

Song H T, Ge Q T, Ren L, *et al.* Auditory thresholds of the juvenile bighead carp (*Aristichthys nobilis*) with different body length [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(1): 012611. [宋海天, 葛起彤, 任洸, 等. 不同体长鳙幼鱼的听觉阈值研究 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(1): 012611.]

不同体长鳙幼鱼的听觉阈值研究

宋海天¹ 葛起彤¹ 任 洸² 张旭光¹

(1. 上海海洋大学海洋牧场工程技术研究中心, 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业农村部淡水渔业与种质资源利用重点实验室, 无锡 214081)

摘要: 为建立鳙(*Aristichthys nobilis*)幼鱼的声学行为控制技术, 本研究系统评估了鳙幼鱼的听觉能力。利用鱼类听觉诱发电位(Auditory Evoked Potential, AEP)技术测定了3组不同体长[小: (7.9±0.4) cm; 中: (10.9±0.8) cm; 大: (14.2±0.7) cm]的鳙幼鱼在不同频率声音刺激下的脑电反应, 确定了其听觉阈值和听觉发育规律。结果表明: 鳙幼鱼的听觉阈值曲线呈非对称的“V”形, 对200—400 Hz的低频声音较为敏感, 其中最敏感的频率为400 Hz, 平均听觉阈值为(93.0±3.0) dB; 在不同体长组之间, 鳙幼鱼听觉能力在100、400和1000 Hz三个频率下存在显著差异, 而其余频率则未观察到显著差异; 在最敏感的400 Hz频率下, 大体长组的平均听觉阈值比小体长组显著降低了5 dB ($P<0.05$), 表明了鳙幼鱼听觉能力随个体生长或发育呈增强趋势。本文的发现不仅为建立基于尺寸选择性的声学行为控制技术提供了关键生理学参数, 也为鳙的渔业管理和生态保护提供了科学依据。

关键词: 鱼类听觉; 听觉诱发电位; 声音驱诱; 行为控制

中图分类号: S917.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2026)01-012611-08

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0264 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2025.0264



声音信号是水生生物感知环境与远距离通信的关键媒介之一。很多鱼类在捕食、避敌、求偶、导航和栖息地选择等生命活动中都高度依赖对声音信号的感知^[1]。近年来, 利用声音信号进行鱼类行为控制的研究已成为热点。例如, 李嘉欣等^[2]研究表明, 在鱼道入口中使用扬子鳄(*Alligator sinensis*)吼叫声可显著提高拉萨裸裂尻鱼(*Schizopygopsis younghusbandi*)、双须重唇鱼(*Ptychobarbus dipogon*)和斯氏高原鳅(*Triplophysa stoliczkae*)的过鱼效率。王明云等^[3]研究发现, 草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)摄食浮萍的声音对草鱼幼鱼有诱集作用, 在播放摄食声时, 草鱼的平均游泳速度和趋声率都显著高于不放声的对照组。尽管声学技术在鱼类行为控制中已展现出较好的效果, 但声音信号频率和声压级的设置多依赖于经验或重复试验, 而非基于目标鱼类的听觉能力特性。这不仅影响了声音对鱼类行为控制的效果, 也削弱了该技术的普

适性和可靠性。

鳙(*Aristichthys nobilis*)作为我国重要的经济鱼类, 年产量超过300万吨, 具有重要的经济价值^[4], 同时, 作为高效的滤食性鱼类, 鳙在调控水体浮游生物、维持水库和湖泊生态系统稳态方面发挥着关键作用^[5]。鳙的内耳和鱼鳔之间存在韦伯氏器(Weberian apparatus)连接, 可将声场中鱼鳔接收到的振动信号传递至内耳, 间接增强鳙对声压的敏感度^[6]。得益于这一独特的生理构造, 鳙成为声音控制行为研究的理想对象。幼鱼阶段是鱼类生命周期中的“瓶颈”期, 其存活率直接决定了种群补充量和未来的资源动态。然而, 这一阶段的个体对环境胁迫(如声音)的感知能力和响应模式尚不明确, 存在知识空白, 此外, 现有的研究多聚焦于成年鱼而忽视了幼鱼。因此, 本研究采用微创电生理技术——听觉诱发电位(Auditory Evoked Potential, AEP), 系统性测定鳙幼鱼发育阶段中不同体长组的听觉阈

收稿日期: 2025-08-06; 修订日期: 2025-09-30

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2400900); 镇江“金山英才”产业计划资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2023YFD2400900); Zhenjiang “Jinshan Talent” Industrial Experts Program]

