

# 海上风电打桩水下噪声测量及其对大黄鱼的影响

牛富强<sup>1</sup>, 李智<sup>2</sup>, 薛睿超<sup>1</sup>, 杨燕明<sup>1</sup>, 马丽<sup>1</sup>

(1. 自然资源部 第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2. 长江三峡集团福建能源投资有限责任公司, 福建福州 350001)

**摘要:** 海上风电场建设期风机打桩会产生高强度的水下噪声, 研究水下冲击打桩噪声的监测方法、特性分析及对海洋生物的影响是非常重要的。采用自容式水下声音记录仪, 多点同步测量了福建省兴化湾海上风电场二期工程建设期单次完整的水下冲击打桩噪声, 从时频域特性进行了分析, 并利用最小二乘法拟合得到了打桩声源级和声暴露级。结果表明: 水下冲击打桩噪声是典型的低频、高强度的脉冲信号, 单个脉冲持续时间约 90~100 ms, 峰值声源级约 209.4±2 dB, 声暴露级约 197.7±2 dB; 主要能量分布在 50 Hz~1 kHz 频段, 750 m 测量点的该频段声压级相比海洋环境背景噪声, 提高了约 40~50 dB。水下冲击打桩噪声频域能量分布与大黄鱼的听觉敏感频段相重叠, 对大黄鱼影响程度和范围较大, 实际工程中宜采用声暴露级作为评价指标。

**关键词:** 海上风机; 水下打桩噪声; 声暴露级; 大黄鱼; 环境影响评价

中图分类号: P733.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)08-0060-09

DOI: 10.11759/hyxx20201019001

人为水下噪声对海洋生物影响研究, 已成为国际社会的关注热点<sup>[1-3]</sup>。2018年6月18—22日, 联合国UN(United Nations)召开的第十九届海洋与海洋法非正式磋商会议(ICP-19)主题即为“人为水下噪声”, 会前号召各国提交有关水下噪声对海洋生物影响的科研素材, 然而我国因相关研究匮乏而没有提交资料, 限制了话语权。涉海工程建设、海上勘探开采、船舶航行、声呐使用、海洋调查等人类活动产生的水下噪声会影响海洋哺乳动物和部分鱼类的生存环境(如觅食、栖息地选择、迁徙、洄游等), 甚至造成物种的听力损伤或死亡<sup>[4-5]</sup>。认识和了解水下噪声对海洋哺乳动物、鱼类以及其他生物的影响, 对海洋生物多样性和海洋生态环境保护具有重要意义。因此, 开展不同人为噪声源引起的水下噪声监测、特性分析及评估对海洋生物的影响是非常必要的。目前, 水下噪声对海洋生物的影响程度、评价标准、管控机制仍不健全, 亟需不断完善。

国外对于水下噪声对海洋生物影响研究已开展很多, 包括多种海洋哺乳动物<sup>[6]</sup>、声敏感鱼类<sup>[7-9]</sup>。水下打桩是一种重要的噪声源, 广泛存在涉海工程建设中, 如海上风机基础构筑、桥梁架设、油气平台施工等。Bailey等<sup>[10]</sup>、Branstetter等<sup>[11]</sup>和Kastelein等<sup>[12]</sup>研究了水下打桩噪声对宽吻海豚(*Tursiops truncatus*)、港海豹(*Phoca vitulina*)的影响。国内在水下噪声对海洋生物影响研究起步较晚, 集中水下爆破、水下打桩、船舶噪声等对中华白海豚(*Sousa chinensis*)<sup>[13-16]</sup>、斑海豹(*Phoca largha*)<sup>[17]</sup>、江豚(*Neophocaena*)<sup>[18-19]</sup>等物种的影响, 但目前研究还不够系统。

大黄鱼(*Larimichthys crocea*), 隶属石首鱼科(Sciaenidae), 黄鱼属, 是我国近海网箱养殖的特有优质鱼种, 具有重要经济价值。石首鱼属于声音敏感性的鱼类, 能够感受水中声波的振动速度和声压强度<sup>[20]</sup>。Horodysky等<sup>[20]</sup>利用ABR(auditory brainstem response)方法, 获取了六种石首鱼的声压和振动门限阈值。Ramcharitar等<sup>[21]</sup>同样基于ABR方法, 研究了两种不同听觉结构石首鱼的听觉阈值及噪声隐蔽条件下的阈值移位。但这两项研究均不包括大黄鱼。

