doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.014

大型智能养殖平台水下噪声特性试验研究

陈夏华[1]　陈艺文[1]　屈　科[2]　熊逸文[1]　凌文昌[1]　董阳泽[1]

(1.南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江),湛江 524000;
2.广东海洋大学海洋与气象学院,湛江 524088)

摘要:为缓解近岸养殖压力,以大型智能化养殖平台为依托的深远海养殖不断受到重视。大型养殖平台应用过程中产生的水下噪声,是未来评估其对水下声环境影响及开展智能化养殖的重要依据。对 60 000 m^3 大型智能养殖平台“恒燚 1 号”开展试验研究,在平台关键位置布放不同深度的水听器对水下噪声进行测量,并在平台上布放声级计对空气噪声进行同步监测。研究表明,柴油发电机组是主要的噪声来源,在 20 ~ 1 500 Hz 频率范围内产生较为显著的水下噪声,使总声压级提高约 10 dB。同时,平台不同空间和深度条件下的水下噪声频谱特性也呈现出一定的差异。在未进行投喂且柴油发电机未运行的情况下,平台水下噪声与背景噪声差异较小,各水深层的噪声水平也无显著差异。基于测量结果,初步认为平台的噪声不会对养殖鱼类产生显著的负面影响,但不排除影响其活动行为的可能。研究结果为后续开展系统性试验研究,部署智能化声学养殖装备奠定了基础。

关键词:深远海养殖;大型养殖平台;水下噪声;噪声测量方法

中图分类号:O425　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0140-07　　**OSID**:

Experimental Analysis of Underwater Noise in Large-scale Intelligent Aquaculture Platforms

CHEN Xiahua[1]　CHEN Yiwen[1]　QU Ke[2]　XIONG Yiwen[1]　LING Wenchang[1]　DONG Yangze[1]

(1. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory* (*Zhanjiang*), *Zhanjiang* 524000, *China*
2. *College of Oceanography and Meteorology*, *Guangdong Ocean University*, *Zhanjiang* 524088, *China*)

Abstract: Aiming to alleviate the pressure of nearshore aquaculture on local ecosystems, there has been increasing attentions on offshore aquaculture based on large intelligent fish farm structure. Underwater noise generated by these structures is a critical basis for the assessment of their impact on the environment and the development of intelligent aquaculture. An experimental investigation was conducted on the 60 000 m^3 intelligent aquaculture fish cage “HENGYI 1”. Hydrophones were strategically deployed at various depths on the key locations of the cage to record underwater noise, while sound level meters were simultaneously installed to monitor airborne noise. The results indicated that the diesel generator was the predominant noise source, generating significant underwater noise within the 20 ~ 1 500 Hz frequency band and increasing the total sound pressure level by approximately 10 dB. Furthermore, the spectral characteristics of the underwater noise varied with both spatial position and depth across the cage. When feeding operations were halted and the diesel generator was inactive, the underwater noise levels of the platform nearly matched the background noise, with negligible differences across various depths. There was no evidence to support that the noise of the fish cage influenced obviously to the fish, but the behavior changes of the fish may exist. An initial analysis and evaluation to the fish for the underwater noise of the typical rectangular trussed fish cage were performed. The research result can provide a reference for future systematic experimental research and the deployment of intelligent acoustic aquaculture equipment.

Key words: off shore aquaculture; large-scale aquaculture platforms; underwater noise; noise measurement methods

收稿日期:2025-03-24　修回日期:2025-04-23

基金项目:湛江湾实验室自立项目(ZJW-2023-09)

作者简介:陈夏华(1990—),男,实习研究员,博士,主要从事水下声光感知技术研究,E-mail:xhchen@zjblab.com

通信作者:董阳泽(1973—),男,研究员,博士,主要从事水声工程、智能感知与优化等技术研究,E-mail:dongyangze@zjblab.com

0　引言

当前，深远海养殖业正蓬勃发展。传统海洋渔业主要依托养殖筏或 HDPE（高密度聚乙烯）网箱等设施在沿海近岸开展养殖，这些设施抵抗风浪能力差，加之水体富营养化等问题频发，容易造成重大经济损失，而近海环境承载能力有限，其养殖规模同样趋于饱和。为进一步扩大养殖规模、提高海洋养殖水产品质量以及保障粮食安全，到深远海发展海洋养殖是必然的趋势[1-4]。

深远海条件下，养殖活动对保障能力和安全性提出了更高要求，发展大型化、高抗台能力的智能养殖平台是目前深远海离岸养殖的核心内容。世界渔业养殖强国如挪威率先开展了相关实践，以“Ocean farm 1”、“Havfarm”等为代表的大型智能化养殖平台相继投入商业化运营[5]。我国山东、浙江、福建、广东、海南等沿海省份已建设并投产运营了多型深远海养殖平台[6]，如“深蓝”系列、“东海 1 号”、“宁德 1 号”、“德海 1 号”和“普盛”系列等平台。湛江市依托自身在海洋水产养殖方面的优势，也积极推动深远海养殖产业发展，先后建成并投产了“海威 1 号”、“海威 2 号”、“恒燚 1 号”、“湛农 1 号”等大型深远海养殖平台。作为我国农业发展的重要组成部分[7-9]，可以预见，未来深远海养殖规模将不断扩大。