作者简介: 宋海天(2000—), 男, 硕士研究生; 研究方向为鱼类听觉。E-mail: 729484502@qq.com

通信作者: 张旭光(1980—), 男, 副教授; 研究方向为鱼类感觉行为生态学。E-mail: xg-zhang@shou.edu.cn

值。本研究旨在构建鳊幼鱼的听觉阈值曲线, 揭示其生命早期听觉敏感性的发育规律, 为建立基于尺寸选择性的鳊声学行为控制技术提供关键的基础生理学数据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用鳊幼鱼分批次购自浙江省湖州市某渔场, 依据体长分为3个组别, 每个组别设置10尾实验鱼, 其中小体长组[体长: (7.9 ± 0.4) cm; 体重: (7.1 ± 1.3) g]购于11月, 中体长组[体长: (10.9 ± 0.8) cm; 体重: (21.9 ± 5.2) g]和大体长组[体长: (14.2 ± 0.7) cm; 体重: (47.0 ± 7.8) g]分别购于次年1和3月。实验鱼暂养于上海海洋大学滨海基地的室内圆形循环水槽(直径120 cm)中。在暂养期间, 水温维持在 $(19 \pm 1)^\circ\text{C}$, 处于鳊幼鱼的适宜生长温度范围内, 以最大程度减少温度胁迫对实验结果的影响。采用自然光照, 溶解氧浓度保持在8 mg/L以上, 每日投喂人工饲料。实验开始前24h停止投喂, 测试时, 选取体表无损伤、游动活跃的30尾个体进行实验。

1.2 实验方法

听觉诱发电位(AEP)实验系统主要由隔音系统、声刺激系统以及数据记录系统三部分组成(图1)。使用自制的固定装置将实验鱼固定于半径为15 cm的圆形亚克力水槽内, 使用循环呼吸泵对实验鱼进行人工灌流以保证实验鱼的呼吸。实验水槽放置在隔音室($2.5\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 2\text{ m}$, 上海声诺)内的防震台(ZDT07-07, 江西连胜)上, 以降低外界噪声对实验鱼的干扰, 隔音室内空气背景噪声为25 dB。

在实验过程中, 通过调整固定装置使实验鱼头

部区域露出水面约1—2 mm, 记录电极(Rochester Electro-Medical, 美国)轻插于实验鱼颅骨中缝处, 参考电极轻插于实验鱼两眼间的皮肤上, 接地电极浸没于实验鱼尾部附近的水体中。所有电极均接入前置放大器(RA4LI, Tucker Davis Technologies TDT, 美国), 再通过光纤连接至TDT听觉生理工作站(RZ6, TDT, 美国)进行信号采集与处理。

声刺激信号(图2)由SigGenRZ软件(TDT, 美国)生成, 经功率放大器(S2-350, SANSUI, 中国)放大后, 传输至实验水槽底部的水下扬声器(UW-30, University Sound, 美国)。声音刺激采用短纯音信号, 设置频率100、200、400、800、1000和2000 Hz, 时程30ms, 起始声压级为140 dB re 1 μPa , 并按3 dB的梯度递减至71 dB。水槽中实际声刺激信号强度通过实验鱼头部附近的水听器[8103, B&K, 丹麦, 灵敏度 (-211 ± 2) dB re 1 V/ μPa]进行实时监测。水听器所获得的信号经电荷放大器(2692, B&K, 丹麦)处理后, 与实验鱼的听觉诱发电位信号通过听觉生理工作站(RZ6, TDT, 美国)实现同步采集与储存。

实验鱼的听觉阈值测定参照张旭光等^[6,7]的方法进行, 实验设置90°和270°两个相位相反的声刺激信号, 对同一频率、声压级相同的声音刺激重复1000次, 并将每次记录的波形进行叠加和平均处理, 得到AEP波形。如果两个声音信号所诱发的电位信号具有重合性, 则判定为有效的听觉诱发电位(AEP)反应。在重合性观察的基础上, 本研究计算了成对反相位AEP波形的相关系数(R 值)来量化其重合度, 鉴于相位相反的声刺激本身不会改变AEP波形的形态特征^[8], 因此 R 值越小, 表明AEP波形间的相关性越低。本研究将AEP波形重合特征与 R 值大小共同作为听觉阈值的判定标准^[9], 根据预实验

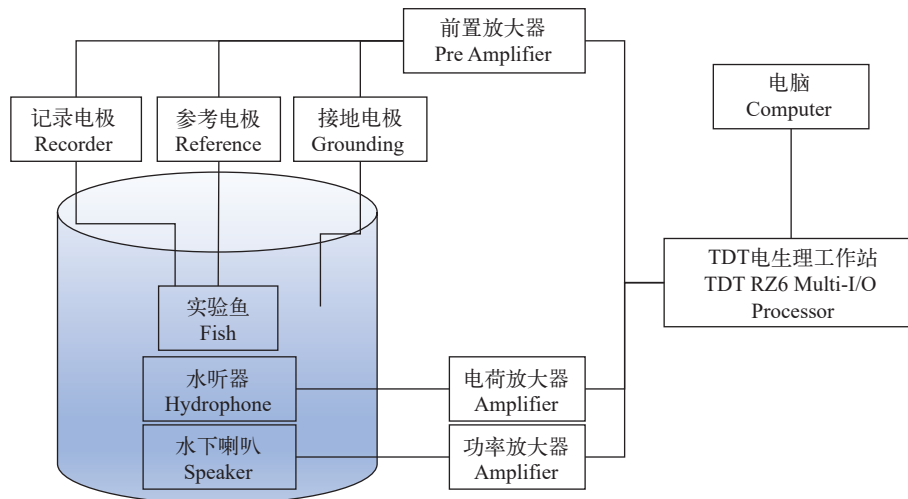


图1 AEP实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the AEP experimental system