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-12-18  
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41976175); 中国长江三峡集团公司资助项目(CTGFB/0002-2018); 福建省自然科学基金项目(2020J01696)  
[Foundation: General Program of National Natural Science Foundation of China, No. 41976175; Project supported by China Three Gorges Corporation, No. CTGFB/0002-2018; Project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province, China, No. 2020J01696]

作者简介: 牛富强(1981—), 男, 山东成武人, 副研究员, 博士, 从事海洋声学研究, 电话: 0592-2195519, E-mail: niufuqiang@tio.org.cn; 杨燕明(1966—), 通信作者, 博士, 研究员, E-mail: yangyanming@tio.org.cn

大黄鱼具有耳石和鱼鳔,其对水下噪声的敏感性比其他的石首鱼更高。刘贞文等<sup>[22]</sup>利用声刺激信号结合行为学方法,开展了3个年龄的大黄鱼声敏感频率和声压阈值实验,给出了不同年龄大黄鱼的声敏感频率和声压阈值。周在明等<sup>[23]</sup>和刘贞文等<sup>[24]</sup>研究了福建省罗源湾滨海山体爆破产生的水中声波对毗邻养殖区大黄鱼的影响,指出了声暴露级是评价水中声波对大黄鱼影响的一个重要指标。截止目前,海上风机打桩辐射水下噪声对大黄鱼的影响研究未见公开报道。本研究通过海上风机打桩过程中的水下噪声测量,结合大黄鱼的听觉试验结果,分析了水下打桩噪声对网箱养殖大黄鱼的影响并提出了一些减缓措施,为海洋工程建设影响评价、工程毗邻海域养殖大黄鱼的保护等提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据测量系统

海上风电作为新兴的一种清洁能源,具有诸多优点,目前我国沿海地区正大规模开展海上风电场的规划及建设。然而,大规模海上风电场的建设以及运营必然对工程海域生态环境存在一定的影响。海上风电场工作周期,一般分为四个阶段:施工前期、施工期、运营期和停工期。施工期的水下噪声源主要来自施工机械、施工船和桩基打桩,其中施工机械、施工船产生的水下噪声强度较低,对海洋生物几

乎没有影响,但风机桩基和海上升压站基础冲击打桩期间,会辐射至水中高强度的冲击波。单次打桩表现为低频脉冲,而对于一根桩柱需要多次击打才能完成,表现为连续多个脉冲的脉冲串。为了完整获取一根桩柱击打过程产生的水下噪声数据,需采用连续测量系统。本研究采用低功耗自容式水下声音记录仪,集水听器和数据采集存储一体。水听器为标准型的,全方向性,频率响应20 Hz~35 kHz,接收灵敏度为 $-170\pm 2.0$  dB re 1 V/ $\mu$ Pa;采集存储采用高精度芯片,具有连续采集模式,动态范围大于103 dB,量化精度24 bits,放大增益0.5倍、4倍、32倍可选,采样率最高48 kHz(本研究设置为24 kHz),存储容量128 GB。该记录仪能够满足水下打桩噪声的测量标准<sup>[25]</sup>。风机打桩点和测量站点之间的距离通过GPS(G120BD)测量计算获得,各站水深由便携式测深仪(美国Speedtech SM-5)获取。测量期间,水下声音记录仪和GPS分别经过国防科技工业水声一级计量站和福建省计量科学研究所的校准,处于有效期。

### 1.2 数据现场测量

2019年3月21日在福建省兴化湾海域,对兴化湾海上风电场二期工程35号风机第四根桩柱(长59 m,直径1.9 m,壁厚28 mm)的打桩作业进行了水下噪声测量,共设置4个监测站位进行同步测量,分别距打桩点50 m、760 m、3 150 m和3 770 m,如图1所示,站位信息见表1。单根打桩作业持续时间约为

