^[14,17]。不同频率声音诱发的 AEP 存在明显的波形差异，但这种“2 倍关系”都存在(图 3)。对于阈值以下或从死鱼记录的信号则没有明显的 AEP 波形特征(图 2)。

2.2 星斑篮子鱼的听力图

实验研究了 14 条星斑篮子鱼在 100~800 Hz 范围内的 AEP 波形，并根据 AEP 的特征确定每条鱼在不同频率的听觉阈值。将 14 条实验鱼的听觉阈值进行平均处理，得出星斑篮子鱼对不同频率声音的平均听觉阈值，并绘制出听力曲线图(图 4)。星斑篮子鱼的听力曲线为明显的上升型曲线，听觉阈值随着声音频率增加而增加。但在 200 Hz 处有一个最低值，表现为不明显的 V 形特征，表明星斑篮子鱼对低频信号较为敏感。星斑篮子鱼的敏感频率范围为 100~300 Hz，其听觉阈值范围为 104~108 dB，最敏感频率 200 Hz 处的平均听觉阈值为(104±4.8) dB。400 Hz 以上的声音听觉阈值明

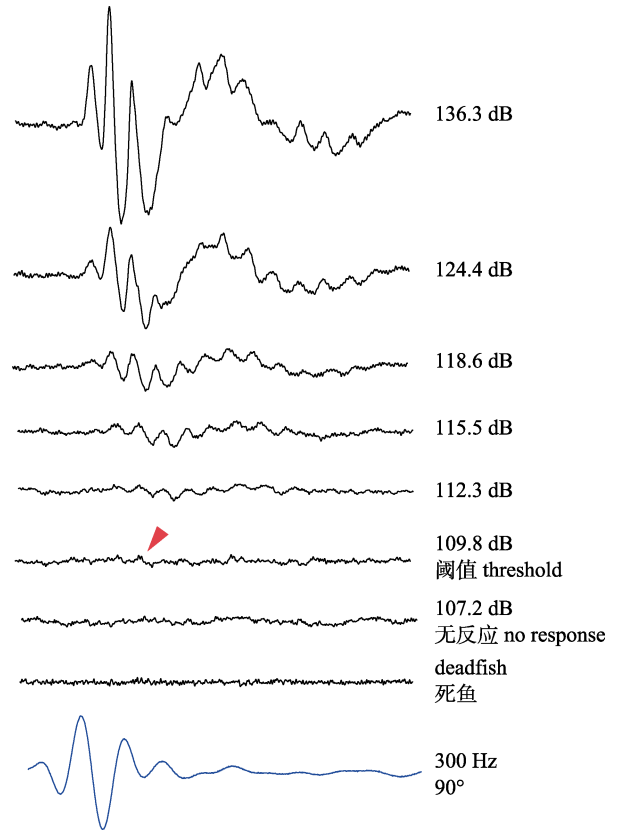


图 2 不同刺激强度的星斑篮子鱼听觉诱发电位波形
Fig. 2 AEP waveforms of *Siganus guttatus* in response to 300 Hz tone at different levels

