

DOI: 10.3969/j.issn.2095-9869.20251002001

http://www.yykxjz.cn/

徐茂冉, 朱弼成, 张旭光, 祝斐. 养殖场施工噪声对大黄鱼幼鱼听觉敏感性的影响. 渔业科学进展, 2026, 47(2): 180–191
XU M R, ZHU B C, ZHANG X G, ZHU F. Effects of aquaculture construction noise on auditory sensitivity of large yellow croaker, *Larimichthys crocea*. Progress in Fishery Sciences, 2026, 47(2): 180–191

养殖场施工噪声对大黄鱼幼鱼听觉敏感性的影响*

徐茂冉¹ 朱弼成² 张旭光^{1①} 祝斐^{3①}

(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. 中国科学院成都生物研究所 四川 成都 610213; 3. 江苏海洋水产研究所 江苏 南通 226007)

摘要 大黄鱼(*Larimichthys crocea*)作为中国重要的经济养殖鱼类,具有灵敏的听觉能力,对水下噪声敏感,其养殖过程中面临的水下噪声胁迫和由此引起的福利损伤不容忽视。本研究旨在探究养殖场施工引发的水下噪音对养殖池内大黄鱼幼鱼的听觉能力的影响,分析个体大小与听觉阈值的关系,揭示工程水下噪声暴露对大黄鱼幼鱼听力的损害特征。实验采用微创的听觉诱发电位(auditory evoked potentials, AEP)技术,在养殖场施工前后,测量了不同体型大小的大黄鱼幼鱼的听觉阈值和频率敏感性,并通过广义线性混合效应模型(generalized linear mixed models, GLMMs)进行统计分析。结果显示,养殖场施工期间存在主峰值 840 Hz、143.59 dB 的宽频水下噪声;大黄鱼幼鱼的听觉敏感范围为 400~600 Hz,其中 500 Hz 平均听觉阈值为(75.75±4.14) dB;施工噪声暴露后大黄鱼幼鱼整体听觉阈值显著升高,平均升高 5.91 dB,尤其在其最敏感频率范围 400~600 Hz 的听觉阈值升高幅度最大,平均达 11.42 dB。进一步的分析研究发现,大黄鱼部分频率听觉敏感性与体重呈显著负相关,交互作用的统计分析也证明了体型因素对噪声暴露效果的影响。本研究首次获取了大黄鱼的幼鱼听觉曲线,证明了施工水下噪音可导致大黄鱼在敏感频段下听力显著损失,个体大小可能是影响大黄鱼听觉能力和噪声适应能力的重要因素,这些发现为改善养殖大黄鱼的生存环境、提升其福利水平提供科学依据。

关键词 大黄鱼;水下噪声;听觉诱发电位;听觉阈值;鱼类福利

中图分类号 S917 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2026)02-0180-12

随着全球水产养殖业的集约化和工业化发展,养殖鱼类的福利问题日益受到关注(Browning, 2023; Tschirren *et al.*, 2021)。鱼类福利是指养殖过程中鱼类享有健康舒适的环境、充足的营养、免受痛苦与压力的生存状态,水下声音刺激也是影响鱼类福利的重要因素(秦传新等, 2020)。在水产工业化养殖环境中,来自于充氧、投饵、过滤系统等设备的运行给鱼类养殖标准化的水质管理和营养供给提供基础,但同时也

在养殖中引入新兴的物理胁迫源——水下噪声。在过去的研究中,水下噪声污染研究集中在船舶噪声(Codarin *et al.*, 2009; Badlowski *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2025)和海上风电场水下噪声(Niu *et al.*, 2023; Xie *et al.*, 2024)等对水生动物的生理及行为影响。然而,养殖环境中的水下噪声对鱼类感觉系统的影响仍鲜见报导。因此,对于水产养殖相关的水下噪声特征分析以及其对鱼类听觉能力、生理和行为进行评估也变

* 国家自然科学基金(32373100)和国家重点研发计划(2023YFD2401902)共同资助。徐茂冉, Email: 1369941488@qq.com

① 通信作者: 张旭光, 副教授, Email: zhang_xuguang@163.com; 祝斐, 副研究员, Email: ebancool@126.com

收稿日期: 2025-10-02, 收修改稿日期: 2025-11-12

得愈发重要。

很多鱼类依靠声音线索进行种间交流、生殖、觅食、导航和感知环境(Bass *et al*, 2003; Ladich, 2024; Lugli *et al*, 2003; McKenna, 2020)。以大黄鱼(*Larimichthys crocea*)为代表的石首鱼科(Sciaenidae)鱼类以其对声音的敏感性而备受关注。几乎所有石首鱼类都能发声,并将声音用于捕食、繁殖等行为(刘贞文等, 2014; 殷雷明, 2017; Kim *et al*, 2024; Su *et al*, 2023; Yoon *et al*, 2025)。渔民常常通过听取石首鱼的生殖声音来定位其产卵场(Kim *et al*, 2024)。研究表明,大多数鱼类通过感知水下声音的粒子运动(particle motion)(Popper, 2023; Schulz-Mirbach *et al*, 2020; Zhang *et al*, 2021)来听到声音,少数鱼类因具有与内耳相连的特殊结构可以感知到水下声压(sound pressure)。石首鱼科鱼类以其独特的鱼鳔结构对水下声音的声压和粒子运动都具有一定的敏感性,这也是它们更容易被水下噪声影响的原因。大黄鱼肉质鲜美、营养丰富,是我国重要的沿海经济海洋鱼类(孙威博等, 2025; Han *et al*, 2025)。但大黄鱼对水下声音等外部刺激高度敏感,如历史上的敲罟作业,就是利用特定声音对大黄鱼进行破坏性的捕捞(Schulz-Mirbach *et al*, 2012; Wilson *et al*, 2009)。在养殖过程中也会因偶发的水下噪声或振动而引发大规模的应激死亡,这对养殖的技术和环境提出了新的挑战。

水下噪声源产生的连续性或脉冲性低频噪声,其频率范围往往与许多鱼类的听觉和发声的频率重叠(Duarte *et al*, 2021),因而引发一系列与听觉相关的生理和行为反应(Cox *et al*, 2018)。然而,目前关于大黄鱼的听觉能力及其在噪声暴露时的听觉损伤程度缺乏直接的证据,制约了养殖水下噪声对鱼类影响的准确评估。因此,本研究采用微创听觉诱发电位技术,结合养殖场典型施工时的水下噪声的特征分析,探究了施工噪声暴露对大黄鱼幼鱼听觉能力的影响,以明确其听觉损伤的具体表现,旨在阐明施工期水下噪声对大黄鱼听觉功能的影响机制,以期为制定水产养殖行业水下噪声管理标准提供关键科学依据,从而改善养殖环境,提升鱼类福利,推动大黄鱼养殖业的绿色可持续发展。

1 材料与方法

1.1 实验材料与设计

实验用大黄鱼为江苏海洋水产研究所如东养殖基地当年(2025年4—5月)幼鱼,共计26尾,平均体长(11.22±3.18)cm,平均体重(23.33±24.12)g,养殖于

长6m、宽1.5m、水深1.5m的水泥鱼池内。养殖用水为自然海域海水,经过沉淀过滤后使用。水体盐度26~28,溶解氧6.5~7.4mg/L,水温20~22℃。养殖期间使用大功率增氧气泵(XGB-1500;1500W,双帆)曝气,每日定时投喂定制颗粒饵料(蛋白含量42%,脂肪含量3%)。每日进行日常吸污换水,换水率为50%,有效去除水体中包括残余饲料在内的有害物质,降低病害发生风险。