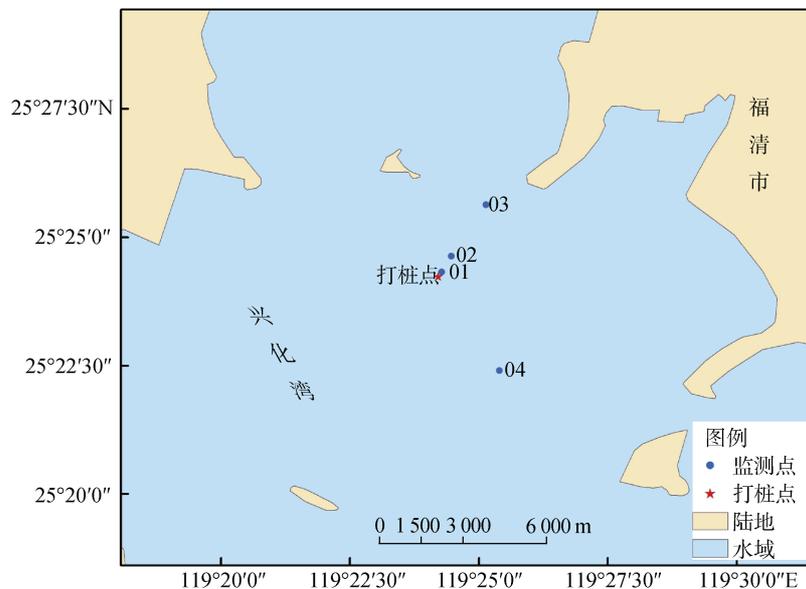


图1 测量站位和打桩平台

Fig. 1 Monitoring sites and picture of pile foundation

表 1 测量站位基本信息

Tab. 1 Basic information of monitoring sites

站位	北纬	东经	距离/m	水深/m	水听器深度/m
打桩点	25°24.242'	119°24.208'	—	13.3	—
监测站位 O1	25°24.267'	119°24.217'	50	13.3	10.0
监测站位 O2	25°24.600'	119°24.433'	760	13.9	10.0
监测站位 O3	25°25.450'	119°25.533'	3 150	17.1	14
监测站位 O4	25°22.283'	119°24.850'	3 770	19.4	13

12 min, 共击打约 718 次。因打桩作业持续时间较短, 潮位、风速、波浪、水温等环境未有明显变化, 所有本研究可当做单根打桩的完整过程中测量环境不变。打桩作业结束, 在 O2 站位测量了非打桩作业期间的海洋环境噪声(背景场)。

水下打桩噪声测量方式, 一般分为船基测量、锚系测量、漂流测量三种。本研究采用锚系测量, 既可以在打桩过程中固定测量点与打桩点距离, 又能够减少表面波浪、压力释放的水空气界面、以及布放船的干扰。水下声压的空间分布是与深度相关的, 尤其是在水体中声波波长的四分之一处, 存在强烈的深度相关<sup>[26]</sup>。因此, 水听器不能靠近水面位置布放, 本研究水听器测量深度放置在 1/2 水深的下方和距海底 2 m 之间深度层(见表 1)。

### 1.3 数据处理方法

测量完毕后, 将存储在 SD 中的数据文件导出至电脑进行数据处理和分析, 获取单根桩完整作业过程产生水下噪声的时域波形图、脉冲长度、脉冲间隔、峰值声压级、声暴露级、声压谱级、20 Hz~10 kHz 频带总声级等。其中, 单个脉冲长度为一次击打过程信号能量从 5% 增加到 95% 所经历的时间, 单位 s; 脉冲间隔为两次相邻单脉冲的时间间隔, 单位 s; 峰值声压级(SPL<sub>pk</sub>)指单个脉冲持续时间内声压绝对值的最大值与基准声压相比取对数, 单位 dB, 基准值 1 μPa, 计算见公式(1); 声暴露级(SEL)<sup>[25]</sup>指单个脉冲持续时间内声压平方的积分与基准声压的平方相比取对数, 单位 dB, 基准值 1 μPa<sup>2</sup>·s, 计算见公式(2); 单根桩作业需要多次击打, 从而产生累积效应, 也即累积声暴露级, 计算见公式(3)。声压谱级(PSD)可以用 1 Hz 带宽表示, 也可以用 1/3 倍频程带宽表示, 本研究采用后者, 单位 dB, 计算公式见(4); 频带总声级(L<sub>p</sub>)是指从低频截止频率到高频截止频率的宽频带内的声压级求和, 单位 dB, 计算见公式(5)。进