随着大型智能化养殖平台的不断投产，在为水产养殖提供新空间的同时，也将引入新的人为水下噪声，进而有可能对周围海洋生物和养殖鱼类产生不良影响[10-16]。同时，诸多声学技术也在智能化养殖技术中不断得到应用，如用于声学手段监测鱼群逃逸、鱼类摄食行为、生物量统计等，这些技术的应用需要考虑与平台声兼容性的问题[17-18]。因此，开展大型深远海养殖平台的水下噪声测量与研究具有重要意义。

目前，针对大型深远海养殖平台的水下噪声还缺乏系统性的研究，对平台水下噪声的基本情况缺乏了解，限制了配套试验方法的建立。因此，本文主要对大型智能化深远海养殖平台的噪声源进行分析，并对水下噪声进行初步测量，以期为未来系统的试验研究和平台水下噪声测量方法的建立提供参考。

1　养殖平台噪声源分析

养殖平台按结构可划分为两类：一类是开放式养殖网箱，通常在预定海域定点养殖；另一类是封闭式养殖工船，以游弋的方式寻找最佳养殖海域开展养殖。相较而言，养殖工船具备更高的灵活性，能够有效防范病害侵袭。例如，国内自主研发的“国信一号”养殖工船作为封闭式养殖平台的典型代表，不仅支持远洋移动，还能实现对养殖环境的实时监控和优化[19]。然而，养殖工船的造价较高，目前国内投产的平台数量较少，养殖平台仍以经济性较高的开放式网箱为主。其中，矩形桁架式结构的网箱具备良好的经济性和抗风浪能力，在我国投产应用较多，具有一定的代表性和典型性，可作为本试验研究对象。基于现有条件，本研究选取湛江市所辖海域内正在运营的矩形桁架式养殖平台“恒燚 1 号”作为研究对象。研究内容包括对养殖平台潜在噪声源的详细调查，并在此基础上开展水下噪声测量工作，以分析其噪声特性。

本次研究对象“恒燚 1 号”是由湛江湾实验室研发设计的一座矩形桁架式养殖平台（图 1），养殖水体 60 000 m^3，位于湛江东海岛西南侧离岸约 10 km 的海域，平台长 101 m，宽 47.5 m，总高 27.5 m，所在海域水深 24 ~ 30 m，设计养殖吃水深度 15 m。平台分为 6 个养殖区，混合养殖了章红鱼（高体鰤，*Seriola dumerili*）和金鲳鱼（*Trachinotus ovatus*），平台悬空布置了平台上层建筑。平台配备光伏发电设施，用于日常的养殖作业和人员生活所需用电，同时配备船载柴油发电机用于备用发电。该养殖平台具备较强的抗台风能力，可在预定海域长期开展渔业养殖。



图 1　“恒燚 1 号”养殖平台

Fig. 1　“HENGYI 1” fish cage

养殖平台的潜在噪声源主要分为两类：平台设备运行产生的机械噪声；由平台鱼类活动产生的生物噪声。

在平台设备噪声方面，根据基本配置可知，潜在噪声源包括以下几类：机舱内柴油发电机运行产生的噪声；平台工作生活设施中风机、泵等流体机械噪声，人员在工作生活过程中产生的排水、振动、走动等噪声，冷库制冷舱压缩机的运行噪声，吊机运转时产生的机械噪声，以及智能化养殖设备运行所产生的噪声。根据前期的调研结果，如图 2 所示，“恒燚 1 号”主要的机械噪声源集中在平台中部的上层建筑内，平台的潜在噪声源统计见表 1。

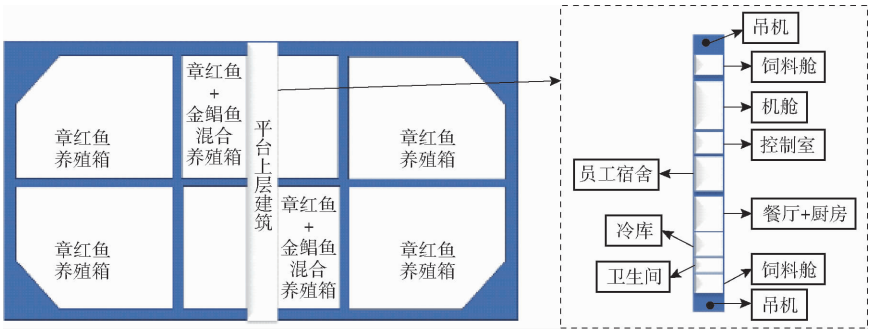


图 2 “恒燚 1 号”平台潜在噪声源分布

Fig. 2 Potential noise sources on “HENGYI 1”

表 1 “恒燚 1 号”平台主要噪声源统计

Tab. 1 Statistics of main sources of noise on “HENGYI 1”

序号	噪声源	位置	运行方式	备注
1	柴油发电机组	平台上层建筑机舱内	光伏供能不足时启用	共 2 台，每台功率 120 kW
2	吊机	平台顶甲板两侧	物资补给、捕捞时启用	电力驱动
3	制冷压缩机	平台冷库旁	定时开启	共 1 台
4	泵	平台浮箱泵舱内	用于沉浮控制，平台正常运行时不开启	
5	二维图像声呐	养殖箱内	常态化监测	其工作频率为 1 200 kHz/2 400 kHz，更新频率为 40 Hz，波束个数为 512
6	养殖鱼群	所有网箱投放章红鱼，中部养殖箱内部网衣养殖少量金鲳鱼	投喂周期不固定	主要考虑鱼群摄食活动形成的噪声