测试时,选取体表无损伤、游动活跃的个体进行实验。其中选取体型水平接近的大黄鱼为标准体重重组,噪声暴露前后各7尾[暴露前:(11.47±1.88)g;暴露后:(10.76±1.69)g],统计大黄鱼基础听力及噪声暴露损伤。此外,一些其他体重鱼(5.43、5.85、16.86、20.51、20.40、18.29、42.40、58.58、49.80、22.25g),仅用作探究体重在大黄鱼听力中的影响纳入统计模型。

1.2 养殖场施工噪声

2025年5月,养殖场因地下排水系统维修进行了土木施工。施工期间的主要噪声为养殖房外的工程钻机(128T AVT HUMMER; 鼎灿)作业,同时夹杂水泥敲击、水泥搅拌等声源。工程作业地点距离大黄鱼养殖水泥水池3~10m不等。钻机作业时间持续3d,每天施工时间为07:00—11:00,每次钻机作业时间10~20min,中间间隔30min敲击和挖土。施工期间,养殖环境保持正常水质参数。

为确定养殖池内水下噪声特征,使用水听器(Reson TC4032,灵敏度-170dB re 1V/μPa; Teledyne Marine, Slangerup, 丹麦)和信号采集仪(BK3050-A-040; Brüel & Kjær, Skodsborgvej, 丹麦)记录和分析施工时钻机作业时水下噪声的声压特征。使用定制的粒子加速度计(灵敏度10mg/μPa, 中国)和信号采集仪记录和分析水下噪声的粒子运动特征。粒子运动同时记录了x、y、z三轴方向的粒子加速度,并利用以下公式(Cardinal *et al*, 2018)计算水体中总粒子加速度(dB re 1μm/s²):

$$L_d = 20\log_{10}(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) \quad (1)$$

1.3 鱼类听觉诱发电位

实验前,将实验大黄鱼先置于2%鱼安定(MS-222)海水小桶中麻醉,待其刚停止自主游动、推翻后不能迅速自主翻身时,立即放入听觉测试池中夹持放置,防止实验鱼过度麻醉,待其恢复正常鳃盖运动频率时开始听觉测试,减少麻醉深度对实验的影响。听觉诱发电位(auditory evoked potential, AEP)记

录参考实验室之前的研究(张旭光等, 2018)。实验在直径 50 cm 的圆柱形水槽内进行, 水深约 25 cm。水槽底部放置水下扬声器(UW-30, University Sound, 美国)。实验时, 利用自制夹持器, 使鱼头背露出水面 1~2 mm。听觉诱发电位由金属针电极(Rochester electro-medical, 美国)采集, 记录电极轻插于实验鱼头部(延脑上方), 参考电极置于实验鱼鼻孔附近, 接地电极直接置于实验水体中。所有电极均直接连接至前置放大器(RA4LI, Tucker Davis technologies, TDT, 美国), 并通过光纤与 TDT 听觉生理工作站(RZ6, 内置数模转换和信号同步, TDT, 美国)相连。

声音刺激信号由 SigGenRZ (TDT, 美国)设置产生, 并通过前级功放(S2-350, SANSUI, 日本)输入水槽底部的水下扬声器。实验采用单纯音刺激频率为 100、200、300、400、500、600、700、800、1 000 和 1 200 Hz, 声音时程(duration)为 12 ms, 含 2 ms 起落(rise/fall), 以减少声音输出的瞬变。声音刺激强度设置为从 130 dB re 1 μ Pa (以下均简称 dB)以 3 dB 递减至 60 dB, 每一梯度都设置 2 次相位相反(90°和 270°)的声音信号, 以消除声波本身的干扰, 重复 800 次。水下信号的实际强度由位于实验鱼内耳附近的水听器(8103, B&K, 丹麦)进行实时监测, 并同步输入 TDT 听觉电生理工作站。在实验完成后, 采用定制粒子加速度计(灵敏度 10 mg/ μ Pa, 中国)监测背景和每个刺激频率在不同声压级的粒子加速度。

鱼类听觉阈值的确定, 过去采用刺激声音强度逐步降低至产生不可重复的 AEP 的波形来确定(Kenyon *et al*, 1998)。典型的 AEP 波形有 2 个重要特征, 由于鱼类的听觉毛细胞的对称结构特征, 不同声音相位的 AEP 波形具有一定的可重合性, 且 AEP 频率往往是声音频率的 2 倍。因此, 通过对 AEP 波形进行傅里叶变换, 得到频谱峰值(Casper *et al*, 2006、2007; Parmentier *et al*, 2021), 当频谱主峰位置完全偏离声音频率的 2 倍时, 则为该频率的听觉阈值。该方法在面对较强的背景噪声时具有较强的稳定性, 但该方法获得的听觉阈值明显高于其他的行为学结果(Popper, 2023)。为了更可能接近反映真实的大黄鱼听觉水平, 我们采用了规定信噪比的方式来确定听觉阈值, 即规定一个固定的信噪比(AEP 信号段的波形峰峰值与非 AEP 信号波形的峰峰值的比值), 一般设为 2 : 1, 当信噪比低于规定水平时, 则认为到达听觉阈值, 该方法的优点是各个频段具有统一均等的判断标准——相同比例的电幅值。

1.4 数据分析

对于本研究中 AEP 统计分析, 在单个个体内部测试了多个频率。因此, 设置个体为随机因素, 频率、体重和是否噪声暴露是固定因素, 听觉阈值反应是因变量, 通过广义线性混合效应模型(generalized linear mixed models, GLMMs)进行分析, 该模型的核心优势在于因变量可以不满足正态分布的假设, 同时结合了固定效应和随机效应的优点, 因此更加灵活和高效, 十分适合小样本的统计(Bolker *et al*, 2009; Ofori *et al*, 2020)。所有数据以平均值 \pm 标准差($\bar{x} \pm SD$)表示, 统计分析使用 MATLAB 和 SPSS Statistic 完成, 使用 Origin 进行基础分析和作图。

2 结果

2.1 背景噪声与施工噪声特征

图 1 展示养殖池未启动增氧泵等主要养殖设备时的背景水下噪声, 其频率分布以低频率为主, 高频呈逐步衰减趋势。0~500 Hz 区间声压级约为 60~80 dB 与自然水域的水流声接近。整体频谱较为平稳, 仅在 200~400 Hz 及 800~1 000 Hz 处有轻微波动, 整体上属于低强度、宽频率范围的自然声景。在启动增氧泵、循环泵等养殖设备后整体声压级升高, 相比未启动养殖设备时, 其差值最高出现在 537 Hz 处, 差值约为 35.27 dB, 展示了增氧泵、循环泵等养殖设备所带来的水下噪声特征。

施工水下噪声波动剧烈, 在时域中表现为脉冲特征(图 1), 在频谱分析中 500~1 200 Hz 处有多个峰值, 其主峰值在 840 Hz, 143.59 dB, 其次峰值在 509 Hz, 130 dB。施工水下噪声的声压级整体比背景噪声值平均高出(47.43 \pm 11.43) dB, 在低中频较背景噪声高出 40~60 dB, 在高频段(3 000~4 000 Hz)高 30~50 dB(图 2)。

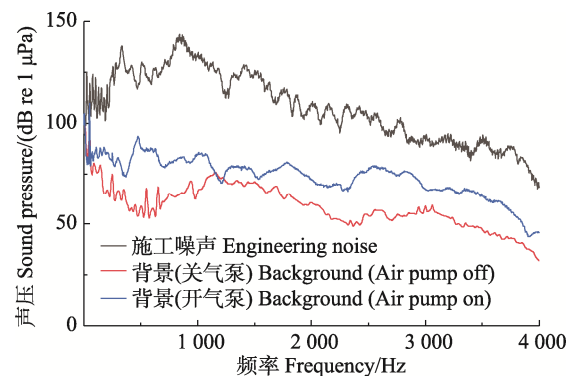


图 1 养殖水池环境中水下噪声频谱特征分析
Fig.1 Power spectrum of different underwater noise in aquaculture tank