行频域分析时, 选择快速傅里叶变换(FFT)点数为 1 024 点, Hanning 窗, 重叠率 50%。

$$SPL_{pk} = 20 \log_{10} \left( \frac{\max(|p(t)|)}{P_{ref}} \right), \quad (1)$$

式中,  $p(t)$  为单次脉冲时间序列, 单位为 Pa;  $P_{ref}$  为参考值, 单位为 1 μPa。

$$SEL_{ss} = 10 \log_{10} \left( \int_T \frac{p(t)^2 dt}{P_{ref}^2} \right), \quad (2)$$

式中,  $p(t)$  为单次脉冲时间序列, 单位为 Pa;  $T$  为信号持续时间, 单位为 s;  $P_{ref}$  为参考值, 单位为 1 μPa<sup>2</sup>·s。

$$SEL_{cum} = SEL_{ss} + 10 \log_{10}(N), \quad (3)$$

式中,  $N$  为脉冲个数。

$$PSD(f_i) = L_{ps}(f_i) + 10 \lg \Delta f, \quad (4)$$

$$L_p = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^n 10^{0.1 \times L_{ps}(f_i)} \right), \quad (5)$$

式中,  $L_{ps}(f_i)$  为 1/3 倍频程声压级,  $f_i$  为 1/3 倍频程中心频率, 单位 Hz,  $\Delta f$  为频率分辨率, 单位 Hz。

估算水下打桩噪声的声源级并分析其衰减特性, 对于分析水下打桩影响海洋生物的范围是非常重要的。由于水下打桩噪声产生机制复杂, 近距离不能当做点源分析, 源级也存在一定的起伏, 因此使用声场模型描述传播衰减过程存在的一定局限性<sup>[25]</sup>。声源从产生点到接收点, 由于声波扩散、水体吸收等造成能量的损耗, 要准确得知声源源级, 需知道随距离损耗的量, 一般可以下式(6)计算:

$$SL = RL + TL, \quad (6)$$

式中, SL 为声源级, 即距离打桩声源 1 m 处的声级; RL 为声接收级, 即对打桩进行测量时测量点位置的声级; TL 为传播损失; 三者单位均为 dB。由于 RL 是根据实际测量计算出来的, 为得知 SL, TL 的计算是最重要的环节。考虑扩展损失和吸收损失, TL 一般用下式(7)计算:

$$TL = n \times 10 \log r + ar, \quad (7)$$

式中,  $n$  为扩展损失系数, 与传播条件有关, 如水深、声速, 近距离一般为柱面扩展, 取值 1, 远距离为球面扩展, 取值 2;  $\alpha$  为吸收衰减系数, 与介质有关, 并且随频率增高而增大, 对低频声传播损失影响较小, 一般可以忽略;  $r$  为传输距离。本文利用同一直线上的三个站位(图 1)实际测量得到的峰值声压级平均值, 使用最小二乘法线性拟合, 估算出水下打桩噪声的峰值声源级 SL。

## 2 结果与分析

### 2.1 水下打桩噪声时域特征

图 2 和图 3 分别给出了多次击打过程中 O2 站位产生的水下冲击波串及声谱图和不同测量站位单次水下冲击波的时域波形。图 3 中可以看出, 距打桩点较近的 O1 站位形成的冲击波强度非常高, 随着与打桩点距离的增大, 水下冲击波的声压值逐渐减小, 但到了远距离衰减率变小, 如距打桩点 3 150 m 和 3 770 m 两个站位测量得到的峰值声压值相差不大, 这种规律符合声压值随距离呈对数衰减的规律。选取第 261 次~718 次击打的测量结果进行统计分析, O1、O2、O3 三个站位的水下打桩噪声的强度见表 2。利用这三个站位的峰值声压级平均值和声暴露级平均值拟合得到的声传播衰减曲线表达式为:

$$RL_{pk} = 209.4 - 11.3 \log r, \quad (8)$$

$$SEL = 197.7 - 13 \log r, \quad (9)$$

其中, 拟合和方差(SSE)分别为 0.88、2.31, 均方根误差(RMSE)为 0.94、1.52, 拟合优度( $R^2$ )为 0.99、0.98。公式(8)可知, 本次测量水下打桩噪声峰值声源级为  $209.4 \pm 2$  dB, 衰减系数为 11.3, 接近柱状扩展, 这与声场在浅水中柱状传播理论一致, 如图 4 所示。同样利用公式(9)可知, 本次测量水下打桩噪声的声暴露源级为  $197.7 \pm 2$  dB, 衰减系数为 13, 如图 5 所示。

根据国际水下打桩噪声测量位置标准, 一般选择距打桩源 750 m 的测量点分析单桩作业的完整过程<sup>[25]</sup>。因此, 本研究选择相近的 O2 站位(760 m)进行分析。单桩完整作业过程, 打桩锤的能量及桩柱入土深度变化和 O2 站位测量获得的峰值声压级分别如图 6 和图 7 所示。由于桩柱入土深度的变化, 阻力会逐渐增大, 因此一般打桩作业过程, 打桩锤的能量是变化的, 本研究测量中, 打桩锤能量从 100 kJ 增加

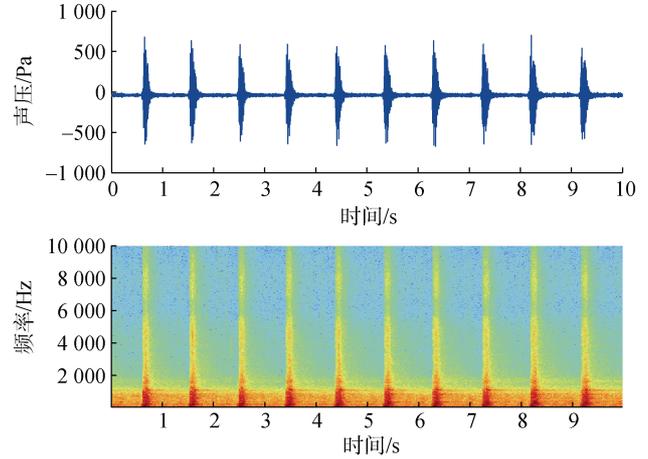


图 2 水下打桩冲击波脉冲串

Fig. 2 Time waveform and spectrograms of pulse trains for driving piling underwater noise

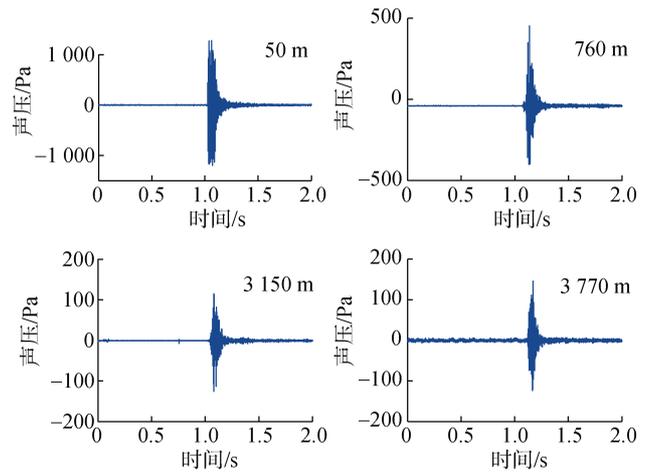


图 3 不同距离下水下打桩冲击波波形

Fig. 3 Time waveform for driving piling underwater noise in different distances

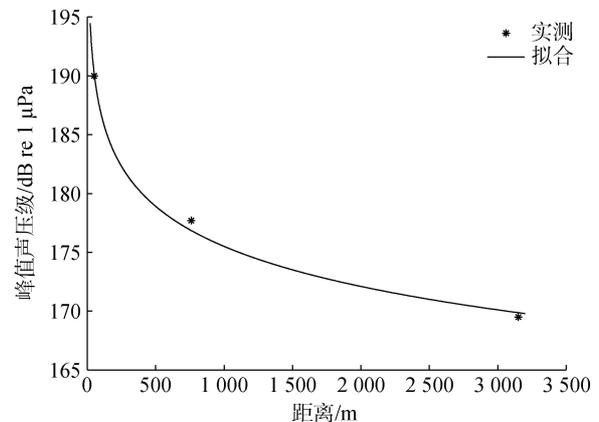


图 4 水下打桩噪声峰值声压级平均值拟合衰减曲线

Fig. 4 Fitting curve for the transmission loss of average peak sound pressure levels of underwater pile driving