的结果,当 R 值为0.15时,所产生AEP波形重合的最低声压级被定义为该频率下的听觉阈值。

已有研究表明,实验鱼体长是影响其听觉阈值差异的主要因素^[6],本研究据此将实验鱼分为3个体长组,分别统计了不同测试频率下各体长组实验鱼的听觉阈值差异,以及同一测试频率下不同体长组间的听觉阈值差异。

1.3 统计分析

首先对数据进行正态分布(Shapiro-Wilk test)和方差齐性(Levene test)检测。结果显示,所有数据组均满足正态分布($P>0.05$)和方差齐性($P>0.05$)的前提假设。故采用单因素重复测量方差分析(One-way RM ANOVA)检验不同体长组的实验鱼对不同频率声刺激的反应是否存在差异,若存在显著差异,则通过事后检验(Holm-Sidak test)进一步分析组间差异,显著性水平设为0.05。所有数据以平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x}\pm SD$)表示,统计分析使用IBM SPSS Statistics 26完成,数据可视化使用Origin Pro 2025实现。

2 结果

2.1 鳊幼鱼AEP波形特征

实验共记录30尾不同体长鳊幼鱼的AEP波形,结果显示,90°与270°相位的声刺激所诱发的AEP波形具有高度重合性,且随着声压级的降低,成对AEP波形的相关系数(R 值)呈现下降趋势。以400 Hz为例(图3),在128 dB的较高声压级下, R 值约为0.41;当声压级降至95 dB时, R 值下降至0.15,结合AEP波形的重合特征分析,可认定95 dB为该频率下的听觉阈值;而当声压级进一步降至92 dB时, R 值仅为0.01,表明实验鱼已无有效的AEP反应。值得注意的是,在接近听觉阈值的过程中, R 值并非单调下降,而是表现出波动,但总体仍呈现明显的下

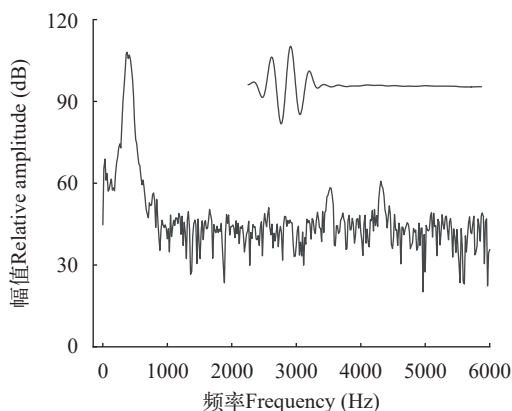


图2 400 Hz刺激声音频谱

Fig. 2 The FFT of 400 Hz sound stimulus

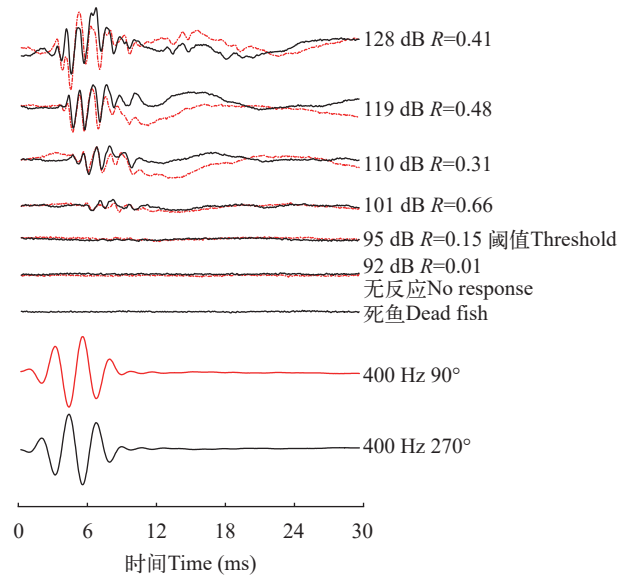


图3 不同刺激强度的鳊幼鱼听觉诱发电位波形

Fig. 3 AEP waveforms of bighead carp in response to 400 Hz tone at different levels

降趋势。因此,结合 R 值这一客观指标及AEP波形重合特征,可稳定、可重复地判定鳊幼鱼在不同频率下的听觉阈值。

如图4所示,不同频率的声刺激诱发的AEP波形呈现出明显的时域特征差异。在100 Hz频率下诱发的AEP波形首先出现2个相对基线的正波,随后可见1个负波,之后呈现出渐进式振幅衰减趋势;在200 Hz频率下诱发的AEP波形首先出现2个相对于基线的负波,随后迅速出现1个相对于基线的正波,继而转为低幅振荡;400 Hz频率下诱发的AEP波形连续出现3组负波和正波的组合,随后波形恢复基线平稳状态,后续无明显波峰出现;800 Hz频率下诱发的AEP波形以1个负波为起始特征,随后快速正波及多相低幅正向振荡;1000 Hz频率下诱发的AEP波形先出现1个负波,紧接着出现1个正波,且该正波内出现小幅度的负向振荡,之后波形相对基线逐渐趋于平缓;2000 Hz频率下诱发的AEP波形首先产生1个相对于基线的负波,紧随其后为1个正波,随后呈现缓变双相振荡特征。总体而言,AEP波形表现出相对基线的正向、负向起伏,在主要的波峰或波谷上常出现多重振荡,这种AEP波形的差异可能与实验鱼的状态或电极所在位置差异有关。