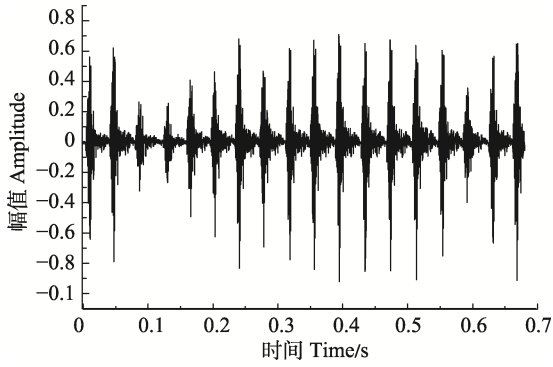


图 2 施工钻机作业产生的水下噪声时域特征

Fig.2 Time-domain characteristics of underwater noise from engineering activities

施工水下噪声粒子运动的频率组成与声压基本一致, 主要能量集中在 x 轴和 y 轴方向上, z 轴方向粒子运动的差别与背景水下噪声接近, 基本可以忽略不计(图 3), 符合施工噪声声源与养殖水池之间的位

置关系。 x 轴、 y 轴和总体粒子运动的频谱主峰依然在 800 Hz 左右, 但频率分布上更加平均。同时, 在施工钻井作业时, 大黄鱼多数集群在养殖池角落, 有 4 条出现了失控的逃窜行为, 占养殖池鱼群总数(37 尾)的 10.81%, 表明大黄鱼施工期噪声刺激的感知, 出现异常的行为特征。

2.2 听觉诱发电位实验结果

2.2.1 诱发电位波形特征 实验水槽的背景噪声在 700 Hz 以上频率普遍接近 40 dB (图 4), 低于实验系统各刺激声音的最低分贝值, 表明听觉测试未受到背景噪声的掩蔽效应影响。实验中, AEP 波形背景电压幅值普遍在 50~100 nV (图 5), 实验以 2 : 1 的信噪比为最低波形重复标准, 即 100~200 nV 可重复的 AEP 信号电压幅值为阈值极限最低电压幅值, 统一听觉阈值的认定标准。

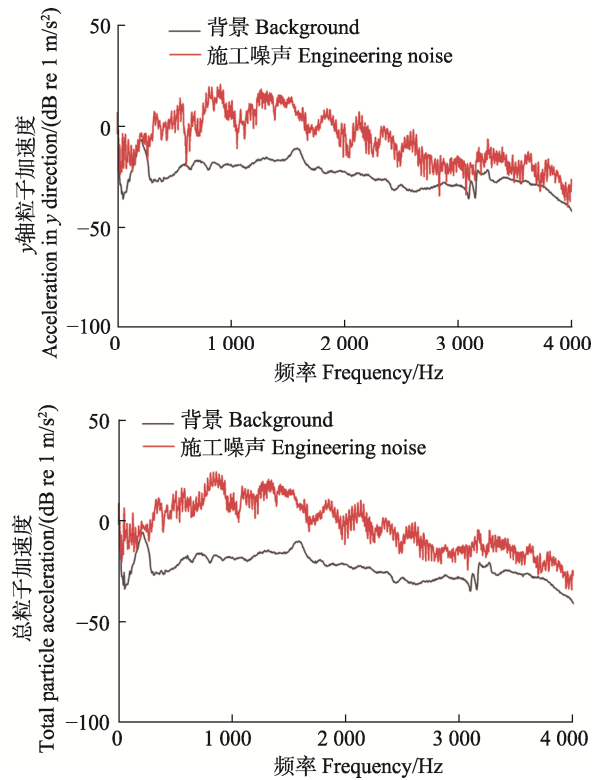
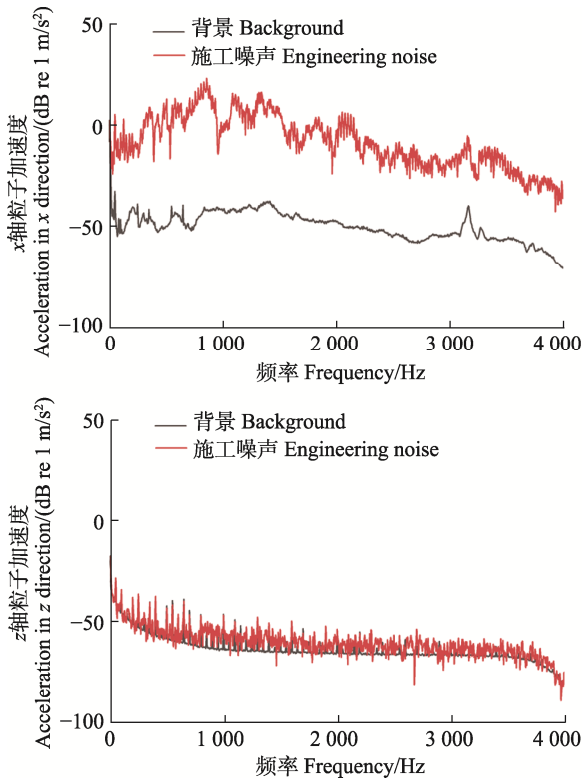


图 3 养殖池水下噪声粒子运动的频谱特性

Fig.3 Spectral characteristics of particle motion in an aquaculture tank

大黄鱼 AEP 波形, 通常表现为相对于基线的低频起伏, 在这个起伏的基础上存在明显的 2 倍于刺激信号频率的波形特征, 表现为伴随波动数量的增加。AEP 的延时一般在 3~5 ms 左右, 完整的 AEP 波形持续时间基本与声音刺激时间相同, 刺激强度逐渐衰减的过程中响应时间逐渐增加, 且伴随波动也随之减

少, 而 AEP 信号波形结束的位置则基本不变。相反相位的 AEP 波形的波峰和波谷基本可以重合, 但存在峰值差异。以 500 Hz 为例, 可以发现 AEP 波形, 其最初为一个相对于基线的负趋向起伏, 紧接着一个正向的起伏, 并伴随出现 5~7 个小波动。在 80 dB 的 AEP 波形中, 图 5 示第一个绿色虚线框中, 尽管在伴

随波动数量减少,仍可见相反相位中伴随波的起伏趋势相互重合,但其峰值幅度明显不同。而在 77 dB 的 AEP 波形中的相同位置处,其伴随波的起伏趋势明显相反,表明此时大黄鱼已经不能感知到声音信号。

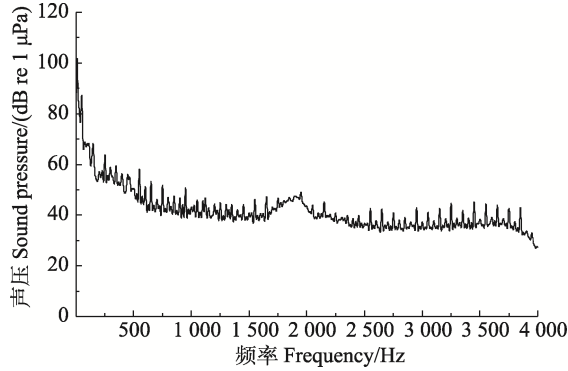


图4 用于听觉诱发电位测量的实验水池的本底噪声频谱特性

Fig.4 Spectral characteristics of the background noise in the experimental aquaculture tank utilized for auditory evoked potential recordings