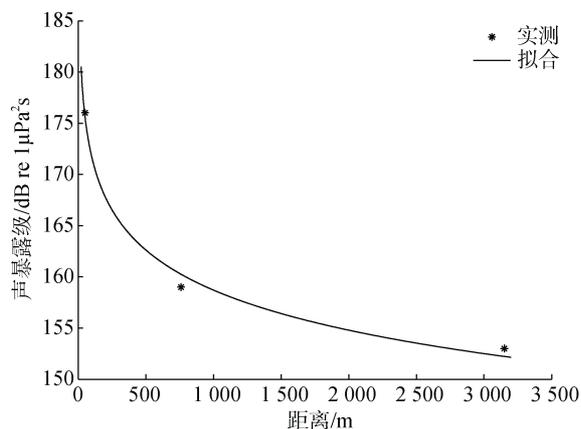


图5 水下打桩噪声声暴露级平均值拟合衰减曲线  
Fig. 5 Fitting curve for the transmission loss of average sound exposure levels of underwater pile driving

表2 不同距离水下打桩噪声的强度  
Tab. 2 Sound intensities for piling underwater noise in different distances

监测站位	距离/m	峰值声压级/dB	声暴露/dB	样本量
O1	50	190 ± 2.1	176 ± 2.0	457
O2	760	178 ± 1.9	159 ± 2.0	457
O3	3 150	169 ± 2.0	153 ± 1.9	457

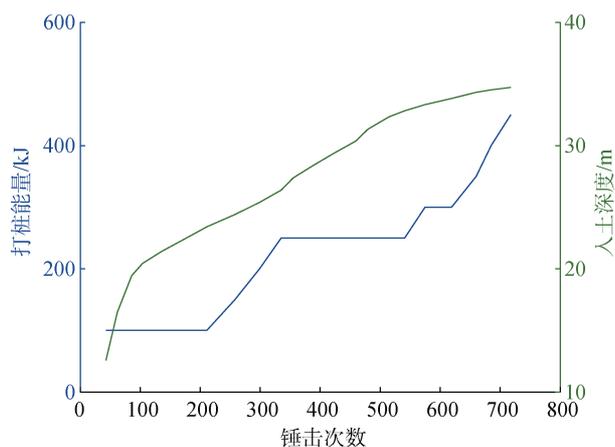


图6 单桩作业过程打桩锤的能量和桩柱入土深度变化  
Fig. 6 Energy output variation of pile hammer and varying with depth of penetration during the entire piling sequence

到450 kJ, 桩柱入土深度从12.5 m增加到34.7 m, 如图6。单桩作业的初期, 监测的水下冲击波峰值声压级存在一定的起伏, 分布较离散, 在170~180 dB范围。随着打桩锤能量的增加, 辐射至水中冲击波的峰值声压级趋于稳定, 并且在同一能量打桩锤的作用下, 对应的峰值声压级变化不大, 如图7所示。

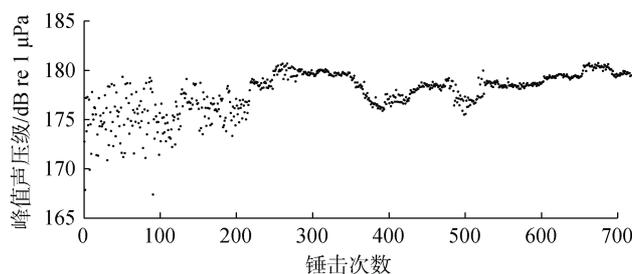


图7 单桩作业过程脉冲峰值声压级  
Fig. 7 Peak sound pressure levels of pulse during the entire piling sequence