值得注意的是,AEP波形中正波的数量与声刺激波形中波峰的数量呈现约2:1的对应关系(图4),且该现象在不同频率的声刺激条件下均稳定存在。该特征与Piper等^[12]在其他鱼类研究中观察到的现象一致,即AEP波形的峰频率与声刺激频率的

2倍关系也可作为正确的神经响应的标志。尽管不同频率的声刺激诱发的AEP波形在形态上存在显著差异(图4),但在高于实验鱼听觉阈值的声刺激条件下,均能观察到上述的2倍数量对应关系。为验证上述2倍数量对应关系是特异性神经反应而非刺激伪迹或设备噪声干扰,本实验设置了死亡个体对照组,对死亡个体施加相同参数的声刺激。结果显示,在死亡个体记录到的信号中未观察到具有稳定相位关系且可重复的AEP波形,其信号波形与背景噪声特征相似,无法识别出符合2倍关系的规律性特征,这一结果充分证明该2倍关系是鳊幼鱼对声刺激产生的特异性神经电生理响应标志。

2.2 鳊幼鱼的听觉阈值

通过对30尾鳊幼鱼的AEP数据分析,本研究发现鳊幼鱼的听觉阈值曲线呈现一个非对称的“V”形(图5—7)。在100—400 Hz的低频频段,鳊幼鱼的听觉阈值随声刺激频率的升高而降低,表明其在该频段内的听觉敏感性逐渐增强。在400 Hz频率下,鳊幼鱼的听觉阈值最低,表明400 Hz是鳊幼鱼

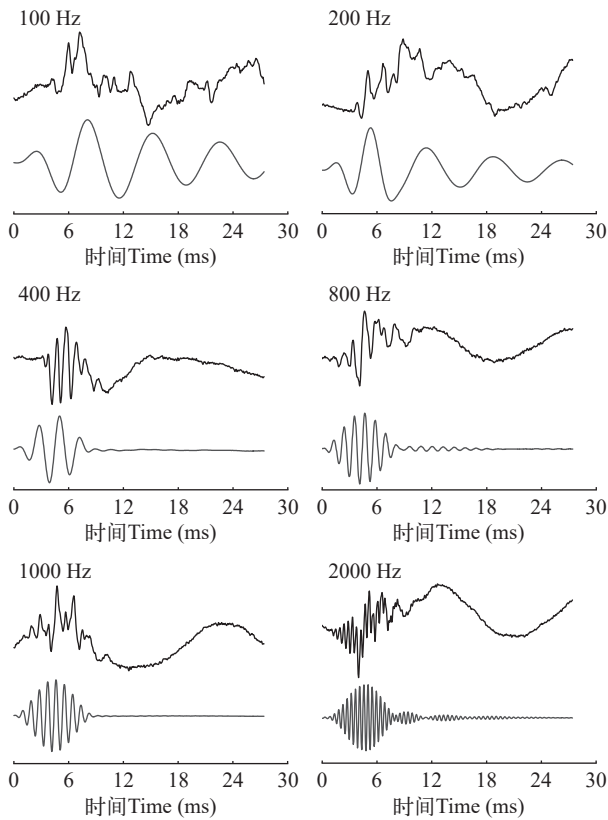


图4 不同频率刺激声音诱发的鳊幼鱼听觉诱发电位波形

Fig. 4 AEP waveforms of bighead carp in response to tone bursts with different frequencies

每一组图中,上方为鳊幼鱼AEP波形,下方为声音刺激波形

In each figure, upper recordings are AEP waveforms and lower recordings are tone bursts

最敏感的频率,其平均听觉阈值为 (93.0 ± 3.0) dB。当声音刺激的频率超过400 Hz后,听觉阈值则出现上升趋势,在2000 Hz处达到峰值,为 (125.0 ± 4.3) dB。总体而言,200—400 Hz是鳊幼鱼听觉敏感性较高的

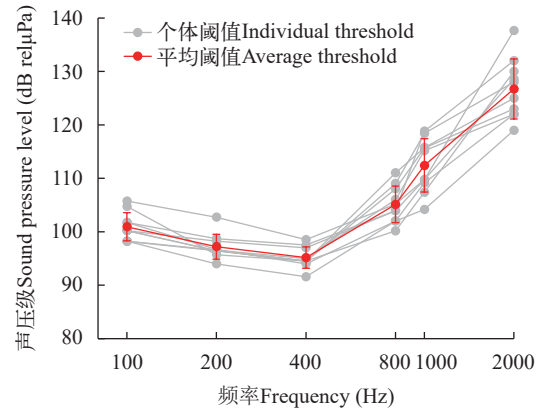


图5 10条小体长鳊幼鱼的听觉曲线

Fig. 5 The auditory threshold of ten small bighead carp individuals ($n=10$)