2.2.2 大黄鱼听阈水平 养殖场施工前,实验共记录了 13 尾大黄鱼幼鱼,在 100~1 200 Hz 短纯音刺激下的 AEP 反应。取体重规格一致的 7 尾听觉阈值数据平均后,可得出大黄鱼的听力曲线图(图 6a)。大黄鱼

的基本听阈呈现明显的“V”字形,其最低点为 500 Hz,是大黄鱼幼鱼的最敏感频率,在 3 dB 的分辨率(梯度衰减)下的最低阈值可以达到 65.90 dB,7 尾鱼的均值为(75.75±4.14) dB。在 100~500 Hz,其听觉阈值逐步降低,600 Hz 之后其听觉阈值迅速提高,在 100 Hz 的平均听觉阈值为(101.12±2.14) dB,700 Hz 的平均听觉阈值为(91.88±3.81) dB,在 1 200 Hz 的平均听觉阈值则达到(123.65±3.76) dB(图 6)。整体来说,大黄鱼敏感听觉范围主要在 400~600 Hz,这一频率范围内听觉阈值与最低阈值差均不超过 3 dB。

在养殖场钻机作业结束后,立即对 11 尾大黄鱼幼鱼进行了听觉阈值测试,选取其中体重规格相近的 7 尾个体用于后续分析。结果显示,噪声暴露后大黄鱼的听觉阈值显著升高(图 6b),暴露前后听阈差值的平均值为 5.91 dB,表明其听觉系统已发生急性功能性损伤,且在大黄鱼幼鱼最敏感的中低频段最为显著,而在最高频率点则效应减弱甚至反转。噪声暴露前后,在 100~300 Hz 范围的听觉阈值变化的数值幅度随频率提高。暴露后,分别升高至 105.40、91.97、89.25 dB,增加了 2.27、4.68、8.57 dB。400~600 Hz 的听觉阈值最低,听觉阈值的升高幅值也最大且接近,跃升了 11.14、11.14、12 dB (平均值 11.42 dB),