除了峰值声压级, 声暴露级也是评价水中声波对海洋生物影响的一个重要指标<sup>[23]</sup>。声暴露级既包含了脉冲信号的声压, 又考虑了脉冲信号的持续时间。因此, 计算声暴露级, 需要确定脉冲长度, 也即5%能量到95%能量累积时间, 见图8。本研究单桩完整作业过程, O2 站位测量获得的声暴露级随击打次数分布结果如图9所示。

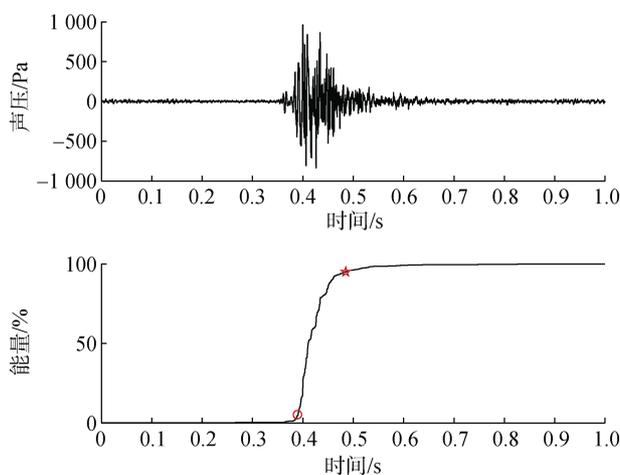


图8 单次打桩脉冲持续时间  
Fig. 8 Pulse duration of a single pile

## 2.2 水下打桩噪声频域特征

海洋生物的听觉阈值是与频率相关的, 即使同样强度的声压信号, 频率不同对海洋生物的影响是不同的。水下打桩噪声的功率密度谱能很好的反映其频域特性。本研究分析了 O2 站位测量获得水下打桩冲击波的1/3倍频程功率谱(频带声压级), 如图10, 图中同时给出了测量海域海洋环境背景噪声的功率谱级。水下打桩噪声的能量分布在50 Hz~1 kHz范围, 相比海洋环境背景噪声, 提高了40~50 dB。

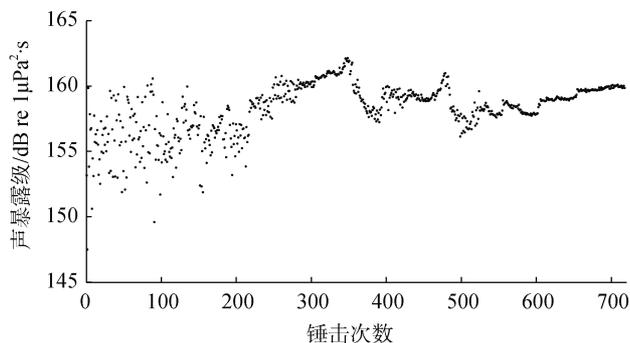


图9 单桩作业过程脉冲声暴露级

Fig. 9 Sound exposure levels of pulse during the entire piling sequence

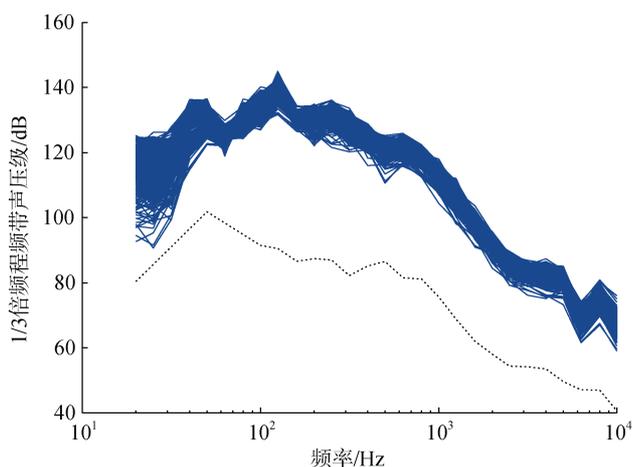


图10 水下打桩噪声和海洋环境噪声 1/3 倍频程功率谱图  
Fig. 10 1/3-octave band spectrums for piling pulse and ocean ambient noise