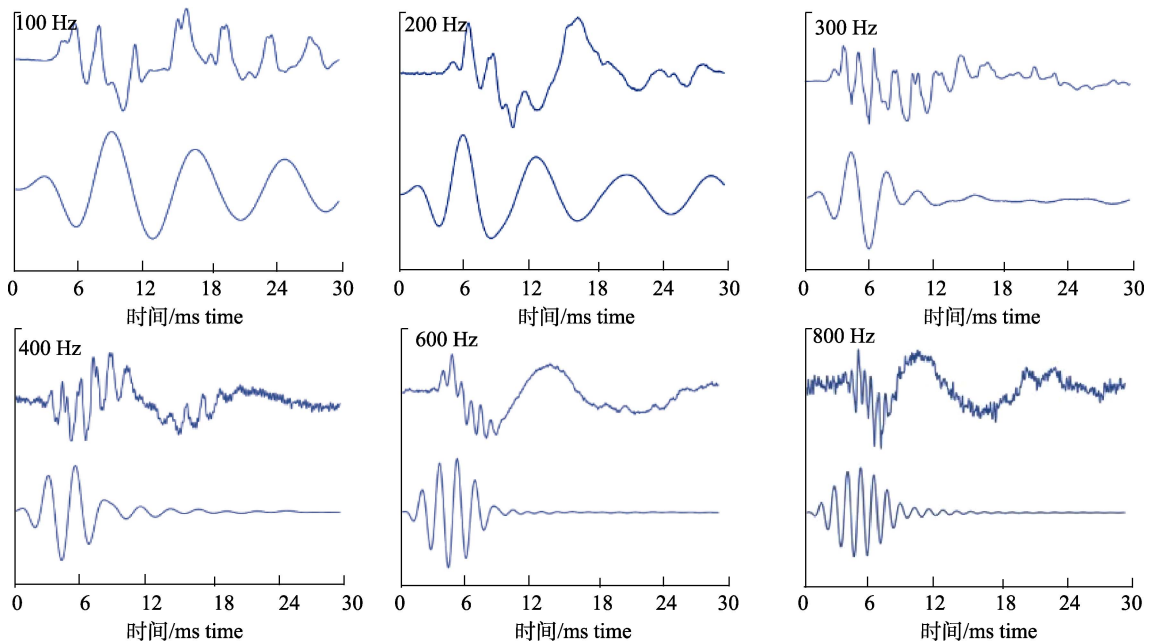


图 3 不同频率刺激声音诱发的星斑篮子鱼听觉诱发电位波形
上方为星斑篮子鱼 AEP 波形，下方为刺激声音波形。

Fig. 3 AEP waveforms of *Siganus guttatus* in response to tone bursts with different frequencies
Upper recordings are AEP waveforms and lower recordings are tone bursts.

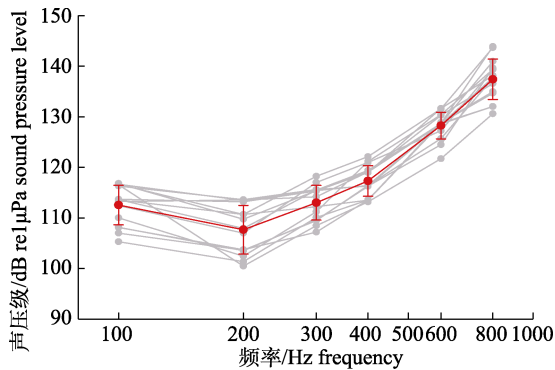


图 4 14 条星斑篮子鱼的听觉阈值图
Fig. 4 The auditory threshold of 14 *Siganus guttatus* individuals

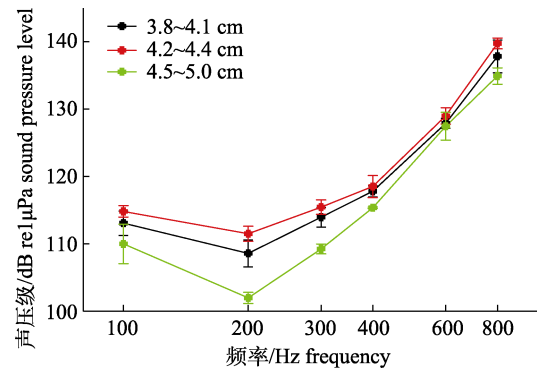


图 5 不同长度的星斑篮子鱼与其听觉阈值的关系
Fig. 5 Relationship between auditory threshold and different total length of *Siganus guttatus*

显增加, 增加幅度达 10 dB, 400 Hz 的平均听觉阈值 (117 ± 3.0) dB, 600 Hz 的平均听觉阈值 (128 ± 2.6) dB, 800 Hz 的平均听觉阈值 (137 ± 4.1) dB。尽管不同鱼的听觉曲线的趋势相似, 但它们在相同频率的听觉阈值存在显著差异 ($P < 0.001$, $F = 6.5$)。