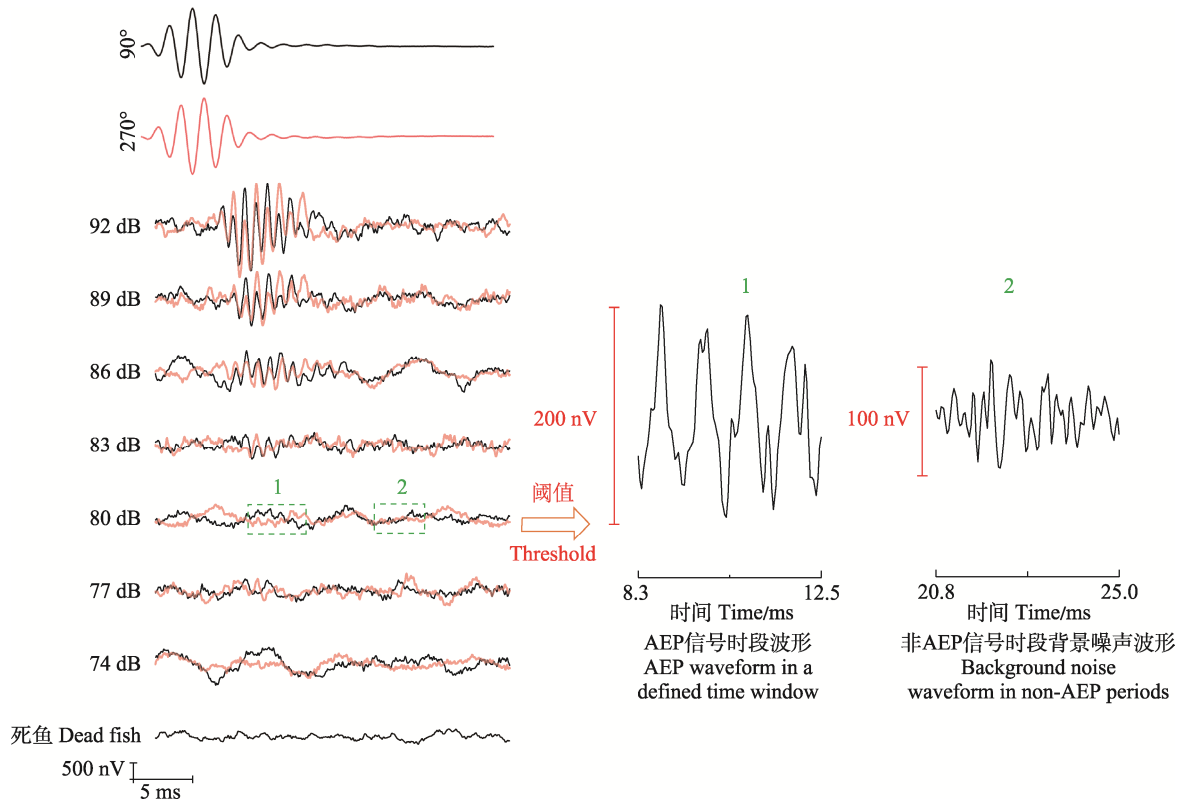


图5 500 Hz 频率诱发电位波形

Fig.5 Auditory evoked potential (AEP) waveform at 500 Hz

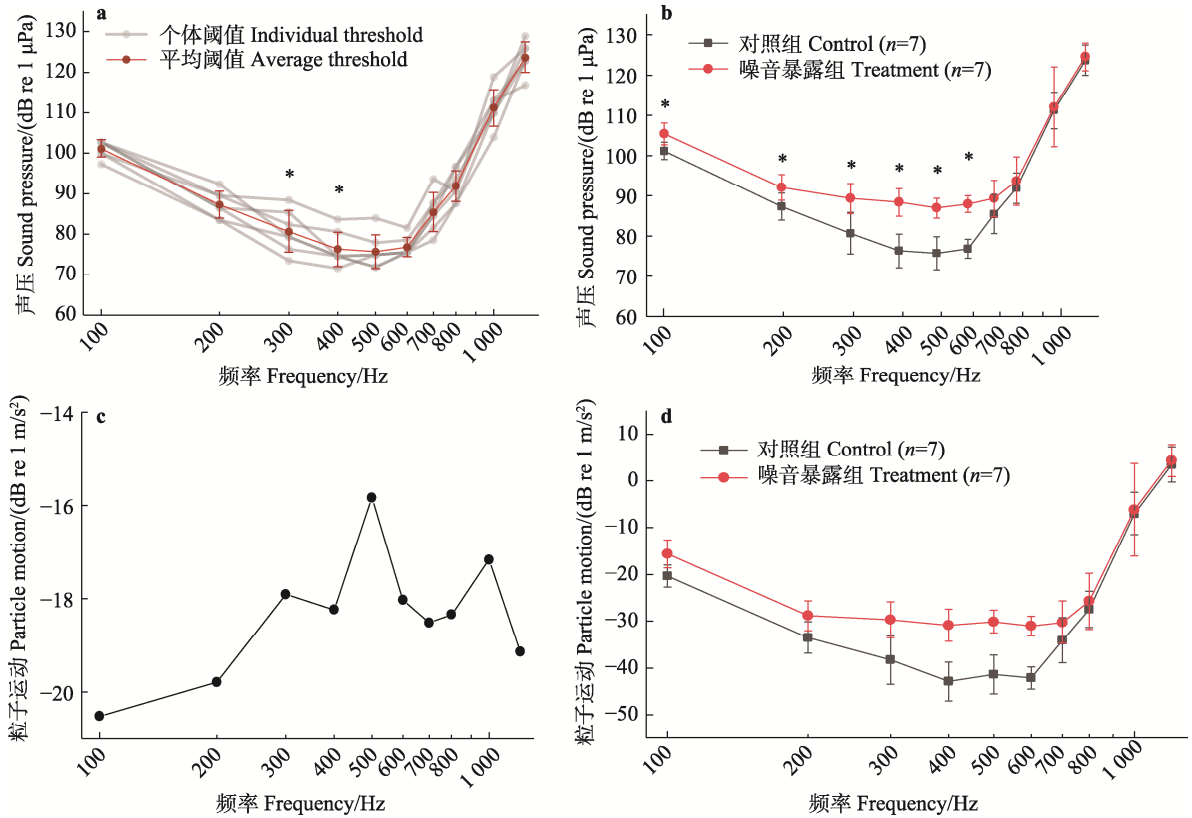


图 6 大黄鱼听力图
Fig.6 Audiogram of the large yellow croaker

a: 大黄鱼基本听力图, *代表该频率下体重因素与听觉阈值有显著相关性; b: 大黄鱼噪音暴露前后听觉阈值, *代表该频率下噪音暴露前后听觉阈值具有显著差异; c: 在 101 dB 参考声压级下, 粒子运动矢量随频率的变化; d: 粒子运动听觉敏感曲线。

a: Basic audiogram of the large yellow croaker; b: Changes in Auditory thresholds of the large yellow croaker before and after noise exposure; c: Frequency dependence of particle motion vectors at a sound pressure level of 101 dB; d: Particle motion audiogram.

噪声暴露引起的阈值增幅大小之间无显著差异。700 Hz 和 800 Hz 声压增幅开始快速收窄, 其中 700 Hz 的差值为 3.85 dB (85.40~89.26 dB), 800 Hz 的差值降至 1.71 dB (91.88~93.6 dB); 1 000 Hz 声压增幅进一步减小至 0.85 dB (暴露前: 111.18 dB; 暴露后: 112.04 dB); 1 200 Hz 声压从暴露前的 123.65 dB 略微上升至暴露后的 124.51 dB, 差值为 0.85 dB。

通过重复播放在大黄鱼听觉诱发电位实验中的声音信号, 建立了相应位置下不同频率声压与粒子加速度的对应关系模型。其中以与整体听觉阈值中间值接近的 101 dB 声压级为例, 展现粒子加速度在相同声压、不同频率下的变化(图 6c), 进而推导出在同等声压级时刺激声音的理论粒子加速度值。并构建了大黄鱼听觉敏感度曲线(图 6d), 该曲线从粒子运动的角度, 表现了听觉阈值随频率变化的响应特性。作为声压听觉曲线的一种辅助判断, 可以更准确地评估大黄鱼对不同频率声音的敏感性。

使用广义线性混合效应模型(GLMMs)进行统计分析表明, 施工噪声暴露(分组)、测试频率以及体重与分组的交互作用对大黄鱼的听觉阈值具有显著影响(表 1)。数据整体来看, 模型截距[即当所有连续变量取零、分类变量为对照组(Control)时的基线阈值]为 83.571 dB ($P<0.001$)。施工噪声暴露处理(Control/Treatment)的主效应显著, 在以听觉阈值为目标的 GLMMs 分析时, 其固定系数达到了 -27.888 ($t=-4.697$, $P<0.001$)。测试频率(Frequency)对听觉阈值存在显著的正向影响(系数=0.010, $t=2.328$, $P=0.021$)。上述结果说明了整体上的施工噪声暴露对于大黄鱼听觉阈值存在显著影响, 并表现出了频率上的特异性。

更重要的是, 分析发现体重与施工噪声暴露处理存在显著交互作用(体重* Control/Treatment)。具体表现为, 在对照组(Control)中, 体重对听觉阈值的影响与实验组存在显著差异(系数=1.083, $SD=0.376$, $t=2.883$, $P=0.004$)。然而, 体重本身的主效应(系数=

表1 对大黄鱼听觉阈值影响的广义线性混合模型(GLMMs)分析(总体)

Tab.1 Generalized linear mixed model (GLMM) analysis of the effects on the auditory thresholds of *L. crocea* (Total)

模型项 Model item	系数估计值 Estimate	标准差 SD	<i>t</i>	显著性 <i>P</i> Significance	95%置信区间	
					95% confidence interval	
					下限 CI lower	上限 CI upper
截距	83.571	2.523	33.124	0.000	78.600	88.542
体重	-0.009	0.063	-0.148	0.882	-0.133	0.114
[Control/Treatment]	-27.888	5.937	-4.697	0.000	-39.585	-16.191
Frequency	0.010	0.004	2.328	0.021	0.002	0.019
体重*[Control/Treatment]	1.083	0.376	2.883	0.004	0.343	1.823
Frequency*体重	0.000	0.000	1.718	0.087	-2.730×10^{-5}	0.000
Frequency*[Control/Treatment]	0.018	0.010	1.718	0.087	-0.003	0.038
Frequency*体重 *[Control/Treatment]	-0.001	0.001	-1.072	0.285	-0.002	0.001

-0.009, $P=0.882$)以及频率与体重的交互作用(系数=0.000, $P=0.087$)均未达到统计学上的显著性水平。模型中的其他高阶交互项亦不显著。证明体型因素在面对施工噪声暴露的听力损伤时产生了明显影响。

针对各个频率做重复测量的 GLMMs 分析发现:频率与噪声暴露的交互作用显著,表明噪声暴露对不同频率下的听觉阈值影响不同。相对于实验组,对照组在 300 Hz ($\beta=-16.042$, $p=0.006$)、400 Hz ($\beta=-21.437$, $P<0.001$)、500 Hz ($\beta=-19.86$, $P<0.001$)和 600 Hz ($\beta=-18.331$, $P=0.001$)下的听觉阈值降低更为明显。其次,体重与频率的交互作用也在某些频率水平上达到了显著性。在 700 Hz 时,体重对听觉阈值的影响显著为正($\beta=0.163$, $P=0.013$)。此外,在 400 Hz 时,体重与分组的交互作用显著($\beta=0.748$, $P=0.024$),表明体重在面对噪声暴露导致的听觉阈值降低时存在影响。

为了解体型因素对听觉阈值的影响,研究对体重水平在各个频率中相应听觉阈值进行相关性分析,事前检验相应数据,数据本身不符合典型的正态分布,所以实验选用 Spearman 相关系数进行统计分析,听觉阈值与体重的相关性呈现明显的频率特异性。分析结果表明,在大部分测试频率下,听觉阈值与体重之间未发现显著的统计学关联($P>0.05$)。然而,在 300 Hz 和 400 Hz 这 2 个特定频率下,发现了显著的正相关关系。其中,在 300 Hz 时, Spearman 相关系数为 0.673 ($P=0.033$);在 400 Hz 时,相关系数更高,为 0.753 ($P=0.012$)。这一结果展示了在这两个中频段,大黄鱼的体重越大,其听觉阈值越高。

3 讨论

本研究首次获取了大黄鱼的声压和粒子运动的

听觉阈值曲线,填补了该物种长期以来在直接听觉能力评估方面的数据缺失。鱼类主要通过粒子运动感知声音,粒子运动是水下噪音评估的关键参数(Nedelec *et al*, 2016; Popper, 2023)。目前,多数关于水下声音对鱼类影响的研究主要仍然聚焦于声压的分析,但已有研究表明,相比声压,粒子运动在鱼类的听觉场景中扮演着更为重要的角色,其极化信息(包括方向性)对于鱼类检测和定位声学线索至关重要(Jones *et al*, 2024; Veith *et al*, 2024)。本研究也通过间接的方式得到了大黄鱼粒子运动的听觉阈值曲线,作为辅助的判断标准。