1.1 显著噪声

在养殖平台的机械噪声中，柴油发电机对水下噪声的贡献最为显著。光伏发电通常在夏季光照充足时能满足平台运行需求，但在冬春季节，阴雨天气较多，尤其是在湛江地区常见的“回南天”期间，柴油发电机频繁运行，是平台水下噪声的主要来源。

1.2 非显著噪声

在运行过程中，平台上的其他噪声源对水下环境的影响相对较小。其中，平台上人员工作生活所形成的噪声（包括相关的机械噪声）强度相对较小，且多数为间歇性短时间发生，可暂不考虑；吊机为电驱动设备，产生的噪声也较小，且吊机并非常态化运行，影响有限；主动声呐产生的噪声声压级约为 200 dB，但其工作频率通常处于 375 kHz 以上（本文中为 1 200 kHz/2 400 kHz），无论是作用距离还是在对海洋生物的影响方面均较为有限，本文研究的养殖平台声呐作用距离为 20 m/40 m，对周边环境的影响可以忽略不计；智能化投喂设备在运行中预计将会产生一定的水下噪声，但由于该类设备与鱼类饲料的应用密切相关，目前在平台上还较少投入应用，在此不予考虑；当前养殖中，冰鲜杂鱼是主要饲料来源，因此冷库压缩机需要保持常态化运转，但其相比于柴油发电机产生的噪声较小。

综上所述，虽然养殖平台存在多种机械噪声来源，但多数噪声具有间歇性且对环境影响小。因此，在研究中将重点考虑柴油发电机组的噪声影响。

在生物噪声方面，主要关注养殖鱼群的生理性发声和群体活动产生的噪声。由于养殖鱼类的种群规模庞大，目前对其发声特性的研究覆盖范围仍较为有限。目前已知具备显著发声特性的鱼类包括石首鱼科、鳕鱼科和笛鲷科等，如，金鲳鱼的发声信号频段为 100 ~ 1 500 Hz，声压级峰值约 96 dB；石斑鱼的发声信号频段为 50 ~ 500 Hz，声压级峰值约 80 dB，而平台养殖的其它鱼类，目前尚无相关发声研究的报道[20-21]。此外，在摄食、应激等群体行为条件下，鱼群也会拍打水体产生一定的噪声，其中章红鱼的表现较为显著。在本次试验研究中，由于条件限制，试验期间没有投喂计划，测量期间也未观测到鱼群的显著活动。

2 试验方案

综合噪声源调查结果、平台结构、标准规范和海域环境设计试验方案。

根据水声测量标准[22-24]选择 USR - 2000L 型自容式水听器，频带范围为 10 ~ 20 000 Hz，灵敏度 - 165 dB 以上。在各测点分别使用 3 台自容式水听器分次测量，每个测点同步记录 3 个深度的水下噪声数据，其中两个测量深度位于 1/2 海深、3/4 海深位置，而另一个测量深度考虑鱼群活动于近水面的情况，选择 3 m 处水深进行测量。

网箱养殖舱内存在多层底网，阻碍了水听器沿

深度的布放，同时考虑鱼群撞击的风险，水下噪声测量点位选择在平台外部关键结构处。此外，试验期间，平台周边海流方向如图 3 所示，在海流和结构的耦合作用下，在平台纵向两端易形成湍流、涡漩等复杂流场，设备存在与网衣缠绕的风险。

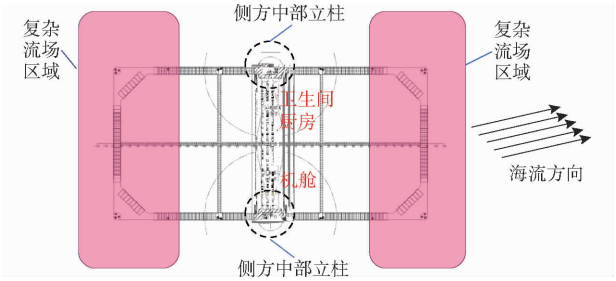


图 3　平台周围海流情况

Fig. 3　Current conditions around platform

综合上述情况，在本次试验中选择平台外部两侧的侧方中部立柱处作为监测位置（图 3），该处立柱与平台上层建筑直接相连（图 4），而平台主要噪声源又集中上层建筑内，该区域是平台水下噪声的关键敏感位置，可以最大程度反映平台水下噪声情况，同时由于平台噪声的非对称布置，这样的测量点布置也可以探索噪声源位置的影响。

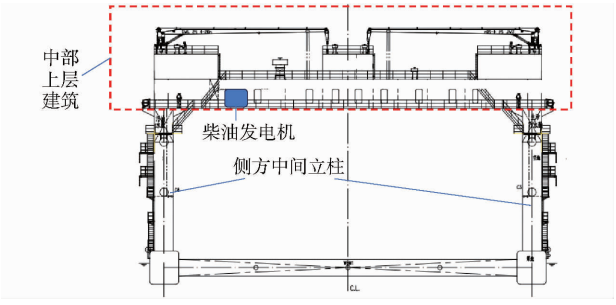


图 4　平台上层建筑与侧方中间立柱的结构关系

Fig. 4　Structural relationship between platform's deck super structure and lateral central columns