2.3 星斑篮子鱼听觉阈值的个体差异

为了进一步确定不同实验鱼个体之间的听觉阈值差异, 根据 14 条实验鱼的体长划分为 3 组, 其中小个体组 S: 3.8~4.1 cm ($n=4$); 中等个体组 M: 4.2~4.4 cm ($n=6$); 大个体组 L: 4.5~5.0 cm ($n=4$)。3 组鱼的听力曲线图见图 5, 100 Hz 时 L 组的听觉阈值平均值要小于 S 组和 M 组, 但 3 组鱼的听觉阈值在统计没有显著性差异 ($P=0.135$, $F=2.42$); 200 Hz 时, 3 组鱼的听觉阈值在统计有显著性差异 ($P=0.001$, $F=13.589$), 其中 L 组平均听觉阈值 (102 ± 1.7) dB 小于 S 组 (108 ± 2.0) dB ($P=0.015$, $t=3.283$), 小于 M 组 (111 ± 2.7) dB ($P < 0.001$, $t=5.186$), 但 S 组与 M 组之间没有显著性差异 ($P=0.14$, $t=1.59$); 300 Hz 时, 3 组鱼的听觉阈值在统计有显著性差异 ($P=0.005$, $F=9.153$), 其中 L 组平均听觉阈值 (102 ± 1.7) dB 小于 S 组 (108 ± 2.0) dB ($P=0.028$, $t=2.921$), 小于 M 组 (111 ± 2.7) dB ($P=0.004$, $t=4.216$), 但 S 组与 M 组之间没有显著性差异 ($P=0.332$, $t=1.016$); 400 Hz 时, L 组的听觉阈值平均值略小于 S 组和 M 组, 但 3 组鱼的听觉阈值在统计没有显著性差异 ($P=0.309$, $F=1.309$); 600 Hz 时, 3 组鱼的听觉阈值在统计没有显著性差异 ($P=0.690$, $F=0.384$); 800 Hz 时, 3 组鱼的听觉阈值在统计上没有显著性差异 ($P=0.155$, $F=2.223$)。

3 讨论

听觉诱发电位是目前比较公认的快速进行鱼类听觉敏感性研究的微创电生理方法^[12,15-19]。本研究首次应用听觉诱发电位研究了星斑篮子鱼的听觉阈值, 以期声音威慑应用筛选合适的声源频率。星斑篮子鱼的听觉诱发电位波形特征与褐菖鲉 (*Sebasticus marmoratus*)^[12]、斑马鱼 (*Danio rerio*)^[18]、金赤鲷 (*Pagrus auratus*)^[19]等鱼的波形特征相似, 均相对水平基线产生一定的波动特征, 这种波形特征被认为是 AEP 的重要特征之一。鱼类在听觉受损后, 其 AEP 波形则失去或减弱这种相对基线的起伏特征^[17-19]。鱼类的听觉基础是内耳毛细胞纤毛在声音刺激下发生偏移而产生神经发电^[20]。由于毛细胞纤毛是对称排列, 当鱼类处于声场中时, 声音刺激(质子振动)可引起纤毛不同方向偏移, 这样则产生 2 次神经放电^[20]。因此, AEP 作为听觉外周神经和脑神经元放电的综合反应, 在波形频谱中存在 2 倍于刺激声音频率的信号^[12,15-17]。这可以简单地从波形峰看出, 如 300 Hz 纯音在 10 ms 时程内约有 3 个峰信号, 而在 AEP 波形中, 10 ms 内则可见 5~6 个峰信号(图 2, 图 3)。星斑篮子鱼的 AEP 波形符合这二个重要特征, 而且在死鱼的记录信号中没有 AEP 信号(图 2)。因此, 本研究的星斑篮子鱼听觉诱发电位信号是准确的。

星斑篮子鱼幼鱼对低频声音信号比较敏感, 敏感频率范围为 100~300 Hz, 最敏感频率为 200 Hz。这与五线雀鲷 (*Abudefduf saxatilis*)^[21]敏感频率