本研究旨在探究施工中水下噪声对大黄鱼幼鱼听觉阈值的影响,在分析施工噪声的基本频率特征的基础上,通过广义线性混合模型进一步分析了其体型大小在这一影响过程中的作用。从施工噪声特征来看,其具有高强度、宽频带的特点,属于高强度干扰性噪音(De Lorenzo *et al*, 2024; Lucke *et al*, 2020),时域上呈现“脉冲式”特征,与海上风电场运行及航运产生的低频连续噪音之间具有一定相似性(Niu *et al*, 2023; Xie *et al*, 2024)。更关键的是,工程噪声特征不但与大黄鱼幼鱼听觉敏感范围高度重合,甚至大黄鱼发声主频也在这一范围之内(Kim *et al*, 2024),这一重合会对大黄鱼幼鱼产生双重负面影响:一方面可能引发掩蔽效应,干扰其正常听觉交流;另一方面可能对鱼类听觉毛细胞造成机械性损伤,最终导致听觉敏感性下降(Badlowski *et al*, 2024),并进一步干扰听觉交流。

听觉诱发电位实验结果进一步证实了施工噪声的危害:噪声暴露后,大黄鱼的听觉阈值显著提升,且提升效应在其听觉最敏感的频率范围内表现更为突出。具体而言,大黄鱼幼鱼的敏感听觉频率为

400~600 Hz, 而施工噪声暴露后该频率范围的听觉阈值升高幅度也最高, 意味着其在该频率区间的听觉损伤最大。施工噪声在 500 Hz 和 800 Hz 附近存在峰值, 且 800 Hz 的声压级最高, 但大黄鱼幼鱼在 800 Hz 的听觉阈值在噪声暴露后变化却不明显, 但这可能与大黄鱼幼鱼在 800 Hz 的听觉阈值基数更高, 处理后的附加效应变小有关。尽管目前, 尚不清楚 400~600 Hz 的听觉损失对于大黄鱼幼鱼的生态意义, 但这种“最敏感频率听觉损伤最显著”的现象, 提示施工噪声可能对大黄鱼的声通讯功能及环境感知能力造成严重干扰, 这一结论也与此前关于噪声对鱼类听觉影响的研究结果一致(Codarín *et al.*, 2009; Belanger *et al.*, 2010; Smith *et al.*, 2006)。除生理层面的听觉损伤外, 施工噪音还对大黄鱼幼鱼的行为产生直接影响: 实验中约 10.81%的大黄鱼在噪音刺激下表现出失控的逃窜行为, 这一行为反应表明噪音可能引发大黄鱼的应激反应, 进而导致其能量消耗增加(Xu *et al.*, 2025)。

从听觉损伤角度来看, 目前的研究明确多种因素可导致感音神经性听力损失(sensorineural hearing loss, SNHL), 其中, 噪音、氧化应激、创伤及炎症均能通过损伤内耳毛细胞, 最终引发听力损失(Zhou *et al.*, 2023)。对大西洋石首鱼(*Micropogonias undulatus*)的研究发现, 在 15 min 短期船舶噪声暴露造成的听觉损伤并不显著, 类型上也属于暂时性听觉阈值偏移(temporary threshold shift, TTS), 而在 3 d 内 24 h 重复的船舶噪声暴露就会明显损害其内耳感觉毛细胞并永久降低听力敏感度(Badlowski *et al.*, 2024)。本研究中, 施工作业同样持续 3 d, 但施工噪声每天暴露时长相对短于大西洋石首鱼研究, 但对听觉的损害效果仍然明显, 这可能意味着出现了噪音暴露积累效应的影响。在小鼠的噪音暴露研究中, 即使小鼠听觉能力在有长达 2 周的噪音间隔得到了完全恢复, 但多次引起 TTS 的相对“良性”噪声暴露也能产生积累效应(Cui *et al.*, 2024), 从而导致永久性阈值偏移(permanent threshold shift, PTS)。听力损伤的积累效应及其可能导致的 PTS 会对鱼类福利造成长期损害。导致鱼类听力持续下降, 还会加剧其生理应激反应, 影响生长、觅食效率、繁殖成功率, 并增加疾病易感性(Duan *et al.*, 2025)。遗憾的是, 本实验未能对其噪音暴露后的听觉阈值恢复状况进行进一步的跟踪监测。

统计分析显示, 300 Hz 和 400 Hz 两个频段的大黄鱼听觉阈值与体重之间存在显著的正相关关系。广义线性混合模型(GLMMs)的分析进一步证实了体重与听觉阈值之间显著的交互作用。但这种发育过程中

的相关关系, 在不同物种、不同生长时期存在差异: 在对星斑篮子鱼(*Siganus guttatus*)(张旭光等, 2023)、斑马鱼(*Danio rerio*) (潘豪来等, 2017)等鱼类的听觉研究中, 研究人员认为鱼类体型的增加, 使得听觉系统在这一过程中进一步成熟, 听觉阈值也随之降低。但一些更全面的研究则对这一说法有所补充, 如斑马鱼在 12~20 月龄生长过程中, 尽管体型有所增加, 但听觉系统已经出现衰老情况(Coffin *et al.*, 2024)。而近期的另一研究表明, 条纹锯鲷(*Centropristis striata*)随着体型的增加, 大部分频率的听觉阈值也升高, 仅有少数高频部分接近甚至更低(Stanley *et al.*, 2020)。而本研究中大黄鱼幼鱼的结论与条纹锯鲷的研究相似, 这可能与鱼类听觉系统发育的物种多样性、声学特性以及声波在不同体型鱼体内的传播和接收机制有关。

研究结果明确指出, 施工噪声可导致大黄鱼听力显著下降, 尤其是在其关键通讯频段, 为评估水下噪音污染对大黄鱼种群的影响提供了基础数据, 同时也揭示了体型大小在影响大黄鱼听觉敏感性方面的作用。然而, 本研究也存在一定的局限性。实验样本主要选择了幼鱼, 而大黄鱼主要在繁殖期内发声, 其繁殖行为高度依赖声音交流。后续应开展繁殖期个体对水下噪声的抗干扰能力的研究, 以进一步了解水下噪声对其关键生命阶段的影响。另外, 实验条件为封闭水域的水泥鱼池养殖, 但大黄鱼则更多使用传统网箱养殖和深海抗风浪网箱在开放海域中养殖。因此, 不同发育阶段、不同环境条件(如自然海域)下的大黄鱼对噪声的反应可能存在差异。此外, 本研究主要关注了施工噪声的短期急性影响, 对于长期慢性噪声暴露对大黄鱼听觉、行为、生理和生殖等方面的累积效应, 以及听觉损伤的可恢复性, 仍需进行更深入的探究。未来的研究可以考虑在更接近自然环境的条件下, 对不同年龄和体型的大黄鱼进行长期追踪研究, 以全面评估水下噪声对大黄鱼种群生态的影响。

参 考 文 献

- 刘贞文, 许肖梅, 黄二辉, 等. 大黄鱼的声刺激行为研究. 应用海洋学学报, 2014, 33(1): 105-110 [LIU Z W, XU X M, HUANG E H, *et al.* Study on behavior of sound stimulation for large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*). Journal of Applied Oceanography, 2014, 33(1): 105-110]
- 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. 听力学及言语疾病杂志, 2017, 25(3): 269-274 [PAN H L, WANG J P, YU D Z, *et al.* Establishment and application of zebrafish auditory evoked