在试验中还需测量环境背景噪声，在此根据浅海条件下声信号衰减估算和相关测量经验，选择距离平台中心约 1 500 m 处作为背景噪声测量点。

在试验中，选择柴油发电机投入工况作为主要运行工况，水下噪声测点的具体布设情况如图 5 所示。3 个测点分别使用 3 台自容式水听器分次进行测量，每个测点同步记录 3 个深度的水下噪声数据，实测海深为 24 m，对应的测量深度分别为 3、12、18 m。每个测点的测量时间为 10 min。

图 6 展示了水听器测点与平台的空间位置关系。1#测点和 2#测点在水平维度上位于平台两侧，垂直维度上表层测点对应养殖水体的中上部位，而中层测点对应养殖平台靠近底部浮箱位置，底层测点则位于养殖平台下约 3 m 位置。发电机启动后，舱门保持开放状态，待设备运行稳定后，正式开始测量。

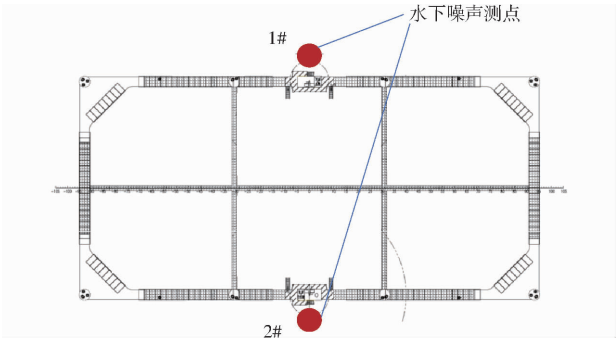


图 5　“恒燚 1 号”平台水听器测量点位

Fig. 5　Locations of measurement sites on “HENGYI 1”

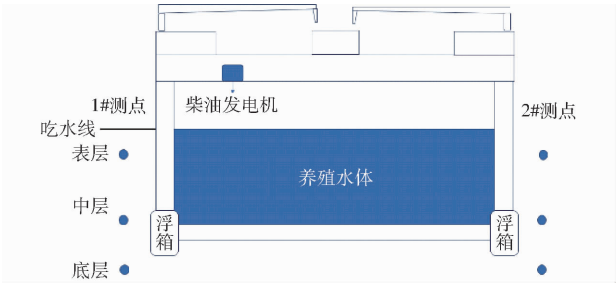


图 6　测点与平台的空间位置关系

Fig. 6　Spatial relationship between measurement sites and platform

为确保试验顺利进行，选定气象条件良好的时期开展。试验当天，平均风速 4.3 m/s，处于 2 级以下海况。试验期间，周边海域 2 km 范围内，船舶航行较少，外部干扰较少，对测量结果的影响可忽略不计。

平台共进行了 4 次测量，包括 1#测点在柴油发电机开启前后的测量值、2#测点的测量值，以及环境背景噪声的测量值。

3　试验结果和分析

3.1　平台水下噪声分析

柴油发电机开启前、后水下噪声的变化如图 7 所示。各水层水听器测量的噪声功率谱表明，各水层噪声水平受发动机影响较大，水下噪声总声压级提高了 10 dB 以上。在发电机开启前，50 ~ 2 000 Hz 范围内仅存在零星线谱，可能来源于远处的航船和平台上排风机等设备的运转，各水层的噪声水平没有显著的差异，且与环境背景噪声相当。在发电机开启后，20 ~ 1 500 Hz 范围内出现了较多的线谱，尤其在 25 Hz 附近的谱线特征尤为显著。而柴油机的标定转速为 1 500 r/min，对应的频率为 25 Hz，这与测量结果相对应，而对 2 kHz 以上的高频段，柴油机对噪声的影响较为有限。不同深度的噪声特征显示，在较深的水层，线谱特征更为明显，而随着深度不断靠近海面，噪声水平增加幅度也逐渐升高。与柴油机开启前相比，发电机开启后噪声的影响范围

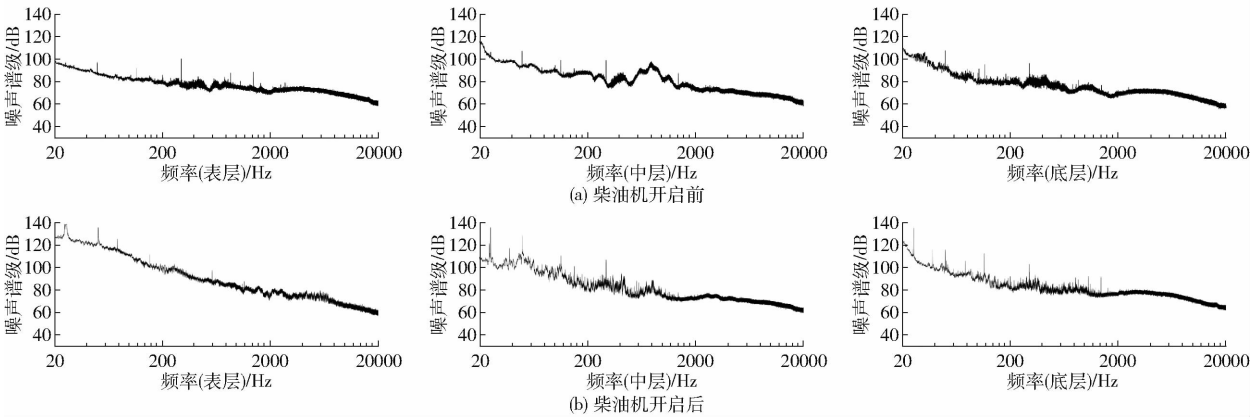


图 7 不同深度条件下水下噪声功率谱密度级对比

Fig. 7 Comparisons of underwater noise power spectral density levels at different depths