100~200 Hz, 夏威夷豆娘鱼(*Abudefduf abdominalis*)^[22]敏感频率 95~240 Hz 的结果相类似。这些鱼都是栖息于珊瑚礁或岩礁生境的鱼类, 相似的听觉敏感性可能与环境的噪声频率适应性相关^[23]。五线雀鲷最敏感频率 100 Hz 的听觉阈值为 118 dB^[21], 夏威夷豆娘鱼最敏感频率 125 Hz 的听觉阈值为 123~127 dB^[22], 而星斑篮子鱼的听觉阈值较低, 200 Hz 的听觉阈值仅为 104 dB 左右。马强等^[24]曾对不同篮子鱼的耳石进行形态比较, 发现星斑篮子鱼的耳石内侧面有一较深的中央沟, 且耳石外缘具有多枚大小不等的齿突, 而其他篮子鱼不具有这样的结构。较深的耳石中央沟往往与高密度的毛细血管分布相关, 但星斑篮子鱼的听觉敏感性是否与耳石结构相关, 仍需进一步的研究。

本研究也发现, 星斑篮子鱼幼鱼的听觉阈值与体长存在明显的负相关, 体长较长的实验鱼的听觉阈值比体长小的鱼要低, 表明个体大的鱼听觉更敏感。胡成硕等^[6]对星篮子鱼摄食浒苔的行为观察中也发现, 它们在摄食时听到养殖人员走近传来的声响后会立即停止摄食迅速游至水体中下层, 而且具有明显的应激表现。摄食行为观察中的星斑篮子鱼个体要比本研究用鱼要大, 它们的听觉敏感性可能更强, 才有如此强烈的行为反应。另外, 与行为学方法获得的听觉阈值相比, AEP 获得的听觉阈值会偏高^[23]。金鱼(*Carassius auratus*)是研究鱼类听觉的模式动物, 有研究表明通过 AEP 方法获得的听觉阈值平均值比行为学阈值要高 10 dB 左右^[23,25]。如果这个差异也存在于星斑篮子鱼的话, 推测在自由状态下的星斑篮子鱼的听觉行为阈值可能低至 90 dB 左右, 这还有待行为实验进一步验证。

综上所述, 星斑篮子鱼在声音敏感频段具有较低的感受阈值(90~110 dB), 且该阈值与海洋背景噪声水平相接近^[16,23]。因此, 只要声强高于星斑篮子鱼听觉阈值的声源都可能引起它们的行为反应。由此可见, 利用声音进行威慑和驱赶星斑篮子鱼的可行性是很高的^[26]。但在实际应用中, 还应考虑威慑声源对其他鱼类的影响, 需要对同一海域的其他鱼类的听觉阈值进行研究, 以综合筛选合适的威慑声音频率。未来还应开展智能传

输、低功率声源、无线声源等方面的研究, 以设计出适应更复杂、更远距离水域应用的声音威慑系统。

参考文献:

- [1] Wu H L, Zhong J S. Key to Marine and Estuarial Fishes of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021: 1152. [伍汉霖, 钟俊生. 中国海洋及河口鱼类系统检索[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021: 1152.]
- [2] Ma Q, Liu J. Introduction and prospect of the systematics study of Siganidae in China[J]. South China Fisheries Science, 2006, 2(4): 68-74. [马强, 刘静. 篮子鱼科的系统研究概况及我国篮子鱼科的研究展望[J]. 南方水产科学, 2006, 2(4): 68-74.]
- [3] Lu X N, Jiang Z J, Fang J G, et al. Biological control of macroalgae fouled on the net of marine cage using *Siganus oramin* in Northern China[J]. Progress in Fishery Sciences, 2017, 37(5): 50-56. [吕旭宁 蒋增杰 方建光, 等. 黄斑篮子鱼(*Siganus oramin*)对北方养殖网箱网衣附着藻类的生物清除作用[J]. 渔业科学进展, 2017, 37(5): 50-56.]
- [4] Zheng X Q, Yang X Z, Lin R C. Experimental study on competitive interaction among reef-building coral *Turbinaria peltate*, *Rhizoclonium* sp. and rabbitfish *Siganus guttatus*[J]. Journal of Applied Oceanography, 2014, 33(1): 38-45. [郑新庆, 杨小舟, 林荣澄. 盾形陀螺珊瑚与根枝藻和点斑篮子鱼之间相互作用的实验研究[J]. 应用海洋学学报, 2014, 33(1): 38-45.]
- [5] Zhang S Y, Liu S R, Zhou X J, et al. Ecological function of seaweed-formed habitat and discussion of its application to sea ranching[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 2004-2014. [章守宇, 刘书荣, 周曦杰, 等. 大型海藻生境的生态功能及其在海洋牧场应用中的探讨[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 2004-2014.]
- [6] Hu C S, Liu J Y, Zhao F, et al. Feeding habits on *Enteromorpha prolifera* and growth characteristics of juvenile *Siganus guttatus*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2015, 37(4): 349-356. [胡成硕, 刘鉴毅, 赵峰, 等. 点篮子鱼幼鱼摄食浒苔的习性及其生长特征[J]. 海洋渔业, 2015, 37(4): 349-356.]
- [7] Zhao B Q, Guan C J, Xu P, et al. Primary study on ecological prevention of the algae using *Siganus guttatus* in the sea area of the water cooling system intake of the nuclear power plant in Liaodong Bay[J]. Marine environmental science, 2020, 39(1): 46-52. [赵博强, 关春江, 徐鹏, 等. 点篮子鱼对辽东湾核电厂冷源取水海域海藻生态防治的初步探讨[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(1): 46-52.]
- [8] Cui Y, Wu Y, Zhang J. Identification of diet sources of *Siganus* in Qinlan Bay of Hainan Province with biomarkers[J]. Journal of

- Applied Oceanography, 2013, 32(4): 540-548. [崔莹, 吴莹, 张经. 生物标志物对海南清澜湾水域篮子鱼食物来源的表征[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(4): 540-548.]
- [9] Paul V J, Meyer K D, Nelson S G, et al. Deterrent effects of seaweed extracts and secondary metabolites on feeding by the rabbitfish *Siganus spinus*[J]. Proceeding of the Seventh International Coral Reef Symposium, Guam, 1992, 2: 867-874.
- [10] Dale G N, Valerie J P. Chemical defense of a marine cyanobacterial bloom[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1998, 225(1): 29-38.
- [11] Zan J D, Li Z Y, Tianero M D, et al. A microbial factory for defensive kahalalides in a tripartite marine symbiosis[J]. Science, 2019, 364: eaaw6732.
- [12] Zhang X G, Guo H Y, Song J K. Thresholds for the hearing of marbled rockfish *Sebasticus marmoratus*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018, 42(3): 593-598. [张旭光, 郭弘艺, 宋佳坤. 褐菖鲉的听觉阈值研究[J]. 水生生物学报, 2018, 42(3): 593-598.]
- [13] Adam T P, Paul R W, Rosalind M W, et al. Response of seaward-migrating European eel (*Anguilla anguilla*) to an infrasound deterrent[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 480-486.
- [14] Piper A T, White P R, Wright R M, et al. Response of seaward-migrating European eel (*Anguilla anguilla*) to an infrasound deterrent[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 480-486.
- [15] Zhang X G, Guo H Y, Wang Z H, et al. Noise-dependent fish distribution in kelp beds[J]. Advances in Experimental Medicine and Biology 2016, 875: 1259-1264.
- [16] Zhang X G, Guo H Y, Chen J, et al. Potential effects of underwater noise from wind turbines on the marbled rockfish (*Sebasticus marmoratus*)[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2021, 37(4): 514-522.
- [17] Lu Z, Tomchik S M. Effects of a red-tide toxin on fish hearing[J]. Journal of Comparative Physiology A, 2002, 188(10): 807-813.
- [18] Wang J P, Yan Z, Xing Y, et al. A zebrafish model for hearing loss and regeneration induced by blast wave[J]. Journal of Bio-X Research, 2019, 2(2): 87-97.
- [19] Caiger P E, Montgomery J C, Radford C A. Chronic low-intensity noise exposure affects the hearing thresholds of juvenile snapper[J]. Marine ecology progress series, 2012, 466: 225-232.
- [20] Campbell J, Shafiei S S, Slabbekoorn H. Particle motion and sound pressure in fish tanks: A behavioural exploration of acoustic sensitivity in the zebrafish[J]. Behavioral Processes, 2019, 164: 38-47.
- [21] Egner S A, Mann D A. Auditory sensitivity of sergeant major damselfish *Abudefduf saxatilis* from post-settlement juvenile to adult[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 285: 213-222.
- [22] Maruska K P, Boyle K S, Dewan L R, et al. Sound production and spectral hearing sensitivity in the Hawaiian sergeant damselfish, *Abudefduf abdominalis*[J]. The Journal of Experimental Biology, 2007, 210: 3990-4004.
- [23] Ladich F, Fay R R. Auditory evoked potential audiometry in fish[J]. Reviews In Fish Biology and Fisheries, 2013, 23: 317-364.
- [24] Ma Q, Liu J. Comparative morphology of siganid fishes (Family: Siganidae) from Chinese waters[J]. Marine Sciences, 2006, 30(9): 16-22. [马强, 刘静. 中国沿海常见篮子鱼形态比较研究[J]. 海洋科学, 2006, 30(9): 16-22.]
- [25] Xiao J, Braun C B. Objective threshold estimation and measurement of the residual background noise in auditory evoked potentials of goldfish[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 124(5): 3053-3063.
- [26] Neo Y Y, Hubert J, Bolle L J, et al. European seabass respond more strongly to noise exposure at night and habituate over repeated trials of sound exposure[J]. Environmental Pollution, 2018, 239(2018): 367-374.