- potential (AEP) detection system. *Journal of Audiology and Speech Pathology*, 2017, 25(3): 269–274]
- 秦传新, 潘莞倪, 于刚, 等. 水生生物环境丰容技术及其应用研究进展. *渔业科学进展*, 2020, 41(5): 185–193 [QIN C X, PAN W N, YU G, *et al.* Review on environmental enrichment for aquatic organisms. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(5): 185–193]
- 孙威博, 魏帮鸿, 庄小妹, 等. 不同养殖模式下不同规格大黄鱼品质特征分析. *渔业科学进展*, 2025, 46(4): 140–152 [SUN W B, WEI B H, ZHUANG X M, *et al.* Characterization of large yellow croaker quality in different culture modes and sizes. *Progress in Fishery Sciences*, 2025, 46(4): 140–152]
- 殷雷明. 大黄鱼声诱集行为反应与机理研究. 上海海洋大学博士研究生学位论文, 2017 [YIN L M. The behavior response and attractive mechanism of *Larimichthys crocea* to acoustic stimulus. Doctoral Dissertation of Shanghai Ocean University, 2017]
- 张旭光, 郭弘艺, 宋佳坤. 褐菖鲈的听觉阈值研究. *水生生物学报*, 2018, 42(3): 593–598 [ZHANG X G, GUO H Y, SONG J K. Thresholds for the hearing of marbled rockfish *Sebasticus marmoratus*. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, 42(3): 593–598]
- 张旭光, 张沈威, 唐贤明, 等. 星斑篮子鱼幼鱼的听觉阈值. *中国水产科学*, 2023, 30(7): 813–820 [ZHANG X G, ZHANG S W, TANG X M, *et al.* Auditory threshold of the juvenile *Siganus guttatus*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(7): 813–820]
- BADLOWSKI G A, BOYLE K S. Repeated boat noise exposure damages inner ear sensory hair cells and decreases hearing sensitivity in Atlantic croaker (*Micropogonias undulatus*). *Journal of Experimental Biology*, 2024, 227(2): jeb245093
- BASS A H, MCKIBBEN J R. Neural mechanisms and behaviors for acoustic communication in teleost fish. *Progress in Neurobiology*, 2003, 69(1): 1–26
- BELANGER A J, BOBEICA I, HIGGS D M. The effect of stimulus type and background noise on hearing abilities of the round goby *Neogobius melanostomus*. *Journal of Fish Biology*, 2010, 77(7): 1488–1504
- BOLKER B M, BROOKS M E, CLARK C J, *et al.* Generalized linear mixed models: A practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(3): 127–135
- BROWNING H. Improving welfare assessment in aquaculture. *Frontiers in Veterinary Science*, 2023, 10: 1060720
- CARDINAL E A, RADFORD C A, MENSINGER A F. The potential for the anterior lateral line to function for sound localization in toadfish (*Opsanus tau*). *Journal of Experimental Biology*, 2018: jeb.180679
- CASPER B M, MANN D A. Dipole hearing measurements in elasmobranch fishes. *Journal of Experimental Biology*, 2007, 210(1): 75–81
- CASPER B M, MANN D A. Evoked potential audiograms of the nurse shark (*Ginglymostoma cirratum*) and the yellow stingray (*Urobatis jamaicensis*). *Environmental Biology of Fishes*, 2006, 76(1): 101–108
- CODARIN A, WYSOCKI L E, LADICH F, *et al.* Effects of ambient and boat noise on hearing and communication in three fish species living in a marine protected area (Miramare, Italy). *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(12): 1880–1887
- COFFIN A B, DALE E, MOLANO O, *et al.* Age-related changes in the zebrafish and killifish inner ear and lateral line. *Scientific Reports*, 2024, 14: 6670
- COX K, BRENNAN L P, GERWING T G, *et al.* Sound the alarm: A meta-analysis on the effect of aquatic noise on fish behavior and physiology. *Global Change Biology*, 2018, 24(7): 3105–3116
- CUI X J, XU P X, TIAN T, *et al.* Frequency-specific responses: The impact of an acoustic stimulus on behavioral and physiological indices in large yellow croaker. *Fishes*, 2024, 9(6): 217
- DE LORENZO F, TOMÀS A O, WHITE P R. Underwater noise limits and measurement of underwater radiated noise from merchant vessels. 24th International Conference on Sound and Vibration 2017, London Calling. July 23–27, 2017. London, UK. Institute of Acoustics, 2024. DOI: 10.25144/23968
- DUAN S S, VASCONCELOS R O, WU L L, *et al.* Managing aquaculture noise: Impacts on fish hearing, welfare, and mitigation strategies. *Reviews in Aquaculture*, 2025, 17(3): e70013
- DUARTE C M, CHAPUIS L, COLLIN S P, *et al.* The soundscape of the Anthropocene Ocean. *Science*, 2021, 371(6529): eaba4658
- HAN X R, ZHANG S M, WANG Y B, *et al.* Seedling selection of the large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) for sustainable aquaculture: A review. *Applied Sciences*, 2025, 15(13): 7307
- JONES I T, BONNEL J. Particle motion polarization of offshore fish vocalizations, boat noise, and ambient soundscapes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2024, 155(3_Supplement): A181
- KENYON T N, LADICH F, YAN H Y. A comparative study of hearing ability in fishes: The auditory brainstem response approach. *Journal of Comparative Physiology A*, 1998, 182(3): 307–318
- KIM H, YOON Y G, CHO S, *et al.* Acoustic characteristics of spawning biological sounds of brown croaker (*Miichthys miiuyi*). *Fishes*, 2024, 9(7): 251
- LADICH F. Diversity of sound production and hearing in fishes: Exploring the riddles of communication and sensory biology. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2024, 155(1): 218–228

- LUCKE K, MARTIN S B, RACCA R. Evaluating the predictive strength of underwater noise exposure criteria for marine mammals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 147(6): 3985–3991
- LUGLI M, YAN H Y, FINE M L. Acoustic communication in two freshwater gobies: The relationship between ambient noise, hearing thresholds and sound spectrum. *Journal of Comparative Physiology A*, 2003, 189(4): 309–320
- MCKENNA M F. The sounds around us. *Physics Today*, 2020, 73(1): 28–34
- NEDELEC S L, CAMPBELL J, RADFORD A N, *et al.* Particle motion: The missing link in underwater acoustic ecology. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, 7(7): 836–842
- NIU F Q, XIE J R, ZHANG X X, *et al.* Assessing differences in acoustic characteristics from impact and vibratory pile installation and their potential effects on the large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*). *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1106980
- OFORI M F, TWUM S B, OSBORNE J A Y. Comparison of generalized linear model and generalized linear mixed model—an application to low birth weight data. *Asian Journal of Probability and Statistics*, 2020, 8(3): 31–37
- PARMENTIER E, MARUCCO FUENTES E, MILLOT M, *et al.* Sound production, hearing sensitivity, and in-depth study of the sound-producing muscles in the cowfish (*Lactoria cornuta*). *Journal of Anatomy*, 2021, 238(4): 956–969
- POPPER A N. Hearing diversity in 34 000 fish species: A personal perspective. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2023, 154(3): 1351–1361
- SCHULZ-MIRBACH T, LADICH F, MITTONE A, *et al.* Auditory chain reaction: Effects of sound pressure and particle motion on auditory structures in fishes. *PLoS One*, 2020, 15(3): e0230578
- SCHULZ-MIRBACH T, METSCHER B, LADICH F. Relationship between swim bladder morphology and hearing abilities—a case study on Asian and African cichlids. *PLoS One*, 2012, 7(8): e42292
- SMITH M E, COFFIN A B, MILLER D L, *et al.* Anatomical and functional recovery of the goldfish (*Carassius auratus*) ear following noise exposure. *Journal of Experimental Biology*, 2006, 209(21): 4193–4202
- STANLEY J A, CAIGER P E, PHELAN B, *et al.* Ontogenetic variation in the hearing sensitivity of black sea bass (*Centropristis striata*) and the implications of anthropogenic sound on behavior and communication. *Journal of Experimental Biology*, 2020: jeb.219683
- SU Y N, SONG Z C, LI H Q, *et al.* Call properties of the large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) during reproduction with insight into directivity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2023, 153(6): 3192
- TSCHIRREN L, BACHMANN D, GÜLER A C, *et al.* MyFishCheck: A model to assess fish welfare in aquaculture. *Animals*, 2021, 11(1): 145
- VEITH J, CHAIGNE T, SVANIDZE A, *et al.* The mechanism for directional hearing in fish. *Nature*, 2024, 631(8019): 118–124
- WILSON M, MONTIE E W, MANN K A, *et al.* Ultrasound detection in the Gulf menhaden requires gas-filled bullae and an intact lateral line. *Journal of Experimental Biology*, 2009, 212(21): 3422–3427
- XIE J R, XUE R C, NIU F Q, *et al.* Three-dimensional acoustic propagation of noise from impact pile driving in a complex coastal environment and its effects on large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*). *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1395120
- XU R J, YANG S G, LI Y Y, *et al.* Boat noise increases the oxygen consumption rate of the captive juvenile large yellow croaker, *Larimichthys crocea*. *Animals*, 2025, 15(5): 714
- YOON Y G, KIM H, CHO S, *et al.* Sound production characteristics of the chorus produced by small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in coastal cage aquaculture. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, 13(7): 1380
- ZHANG X H, TAO Y, ZHOU Y L, *et al.* Acoustic properties of the otolith of the large yellow croaker *Larimichthys crocea* (Perciformes: Sciaenidae). *Zoological Studies*, 2021, 60: e64
- ZHOU Y H, FANG C Y, YUAN L, *et al.* Redox homeostasis dysregulation in noise-induced hearing loss: Oxidative stress and antioxidant treatment. *Journal of Otolaryngology - Head & Neck Surgery*, 2023, 52(1): 78