明显扩大。在表层水体中,20 ~ 2 000 Hz 范围内的噪声水平显著提升,而在中层和底层,这一范围的提升主要集中于 20 ~ 100 Hz。

如图 8 所示,对比声级计测量数据可以发现,发电机开启后 20 ~ 50 Hz 范围内出现了较为明显的变化,同时在 100 ~ 2 000 Hz 范围内增加了明显的线谱特征,这一结果与水听器的测量数据相一致。

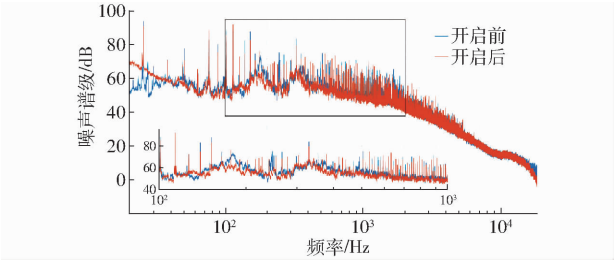


图 8 燃油发电机开启前后空气噪声谱级对比

Fig. 8 Comparison of air noise spectra before and after turning on diesel-generator

不同点位的测量结果如图 9 所示,2#测点底层的线谱特征少于中层和表层,但其连续谱水平相对较高,这与 1#测点测量结果呈现相反的特征。这种特征可能由于 1#测点距离声源(柴油发电机)较近,而 2#测点距离声源较远,虽然两个测点处的测量并非在同一时刻开始,但在测量期间,平台的噪声源和周围环境条件并未出现显著变化。

此外,表层和底层水体测量值的连续谱和线谱特征在两个测点的测量中变化较大,而中部水层的测量数据表现出相对稳定的特征。这种特征产生的原因可能是表层和中层测点更接近养殖水体,因此更容易测量养殖平台的噪声。

图 10 展示了水下背景噪声和平台测量值 1/3 倍频程下的频谱特性对比,结果表明背景噪声和平台噪声在低频段(20 ~ 1 000 Hz)趋于一致,在高频段(1 ~ 20 kHz)中,背景噪声略高于平台测量值。从现有的研究结果看,鱼类噪声的主要影响范围在 1 kHz 以下,本次试验未观测到显著的鱼类噪声。

3.2 噪声对养殖鱼类影响分析

基于噪声测量结果,有必要进一步分析噪声对养殖鱼类的影响。由于设备和技术条件的限制,本文主要结合平台上的观察、养殖经验和已有的研究进行初步评估。

在本次试验过程中,鱼群始终保持水下安静游动状态,发电机开启前后在水面附近均未观测到明显的鱼群活动情况。根据前期调研结果显示,无论“恒燚 1 号”平台还是周边的其它平台(如“海威 1

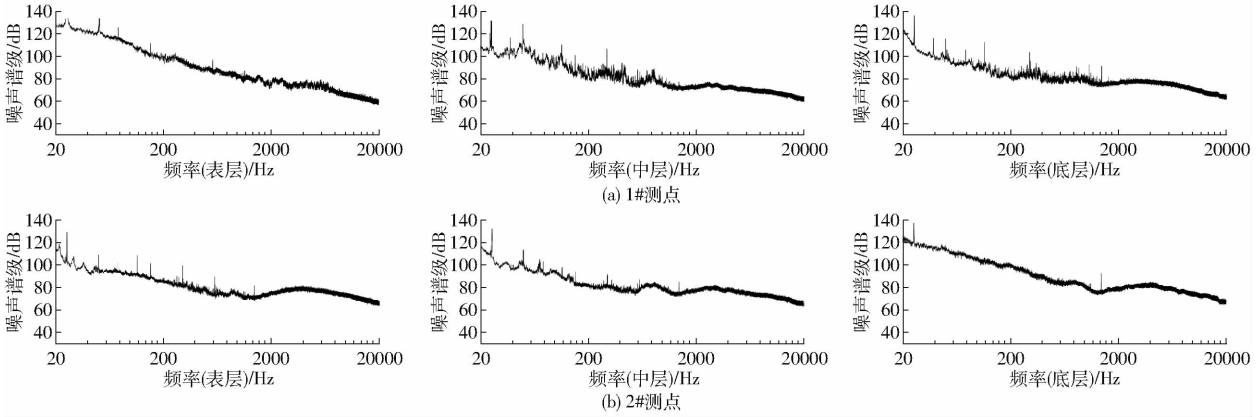


图 9 两个测点在不同深度条件下水下噪声功率谱密度级对比

Fig. 9 Comparison of underwater noise power spectral density levels at different depths at two measurement sites