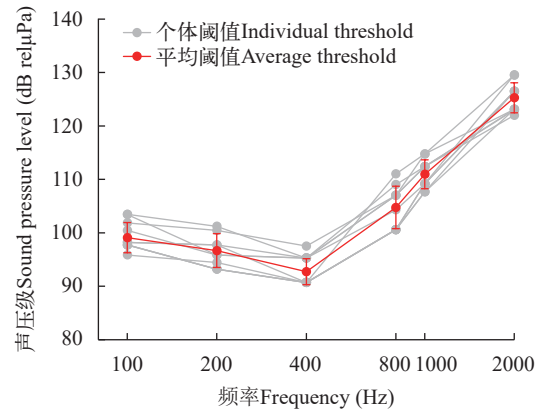


图6 10条中体长鳊幼鱼的听觉曲线($n=10$)

Fig. 6 The auditory threshold of ten medium bighead carp individuals

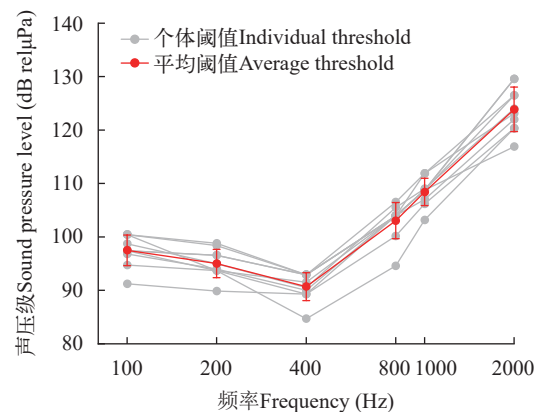


图7 10条大体长鳊幼鱼的听觉曲线

Fig. 7 The auditory threshold of ten large bighead carp individuals ($n=10$)

频率范围,尤以400 Hz最为敏感。值得注意的是,在所有体长组中,观察到高频的标准差(SD值)大于低频(表1),这可能反映了两个因素的共同作用:一方面,可能源于个体间在高频的听力敏感度上存在生物学差异;另一方面,可能是由于鱼类对高频信号反应较小,信噪比降低有关。

此外,本研究发现鳙幼鱼的听觉能力会随体长的增长而显著提升,该现象在低频段尤为突出(表1和图8),且在其最敏感的400 Hz频率处最为显著:大体长组(L组)的听觉阈值显著低于小体长组(S组; $P=0.001$) 和中体长组(M组; $P=0.035$), 其中, L组的听觉阈值比S组降低了5 dB, 在100和1000 Hz频率下也观察到类似的情况, 即L组的听觉能力显著优于S组($P=0.012$; $P=0.013$)。而在200、800及2000 Hz频率下,虽然三组间的听觉阈值未观察到显著差异($P>0.05$),但仍呈现出大体长组阈值较低,小体长组阈值较高的趋势(表1)。

表1 不同体长组鳙幼鱼在各频率下的平均听觉阈值(平均值 $\pm$ 标准差, $n=10$)

Tab. 1 Average hearing thresholds of bighead carp in different body size groups at different frequencies (mean $\pm$ SD, $n=10$)

频率 Frequency (Hz)	小体长组 [(7.9 $\pm$ 0.4) cm]/dB	中体长组 [(10.9 $\pm$ 0.8) cm]/dB	大体长组 [(14.2 $\pm$ 0.7) cm]/dB
100	100.0 $\pm$ 2.6 ^a	99.0 $\pm$ 2.6 ^{ab}	97.0 $\pm$ 2.8 ^b
200	97.0 $\pm$ 2.3 ^a	96.0 $\pm$ 2.9 ^a	95.0 $\pm$ 2.6 ^a
400	95.0 $\pm$ 1.9 ^a	93.0 $\pm$ 2.7 ^b	90.0 $\pm$ 2.6 ^c
800	105.0 $\pm$ 3.4 ^a	104.0 $\pm$ 3.9 ^a	103.0 $\pm$ 3.3 ^a
1000	112.0 $\pm$ 4.9 ^a	110.0 $\pm$ 2.7 ^{ab}	108.0 $\pm$ 2.5 ^b
2000	126.0 $\pm$ 5.6 ^a	125.0 $\pm$ 2.7 ^a	123.0 $\pm$ 4.1 ^a

注: 同一行数据上标不同字母表示组间存在显著差异($P<0.05$)

Note: Values in the same row with different superscript letters indicate significant differences ($P<0.05$)