(编辑 马瑾艳)

Effects of Aquaculture Construction Noise on Auditory Sensitivity of Large Yellow Croaker, *Larimichthys crocea*

XU Maoran¹, ZHU Bicheng², ZHANG Xuguang¹①, ZHU Fei³①

(1. Engineering Technology Research Center of Marine Ranching, College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610213, China;

3. Jiangsu Marine Fisheries Research Institute, Nantong 226007, China)

Abstract With the rapid development of aquaculture globally, the welfare of farmed aquatic animals has become a growing concern. As an emerging environmental stressor, underwater noise pollution has garnered major attention in ecotoxicological research because of its impact on the auditory system and behavioral patterns of fish. The large yellow croaker (*Larimichthys crocea*), a representative species of the family Sciaenidae, exhibits high auditory sensitivity. The impulsive low-frequency noise (800–1 200 Hz) generated by construction activities (e.g., engineering drilling) in coastal aquaculture zones substantially overlaps with the most sensitive auditory frequency range (400–600 Hz) of this species, potentially causing hearing impairment and behavioral stress. Although previous studies have demonstrated that low-frequency acoustic stimuli affect physiological indicators in *L. crocea*, the direct evidence of hearing damage and the regulatory effects of body size remain insufficiently explored. This study aims to address these gaps by providing data that can be used to optimize aquaculture environments, enhance fish welfare, and establish noise management standards.

Juvenile large yellow croaker from the Rudong Institute in Jiangsu were subjected to short-term noise exposure experiments in a 6 × 1.5 × 1.5 m concrete tank. The noise source was an engineering drill (128T AVT HUMMER) operated 3–10 m from the tank. Construction activities were conducted daily from 07:00 to 11:00 for 10–20 min per session, at 30-min intervals, over three days. A Reson hydrophone (TC4032) and Brüel & Kjær data acquisition module were used to record the sound pressure level and particle motion of the construction noise. The underwater construction noise was broadband in nature, with a dominant spectral peak at 840 Hz and a corresponding sound pressure level of 143.59 dB. Spectral analysis revealed that the primary frequency range of the noise was 800–1,200 Hz, with intensities 40–60 dB higher than the baseline noise level in the aquaculture tank (60–80 dB). Auditory evoked potential (AEP) experiments were conducted in a 50 cm diameter cylindrical tank using a UW-30 underwater speaker to deliver pure-tone stimuli (100–1,200 Hz, 130–60 dB, 3 dB steps). The AEP signals were recorded using a TDT (Tucker-Davis technologies) auditory electrophysiology workstation. The experiment consisted of two phases: pre-exposure (control group) and post-exposure (treatment group). Each fish was tested at 10 frequencies (100–1200 Hz) to determine auditory thresholds. Generalized linear mixed models (GLMMs) were used to analyze the interaction effects of auditory thresholds on frequency, body weight, and noise exposure. Fixed effects included frequency, body weight, and group (control/treatment), whereas random effects accounted for individual variability. Post-exposure auditory thresholds in *L. crocea* increased significantly ($P < 0.001$), with the greatest threshold elevation observed in the most sensitive frequency range (400–600 Hz), where the average hearing loss reached 11.42 dB. At 500 Hz—the frequency of peak auditory sensitivity in juvenile large yellow croaker—the mean pre-exposure

① Corresponding author: ZHANG Xuguang, Email: zhang_xuguang@163.com; ZHU Fei, Email: ebancool@126.com

hearing threshold was (75.75 ± 4.14) dB. Following noise exposure, a mean hearing loss of 11.14 dB was observed, indicating substantial damage to critical communication frequencies. At 300 Hz and 400 Hz, body weight exhibited a significant positive correlation with auditory thresholds (Spearman's $r = 0.673$, $P = 0.033$; $r = 0.753$, $P = 0.012$), indicating that larger individuals had reduced auditory sensitivity. The GLMM model revealed a significant interaction between body weight and noise exposure ($P = 0.004$), with the positive effect of body weight on auditory thresholds being more pronounced in the noise-exposed treatment group (noise-exposed).

In this study, we evaluated the effects of construction noise exposure on the auditory thresholds of *L. crocea* and explored the regulatory role of body size in auditory sensitivity. By integrating auditory evoked potential techniques and GLMMs, we elucidated the damage characteristics and potential mechanisms of construction noise in the auditory system of the fish, providing a scientific basis for noise management in aquaculture environments. The overlap between the dominant frequency of construction noise (840 Hz) and the most sensitive auditory range of the fish (400–600 Hz) resulted in the greatest hearing loss at critical communication frequencies, potentially disrupting acoustic communication and environmental perception. Larger individuals exhibited reduced auditory sensitivity in mid-frequency ranges (300–400 Hz), a pattern consistent with findings in other species (e.g., *Scorpaenodes barbatus*), which is likely linked to auditory system development and sound propagation efficiency. Noise-induced hearing impairment and stress behaviors may reduce foraging efficiency and reproductive success in *L. crocea*, ultimately affecting aquaculture yield. Furthermore, the observed cumulative effects of noise exposure highlighted the need to address the long-term risks of chronic noise pollution.

This study focused on juvenile fish; future research should be extended to adults and reproductive-stage individuals to assess differences in developmental sensitivity. Additionally, experiments conducted in closed tanks differ from those conducted in open-sea net-cage environments, necessitating validation under natural conditions. Long-term studies should incorporate histological analyses (e.g., inner ear hair cell damage) and behavioral ecological metrics to comprehensively evaluate the population-level impacts of noise.

Key words Croaker; Underwater noise; Auditory evoked potentials; Hearing threshold; Fish welfare