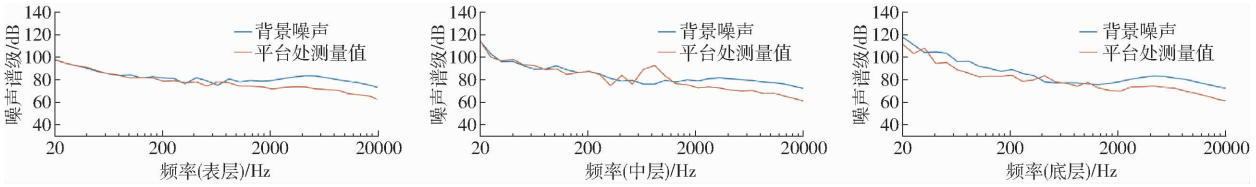


图 10　背景噪声和平台水下噪声功率谱密度级对比

Fig. 10　Comparison of power spectral density levels between background noise and underwater noise of fish cage

号”和“海威 2 号”),发电机开启后未监测到鱼群状态的显著变化,尤其是在“海威”系列养殖平台内还养殖了石首鱼科中的鲶鱼,这类鱼对噪声较为敏感,在这些养殖实践中,均没有发现发电机噪声对养殖鱼类造成显著的不良影响(如应激或死亡)。

目前,国内外围绕噪声对鱼类的影响开展了一定研究,但专门针对章红鱼和金鲳鱼的相关研究较少。已有的研究表明金鲳鱼的发声信号频段为100 ~ 1 500 Hz[21,25],其幼鱼对 110 ~ 130 dB 的声源会产生一定的条件反射并表现出对引入声源的适应性[25];而章红鱼属于近年来开始培育推广的品种,相关研究积累较少,与其相近的鰤鱼(*Seriola quinqueradiata*)也有采用声驯化的实践[25],但在声学响应方面目前还没有相关研究报道。基于此,在平台引入噪声源后有可能对其行为(如游动方式、摄食行为等)造成影响,同时,在长期养殖条件下,养殖鱼群也有可能适应噪声环境,从而其行为不会发生变化,这需要在未来的研究中加以确认。

鉴于目前相关研究资料较少,可依据噪声对鱼类影响的评估标准[26],初步评估水下噪声对鱼类的影响。标准中按鱼鳔的有无以及鱼鳔对听觉的影响进行了分组,而本研究中金鲳鱼和章红鱼均属于有鳔鱼类,根据测量结果,养殖平台总声压级在 128 ~ 142 dB 范围内,根据标准判断,平台产生的人为噪声远未达到对该类鱼产生听觉损伤的阈值,但同样有可能对行为产生影响。

海上风电的相关研究也可作为一定参考,在运行期间海上风电的水下噪声声压级通常在 120 ~ 150 dB 之间[27-28],并且集中在 1 000 Hz 以内的低频范围,与养殖平台较为相似。相关研究同样表明风电运行期间,不会对鱼群的听觉造成损伤,但有可能会对行为造成影响,如通信和导航的掩蔽等,但国内外研究和观测的结果总体上倾向于人为海上风电噪声不会对鱼类产生显著的负面影响[14,29-30],国内广东阳江沙扒深海养殖实验区项目在 500 MW 风电场内布设 HDPE 抗台风型养殖网箱,成功养殖金鲳鱼并实现收获,实际养殖效果未受影响[31]。

4　讨论

本研究中,在燃油发电机开启条件下,主要影响频率范围为 20 ~ 1 500 Hz,总声压级约提高 10 dB;燃油发电机开启时,平台在横向对称测量位置以及各测量位置的不同测量深度上,噪声连续谱和线谱特征均存在差异。这种差异与平台结构及噪声源的非对称布置密切相关,这需要在后续的研究中对噪声传播路径进行深入分析;在中间水层,噪声特征在不同测量位置变化相对较小,为后续试验设计提供了参考。由于条件限制,仍有如投喂、鱼群活动等诸多条件下的水下噪声特性未能完全覆盖。这些问题亟待在后续研究中,通过开展更完善的试验加以深入研究。

本文对养殖网箱的主要噪声特性进行了初步探索,基于平台的噪声频谱,可评估平台上安装的声学设备如图像声呐的影响,进而分析对智能化鱼群监测的影响;而在一些鱼类养殖尤其是石首鱼科的养殖中,对声音较为敏感,如何避免其受不利噪声的影响,同时利用声控制鱼群行为,有待于结合平台水下噪声特性,进一步开展平台减震降噪以及鱼群声学控制装备研发等工作。

5　结论

(1)固定桁架式养殖平台存在诸多噪声源,包括能源设备、冷库压缩机、投喂设备、鱼类发声以及鱼群活动等。其中,多数噪声源强度较低,或在短时间内间歇性出现。在未开启燃油发电机的非投喂条件下,平台未观测到明显的水下噪声。

(2)目前,多数平台主要采用光伏和燃油发电相结合的形式为平台提供能源。由于光伏发电具有不稳定性,平台仍较大程度地依赖燃油发电,这使得燃油发电机成为需重点考虑的噪声源之一。

参　考　文　献

[1]　黄一心,徐皓,丁建乐. 我国离岸水产养殖设施装备发展研究[J]. 渔业现代化,2016,43(2):76 - 81.
HUANG Yixin, XU Hao, DING Jianle. Research on the development of offshore aquaculture facilities and equipment in China [J]. Fishery Modernization, 2016, 43(2):76 - 81. (in Chinese)