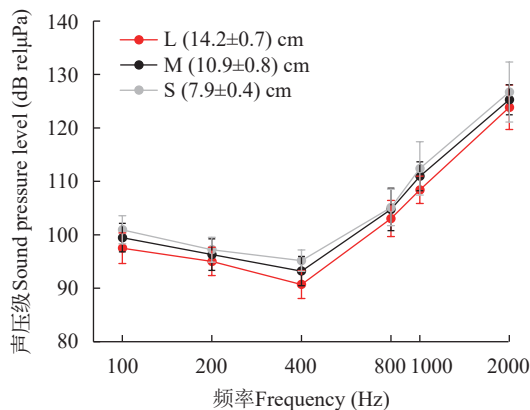


图8 小中大三种体长的鳙幼鱼的听觉曲线对比

Fig. 8 Auditory thresholds of small, medium, and large bighead carp

3 讨论

AEP是目前国际上公认的研究鱼类听觉阈值的前沿技术^[10], 其具有精度高、可重复性强、符合动物福利等优势^[11], 且无需对实验对象进行长期驯化或手术即可实现非侵入式检测^[12]。自Kenyon等^[13]于1998年首次将该技术应用于鱼类以来, 凭借这些优势, AEP迅速成为该领域发展最快的技术。然而, 实验环境的差异、系统误差、声刺激参数的不同以及实验鱼的个体差异都可能降低AEP测得的数据的跨实验室可比性。但本研究测定的鳙幼鱼的AEP波形特征与金鱼(*Carassius auratus*)^[14]、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)^[15]等鲤科鱼类的波形特征高度相似, 都表现出了相对基线的波动, 符合AEP信号的判定标准。本研究采用90°和270°即相位差为180°的声刺激, 有效抑制了信号伪迹, 记录到的神经源性响应具有高信噪比且波形重合度高(相关系数R值高), 这些客观指标进一步证实了本研究测得的鳙幼鱼听觉阈值数据的可靠性。

本研究揭示了鳙幼鱼在早期个体发育过程中听觉能力的变化, 对鳙听觉能力的研究进行了重要补充。Vetter等^[15]和Lovell等^[16]对成年鳙听觉的研究表明, 鳙对低频声音具有较高的敏感性, 其最敏感频率为500 Hz, 对应的听觉阈值为(90.5 $\pm$ 5.8) dB; 当声音刺激的频率超过1000 Hz时, 鳙的听觉阈值显著升高。本研究发现, 鳙幼鱼的听觉敏感频率范围在400 Hz附近, 对400 Hz声信号最为敏感, 大体长组平均听觉阈值为(90.0 $\pm$ 2.6) dB, 其听觉曲线呈现“V”形特征, 与成年鳙的听觉敏感性相似。而成鱼和幼鱼听觉敏感频率的偏移可能与个体发育相关。本研究发现鳙幼鱼的听觉阈值会随体长增加而降低, 这说明鳙的听觉敏感度并非恒定的, 而会随着个体发育而变化。这一发现与星斑篮子鱼(*Siganus guttatus*)^[6]、斑马鱼(*Danio rerio*)^[17]等鱼类的听觉研究结果一致, 斑马鱼在发育过程中, 听觉阈值可降低达10—15 dB^[17]。而本研究中观察到5 dB的变化, 虽然幅度较小, 但明确证实了听觉能力随发育而增强可能是包括鳙在内的多种鱼类中存在的常见现象。我们推测这种听觉能力的增强主要由以下两个原因导致: 其一, 内耳结构的成熟。鳙幼鱼耳石半径的平均沉积速率为5.0237 $\mu\text{m}/\text{d}$ 且耳石半径与体长成正相关^[18]。随着个体发育, 内耳中耳石的体积增大、毛细胞密度的增加及其排列规整性提高^[19], 均提升了声音振动向有效神经信号的转化效率^[20, 21]。其二, 鱼鳔与韦伯氏器耦合的完善。随着发育进程的推进, 连接鱼鳔与内耳的韦伯

氏器逐渐骨化, 传输信号的效率也可能提高^[22]。另外, 随着个体发育过程中鱼鳔体积的增大也增强了对低频声的响应能力^[20]。这种随着个体发育而逐渐增强的听觉能力, 可能是鳙幼鱼应对生态环境变化的适应性策略之一。此外, 由于实验所用鳙幼鱼个体较小, 雌雄形态难以区分, 而性别相关的听觉差异又主要集中在生殖阶段才显著体现^[13], 所以在未来研究中, 可以增加更多不同性别、不同体长范围及不同生长环境鳙的听觉特性研究, 构建鳙全生命周期的听觉发育图谱。

鱼类敏感的听觉能力使其在避敌、繁殖和群体通信等方面更有优势。根据声音在水中的传播规律, 声强随距离的增加而衰减, 衰减程度约与距离的平方成反比^[23], 理论上鳙幼鱼的听觉阈值每降低6 dB, 其有效探测距离约能增加一倍。本研究发现, 大体长组鳙幼鱼的平均听觉阈值比小体长组降低了5 dB, 这表明, 随着体型增长, 大体长鳙幼鱼在面对声音相关的捕食威胁或同伴预警信号等方面的感知距离比小体长个体更远, 有更大的生存优势。对声音行为控制来说, 对于听觉阈值低的大个体鳙幼鱼可以使用声压级更低的声音进行有效控制, 从而降低实际应用中的能源消耗和设备成本。反之, 对于听觉阈值较高的小个体鳙幼鱼, 则需要输出更高声压级的声音才能达到相同的效果, 这就对能耗提出更高要求, 也就需要功率更大的设备。因此, 在利用声学技术进行渔业资源管理时, 应根据主要目标鱼来选择声音信号的频率和声压级, 以实现效能与成本的最佳平衡。此外, Kojima等^[24]的研究表明, 使用AEP法测得的听觉阈值通常会高于鱼类的行为反应阈值, 若此现象同样存在于鳙中, 那么实际应用于鳙的声学控制的阈值可能比电生理数据的结果更低, 这还有待行为实验进一步验证。