Auditory threshold of the juvenile *Siganus guttatus*

ZHANG Xuguang¹, ZHANG Shenwei¹, TANG Xianming², ZHANG Shouyu¹

1. Engineering Technology Research Center of Marine Ranching, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Hainan Provincial Key Laboratory of Tropical Maricultural Technology, Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou, 571126, China

Abstract: Acoustic deterrence has been identified as a potentially effective behavioral control method to reduce the feeding on macroalgae by Siganid fish. The hearing ability of the target fish species is a key prerequisite for selecting the appropriate sound frequency used in acoustic deterrence. The auditory capabilities of juvenile *Siganus guttatus* were examined through the analysis of auditory evoked potentials (AEPs) to determine their auditory frequency sensitivity and corresponding threshold. In this paper, the AEPs of 14 juvenile fish with different body lengths were studied using a TDT Auditory Physiological Workstation. It was observed that all juvenile fish exhibited discernible AEP waveforms when exposed to acoustic stimulation within the frequency range of 100–800 Hz. Additionally, the amplitudes of the AEP waveforms were found to increase in conjunction with the intensity of the acoustic stimulation. As the frequency of the sound increased, the hearing threshold of the juvenile fish did so simultaneously. In terms of low-frequency sounds, those within the range of 100–300 Hz evoked greater sensitivity, with the most sensitive frequency of hearing being 200 Hz and the average auditory threshold being 104 dB. The auditory sensitivities of individuals with different body lengths were significantly different at 200–300 Hz, at which point the auditory threshold of larger individuals (4.5–5.0 cm) was significantly lower than that of smaller individuals (4.1–4.4 cm). This suggests that larger fish have a lower auditory threshold, which is related to the development of their auditory organs. Due to the heightened sensitivity of juvenile *S. guttatus* to sound, their low hearing threshold, and the similarity of ambient noise, it is possible to employ acoustic deterrence in the wild to decrease the incidence of macroalgal consumption by *S. guttatus*, thereby mitigating the economic losses associated with important macroalgae.

Key words: *Siganus guttatus*; acoustic deterrence; auditory evoked potential; behavioral control

Corresponding author: TANG Xianming, E-mail: hn.tangxm@aliyun.com; ZHANG Shouyu, E-mail: syzhang@shou.edu.cn