[2] 石建高,余雯雯,卢本才,等. 中国深远海网箱的发展现状与展望[J]. 水产学报,2021,45(6):992 – 1005.
SHI Jiangao, YU Wenwen, LU Bencai, et al. Development status and prospect of Chinese deep-sea cage[J]. Journal of Fisheries of China,2021,45(6):992 – 1005. (in Chinese)
[3] CLAVELLE T, LESTER S E, GENTRY R, et al. Interactions and management for the future of marine aquaculture and capture fisheries[J]. Fish and Fisheries, 2019, 20(2): 368 – 388.
[4] COSTELLO C, CAO L, GELCICH S, et al. The future of food from the sea[J]. Nature, 2020, 588(7836): 95 – 100.
[5] CHU Y I, WANG C M, PARK J C, et al. Review of cage and containment tank designs for offshore fish farming[J]. Aquaculture, 2020, 519: 734928.
[6] 徐皓, 刘晃, 黄文超. 深远海设施养殖装备技术进展与展望[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(5):893 – 902.
XU Hao, LIU Huang, HUANG Wenchao. Advances and outlook of offshore aquaculture equipment technology[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(5):893 – 902. (in Chinese)
[7] 农业农村部, 工业和信息化部, 国家发展改革委等. 关于加快推进深远海养殖发展的意见[R/OL]. (2023 – 06 – 03)[2025 – 02 – 06]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6886007.htm.
[8] 农业农村部办公厅, 财政部办公厅. 关于开展国家级海洋牧场示范区创建工作的通知[R/OL]. (2023 – 03 – 31)[2025 – 02 – 12]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/202306/t20230606_6429505.htm.
[9] 广东省农业农村厅. 广东省现代化海洋牧场发展总体规划(2024—2035 年)[R/OL]. (2024 – 11 – 19)[2025 – 02 – 12]. https://dara.gd.gov.cn/zwgk/tzgg/content/post_4615327.html.
[10] 张国胜,顾晓晓,邢彬彬,等. 海洋环境噪声的分类及其对海洋动物的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(1):89 – 94.
ZHANG Guosheng, GU Xiaoxiao, XING Binbin, et al. The classification and the impact of marine environment noise on marine animals[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2012, 27(1):89 – 94. (in Chinese)
[11] 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 and Evolution, 2010, 25(7): 419 – 427.
[12] MCGREGOR P K, HORN A G, LEONARD M L, et al. Anthropogenic noise and conservation[M]// New York: Springer, 2013: 409 – 444.
[13] DE JONG K, FORLAND T N, AMORIM M C P, et al. Predicting the effects of anthropogenic noise on fish reproduction[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2020, 30(2): 245 – 268.
[14] 张博. 海上人为噪声及其对海洋鱼类影响的初步探究[D]. 上海:上海海洋大学, 2015.
ZHANG Bo. A primary study of anthropogenic noise and it's effects on marine fishes[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015. (in Chinese)
[15] 古璐. 黄姑鱼(*Nibea albiflora*)发声及水下噪声对其影响研究[D]. 厦门:厦门大学,2018.
GU Lu. Study on underwater vocalizations and the effect of underwater noise on yellow drums (*Nibea albiflora*)[D]. Xiamen: Xiamen University,2018. (in Chinese)
[16] 石妮,李英文,刘智皓,等. 噪声对鱼类的影响[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2017,34(4):28 – 32.
SHI Ni, LI Yingwen, LIU Zhihao, et al. Influence of noise on fish[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition),2017,34(4):28 – 32. (in Chinese)
[17] 王润田, 陈晶晶, 龚剑彬. 深水网箱养殖中的声学监测问题探讨[J]. 渔业现代化, 2012,39(3): 19 – 22.
WANG Runtian, CHEN Jingjing, GONG Jianbin. Acoustic monitoring for ocean aquaculture in sea cage[J]. Fishery Modernization, 2012,39(3): 19 – 22. (in Chinese)
[18] 崔智强, 祝捍皓, 宋伟华, 等. 一种基于前视声呐的养殖网箱内鱼群数量评估方法[J]. 渔业现代化, 2023, 50(4): 107 – 117.
CUI Zhiqiang, ZHU Hanhao, SONG Weihua, et al. A method for assessing the number of fish in aquaculture cages based on forward-looking sonar[J]. Fishery Modernization, 2023, 50(4):107 – 117. (in Chinese)
[19] 张文萱. “国信一号”驶向深蓝——全球首艘 10 万吨级智慧渔业大型养殖工船向世界提供了深远海养殖的“中国方案”[J]. 走向世界,2022(50):38 – 41.
ZHANG Wenxuan. Guoxin-1 Vessel: a mobile fish farm on the sea[J]. Openings,2022(50):38 – 41. (in Chinese)
[20] 陈德昊,林建恒,衣雪娟,等. 三种鱼类发声信号频带能量特征提取与分类研究[J]. 声学技术,2021,40(2):254 – 259.
CHEN Dehao, LIN Jianhuan, YI Xuejuan, et al. Research on band energy extraction and classification of three kinds of fishes sound signals[J]. Technical Acoustics,2021,40(2):254 – 259. (in Chinese)
[21] 刘欢. 基于多特征融合的鱼类声信号分析及特征提取研究[D]. 湛江:广东海洋大学,2023.
LIU Huan. Analysis and feature extraction of fish acoustic signalsbased on multi-feature fusion[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2023. (in Chinese)
[22] GB/T 5265—2009 声学 水下噪声测量[S]. 2009
[23] GJB 4057—2000 声学 舰船噪声测量方法[S]. 2000.
[24] GB/T 44042—2024 声学 船舶水下辐射噪声测量方法[S]. 2024.