鱼类听觉阈值的测定为声音控制行为技术的开发与优化提供了重要的基础数据。鱼类听觉曲线不仅能清晰界定目标鱼的有效听觉频率范围, 而且更能精准揭示该物种最敏感的频率区间。例如, 王明云等^[3]对比了宽频的草鱼摄食声(200—11000 Hz, 主峰在1200 Hz)和4种单频音(500、1000、2000、3000 Hz)对草鱼的诱集效果。结果显示, 摄食发声有显著的诱集效果, 而使用四种单频音进行诱集则和对照组没有显著差异。这表明, 根据经验选定的单频音频率可能并不在草鱼的敏感听觉范围内, 而宽频的摄食声则涵盖了其敏感频率。同样, Piper等^[12]在对欧洲鳗鲡(*Anguilla anguilla*)的驱赶实验中使用12 Hz的次声作为驱赶信号, 尽管鳗鲡在声源附近出现了行为的变化, 但仍有78%的欧洲

鳗鲡通过了该区域, 通过率与对照组无显著差异。而Riesgraf等^[25]播放水下摩托艇引擎产生的宽频声后, 发现鲤(*Cyprinus carpio*)在船闸处停留的时间减少了约三分之一, 降低了鲤通过船闸的概率。这些实验都表明声音控制鱼类行为技术的应用都依赖于目标鱼的听觉敏感声音信号的使用。另一方面, 鱼类对声音的吸引或回避还应考虑其对声音的适应性。目标鱼敏感的频率在不同时域的组合形成的声境特征可能体现不同的生物学意义, 即可能触发目标鱼不同程度的感知, 从而引起吸引或回避反应。因此, 在后续的研究中, 有必要开展不同时间间隔的单频音序列对鱼类的行为响应差异, 开发出对鱼类行为控制具有长期效果的声音序列。

综上所述, 本研究揭示了鳙幼鱼的听觉敏感频率, 并发现其听觉阈值随体长增加(生长发育)而降低。这一结果为开发以400 Hz为核心频率的声学行为控制技术提供了关键的生理学依据。同时, 根据鳙幼鱼的个体大小差异调整声源强度, 可实现对不同个体的差异化控制。这项基于鱼类听觉敏感性的基础研究, 不仅能精确选择有效的声音频率, 而且能在最低能量消耗下确保可靠的行为控制效果。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Fay R. Soundscapes and the sense of hearing of fishes [J]. *Integrative Zoology*, 2009, 4(1): 26-32.
- [2] Li J X, Li X B, Bai Y Q, et al. A preliminary study on the acoustic deterrence system at Xianghe fishway in Xiang River, a tributary of the Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2024, 48(9): 163-174. [李嘉欣, 李晓兵, 白艳勤, 等. 雅鲁藏布江支流湘曲湘河鱼道声驱鱼效果初探 [J]. 水产学报, 2024, 48(9): 163-174.]
- [3] Wang M Y, Shen X J, Ren K Y, et al. The attractive effect of feeding sound to juvenile grass carp *Ctenopharyngodon idellus* [J]. *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 [J]. 水生生物学报, 2021, 45(1): 153-160.]
- [4] Chen X L, Shang J W, Wang Y W, et al. Seasonal dynamic changes and driving factors of zooplankton community in a silver carp and bighead carp stocked reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(2): 566-579. [陈欣蕾, 商静雯, 王耀伟, 等. 鲢鳙放养水库浮游动物群落季节演替及影响因素分析 [J]. 湖泊科学, 2025, 37(2): 566-579.]
- [5] Liu J K, Xie P. Direct control of *Microcystis* bloom through the use of planktivorous carp-closure experiments and lake fishery practice [J]. *Ecologic Science*, 2003, 22(3): 193-198. [刘建康, 谢平. 用鲢鳙直接控制