(下转第 174 页)

1608 – 1629.
MENG Xiangjun, CHEN Jindong, ZHANG Jian. Research on credit risk prediction for small and medium-sized enterprises by integrating unstructured textual information[J]. Journal of Systems Science and Mathematics, 2024, 44(6): 1608 – 1629. (in Chinese)
[21] MPOUZIOTAS D, BESHARAT J, TSOULOS G I, et al. AliAmvra-enhancing customer experience through the application of machine learning techniques for survey data assessment and analysis[J]. Information, 2024, 15 (2): 83.
[22] HULIN J, YONG-GUK K, ZHIRAN J, et al. Optimization and analysis of bioenergy production using machine learning modeling: multi-layer perceptron, Gaussian processes regression, K-nearest neighbors, and artificial neural network models [J]. Energy Reports, 2022, 8:13979 – 13996.
[23] 赵帅, 李妍君, 熊伟丽. 基于 KPCA – Bagging 的高斯过程回归建模方法及应用[J]. 控制工程, 2019, 26(1): 131 – 136.
ZHAO Shuai, LI Yanjun, XIONG Weili. Gaussian process regression modeling based on KPCA-bagging algorithm and its application[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(1): 131 – 136. (in Chinese)
[24] ZHANG Xinyi, DAI Chengyuan, LI Weiyu, et al. Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using machine learning and Bayesian optimization methods[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1112105.
[25] ZHANG Bin, HE Jiawen, LIU Peishun, et al. An automated multi-layer perceptron discriminative neural network based on Bayesian optimization achieves high-precision one-source single-snapshot direction-of-arrival estimation[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 10300.
[26] LEE H, CHO W, PARK H J, et al. Predicting liquid natural gas consumption via the multilayer perceptron algorithm using Bayesian hyperparameter autotuning[J]. Energies, 2024, 17(10): 2290.
[27] 孙龙清, 吴雨寒, 孙希蓓, 等. 基于 IBAS 和 LSTM 网络的池塘水溶解氧含量预测[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 252 – 260.
SUN Longqing, WU Yuhan, SUN Xibei, et al. Dissolved oxygen prediction model in ponds based on improved beetle antennae search and LSTM network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 252 – 260. (in Chinese)
[28] 高振, 卢彩云, 李洪文, 等. 基于计算机视觉的种子分布信息检测关键技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(3): 50 – 60.
GAO Zhen, LU Caiyun, LI Hongwen, et al. Research progress and the prospect of crucial technology of seed spacing information detection based on computer vision[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(3): 50 – 60. (in Chinese)

(上接第 146 页)

[25] 袁华荣. 南海北部三种典型放流鱼类幼鱼驯化技术初步研究[D]. 上海:上海海洋大学,2012.
YUAN Huarong. Preliminary research on the taming technology of 3 typical releasing juvenile fishes in northern south China sea [D]. Shanghai:Shanghai Ocean University,2012. (in Chinese)
[26] HY/T 0341—2022 人为水下噪声对海洋生物影响评价指南[S]. 2022.
[27] TOUGAARD J, HENRIKSEN O D, MILLER L A. Underwater noise from three types of offshore wind turbines: estimation of impact zones for harbor porpoises and harbor seals[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 125(6):3766 – 3773.
[28] 牛富强,杨燕明,许肖梅,等. 海上风电场运营期水下噪声测量及特性初步分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(12):215 – 220.
NIU Fuqiang, YANG Yanming, XU Xiaomei, et al. Measurements and analysis of underwater noise from the operation of offshore wind farms[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(12):215 – 220. (in Chinese)
[29] 苏文,吴霓,章柳立,等. 海上风电工程对海洋生物影响的研究进展[J]. 海洋通报, 2020, 39(3):291 – 299.
SU Wen, WU Ni, ZHANG Liuli, et al. A review of research on the effect of offshore wind power project on marine organisms [J]. Marine Science Bulletin, 2020, 39(3):291 – 299. (in Chinese)
[30] 黄六一,王羿宁,黄桂芳,等. 海上风电场对鱼类福利的影响研究进展[J]. 水产学报, 2022,46(11):2226 – 2240.
HUANG Liuyi, WANG Yining, HUANG Guifang, et al. Advances in research on the effects of offshore wind farm on fish welfare[J]. Journal of Fisheries of China, 2022,46(11):2226 – 2240. (in Chinese)
[31] 阳杰,张建华,马兆荣,等. 海上风电与海洋牧场融合发展趋势与技术挑战[J]. 南方能源建设,2024,11(2):1 – 16.
YANG Jie, ZHANG Jianhua, MA Zhaorong, et al. Development trend and technical challenges of the integration of offshore wind turbine with marine ranch[J]. Southern Energy Construction,2024,11(2):1 – 16. (in Chinese)
[32] POPPER A N, HAWKINS A D, FAY R R, et al. ASA S3/SC1.4 TR—2014 Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: a technical report prepared by ANSI-accredited standards committee S3/SC1 and registered with ANSI[M]. Springer International Publishing,2014.