- 微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践 [J]. 生态科学, 2003, **22**(3): 193-198.]
- [6] Zhang X G, Zhang S W, Tang X M, *et al.* Auditory threshold of the juvenile *Siganus guttatus* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, **30**(7): 813-820. [张旭光, 张沈威, 唐贤明, 等. 星斑篮子鱼幼鱼的听觉阈值 [J]. 中国水产科学, 2023, **30**(7): 813-820.]
- [7] 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.]
- [8] Colleye O, K  ver L, Lecchini D, *et al.* Auditory evoked potential audiograms in post-settlement stage individuals of coral reef fishes [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2016(483): 1-9.
- [9] Lu Z, Tomchik S M. Effects of a red-tide toxin on fish hearing [J]. *Journal of Comparative Physiology A, Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 2002, **188**(10): 807-813.
- [10] 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.
- [11] Ladich F, Fay R R. Auditory evoked potential audiometry in fish [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2013, **23**(3): 317-364.
- [12] Corwin J T, Bullock T H, Schweitzer J. The auditory brain stem response in five vertebrate classes [J]. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1982: **54**(6): 629-641.
- [13] Kenyon T N, Ladich F, Yan H Y. A comparative study of hearing ability in fishes: the auditory brainstem response approach [J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 1998, **182**(3): 307-318.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Pan H L, Wang J P, Yu D Z, *et al.* Establishment and application of zebrafish auditory evoked potential (AEP) detection system [J]. *Journal of Audiology and Speech Pathology*, 2017, **25**(3): 269-274. [潘豪来, 王际平, 于栋帧, 等. 斑马鱼听觉诱发电位检测系统的建立和应用 [J]. 听力学及言语疾病杂志, 2017, **25**(3): 269-274.]
- [18] Li J J, Wu Z Q, Hu M L. Study on otolith and growth in juvenile of the four domestic fishes from Hukou section of the Yangtze River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, **31**(6): 56-61. [李建军, 吴志强, 胡茂林. 长江湖口水域四大家鱼幼鱼的耳石与生长研究 [J]. 水生态学杂志, 2010, **31**(6): 56-61.]
- [19] Haddon C, Lewis J. Early ear development in the embryo of the zebrafish, *Danio rerio* [J]. *Journal of Comparative Neurology*, 1996, **365**(1): 113-128.
- [20] Popper A N, Hastings M C. The effects of anthropogenic sources of sound on fishes [J]. *Journal of Fish Biology*, 2009, **75**(3): 455-489.
- [21] Tanimoto M, Ota Y, Inoue M, *et al.* Origin of inner ear hair cells: morphological and functional differentiation from ciliary cells into hair cells in zebrafish inner ear [J]. *The Journal of Neuroscience*, 2011, **31**(10): 3784-3794.
- [22] Yan H Y, Fine M L, Horn N S, *et al.* Variability in the role of the gasbladder in fish audition [J]. *Journal of Comparative Physiology A, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 2000, **186**(5): 435-445.
- [23] Qu K, Hu C, Zhao M. Single parameter inversion using transmission loss in shallow water [J]. *Acta Acustica*, 2013, **38**(4): 472-476.
- [24] Kojima T, Suga T, Kusano A, *et al.* Acoustic pressure sensitivities and effects of particle motion in red sea bream *Pagrus major* [J]. *Fisheries Science*, 2010, **76**(1): 13-20.
- [25] 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.

AUDITORY THRESHOLDS OF THE JUVENILE BIGHEAD CARP (*ARISTICHTHYS NOBILIS*) WITH DIFFERENT BODY LENGTH

SONG Hai-Tian¹, GE Qi-Tong¹, REN Long² and ZHANG Xu-Guang¹

(1. College of Oceanography and Ecological Science Engineering Technology Research Center of Marine Ranching, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resource Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

Abstract: The bighead carp (*Aristichthys nobilis*) is an economically and ecologically vital species in Asian freshwater systems. Its hearing capability, crucial for survival behaviors like predator avoidance and communication, is enhanced by the Weberian apparatus connecting the swim bladder to the inner ear. However, little is known about the ontogenetic development of auditory sensitivity, particularly during the critical juvenile stage. This study aimed to quantify the auditory thresholds of juvenile bighead carp across different body sizes to elucidate hearing development and establish a physiological basis for acoustic-based management. Using the non-invasive Auditory Evoked Potential (AEP) technique, we measured hearing in 30 juveniles divided into three size groups: small (7.9 ± 0.4 cm), medium (10.9 ± 0.8 cm), and large (14.2 ± 0.7 cm). Auditory thresholds were determined for pure tone bursts (100—2000 Hz) under controlled lab conditions. The threshold was objectively defined as the lowest sound level eliciting a repeatable neural response, confirmed by analyzing AEP waveforms from phase-inverted (90° and 270°) stimuli to cancel artifacts. Results revealed an asymmetrical “V-shaped” audiogram for all groups, indicating specialized low-frequency hearing. The maximum sensitivity occurred at 400 Hz [overall mean threshold: (93.0 ± 3.0) dB re $1 \mu\text{Pa}$], while sensitivity sharply decreased at higher frequencies [reaching (125.0 ± 4.3) dB at 2000 Hz]. A significant negative correlation was found between auditory threshold and body length, demonstrating improved hearing sensitivity with growth. This effect was most pronounced at 400 Hz, where the large-size group was 5 dB more sensitive than the small-size group ($P=0.001$). Significant improvements were also observed at 100 and 1000 Hz. This enhancement is likely due to the ongoing maturation of the inner ear and the Weberian apparatus-swim bladder system. Ecologically, these findings imply that smaller juveniles are more vulnerable to acoustic masking from anthropogenic noise. Our data provide essential parameters for ecological risk assessment and for developing size-selective acoustic control technologies. We recommend noise mitigation in juvenile habitats prioritize frequencies ≤ 400 Hz. Future studies should integrate behavioral assays to determine response thresholds and include wild and adult populations to facilitate a comprehensive, life-cycle-based management strategy.

Key words: Fish hearing; Auditory evoked potential (AEP); Acoustic deterrence; Behavioral control