### 3 讨论

#### 3.1 大黄鱼听觉试验

为有效评估水下打桩噪声对鱼类的影响，声敏感鱼类的听觉阈值和影响门限是非常关键的参数。美国海洋与渔业局(NMFS)给出了水下噪声对声敏感鱼类的参考门限值<sup>[28]</sup>，如表3。但这个参考门限值仅仅是粗略的表达，没有对鱼的种类进行划分，也未对信号形式进行说明。实际上，鱼类的听觉敏感性及其可听频率范围在不同种类中有相当大的差异。石首科鱼类尤以大黄鱼所能承受的水中冲击波超压能力较弱。大黄鱼体内有充满气体的鱼鳔，并且鱼鳔与内耳相连，外界声压的瞬间突变，会引起鱼鳔壁的快速运动并传至内耳，导致听觉组织损伤。

表3 水下噪声对声敏感鱼类的参考门限值  
Tab. 3 Reference threshold of underwater noise to acoustic sensitive fishes

鱼体质量/g	行为响应		生理损伤	
	SPL <sub>rms</sub> /dB	SPL <sub>pk</sub> /dB	SPL <sub>pk</sub> /dB	SEL/dB
≥2	150	206	206	187
<2	150	206	206	183

大黄鱼是我国近海主要经济鱼类，福建闽东海域是重要的养殖基地。大黄鱼具有明显的行为声学特征，能够在一定的时间和环境条件下发声，其耳石结构又使其具备灵敏的声学响应特性，特定声信号刺激能使其行为发生改变，甚至死亡。《爆破安全规程》(GB6722—2011)首次将水中声波对鱼类影响的安全控制指标进行了说明，其中石首科鱼类在自然状态下所承受的水中冲击波超压峰值为 100 kPa (220 dB)，网箱养殖状态下所承受的超压峰值为 50 kPa (214 dB)；《爆破安全规程》(GB6722—2014)对声波影响下的鱼类指标做了进一步修订，认为石首科鱼类在自然状态下所承受的超压峰值为 10 kPa (200 dB)，网箱养殖状态下所承受的超压峰值为 5 kPa (194 dB)<sup>[27]</sup>。但实际工程应用中发现这一指标值不能完全反映水下噪声对石首科鱼类的影响程度，声暴露级也是重要的评估指标。周在明等研究结果表明水下爆破和滨海山体爆破产生的水下噪声声暴露级大于 150 dB 时，会造成养殖区大黄鱼的行为异常<sup>[23]</sup>。本研究模拟现场测量获取的水下打桩噪声作为声刺激信号，针对网箱养殖大黄鱼中鱼和幼鱼进行了听觉影响实验。实验在大黄鱼育种国家重点实验室的水池进行，首先对水池进行了声场标定，标定结果用于声刺激信号的强度选择和大黄鱼影响门限值的计算。实验过程，人工结合水上和水下摄像机同步观察记录大黄鱼的行为响应。声刺激信号强度以 3 dB 的梯度逐渐增加，每个信号均发射 6 次以上。实验结果如表 4 所示，可以看出，大黄鱼幼鱼所承受噪声能力明显小于中鱼，相同的信号，声压级

表4 水下噪声对大黄鱼影响门限值  
Tab. 4 Threshold of underwater noise impact on large yellow croaker

鱼体体长/cm	行为响应		暂时性听觉位移		生理损伤	
	SEL/dB	SEL/dB	SEL/dB	SEL/dB	SEL/dB	SEL/dB
7~8	142	—	—	—	—	164
20~23	145	—	168	—	—	—

还未达到中鱼的暂时性听觉位移时, 小鱼已出现生理损伤, 并有少量死亡。

### 3.2 水下打桩噪声对大黄鱼影响

水下噪声对鱼类影响分为行为干扰、听觉掩蔽、暂时性听觉位移、永久性听觉位移和生理损伤<sup>[29-30]</sup>。水下噪声的峰值声压级和时间相关的声暴露级, 是分析水下噪声对鱼类影响的两个重要指标。对于水下打桩噪声, 不同于水下爆破冲击波, 持续时间较长, 单次击打约持续 90~100 ms, 而峰值声源级相对较低, 约 2 950 Pa (209.4 dB), 低于《爆破安全规程》(GB6722—2014)规定的石首科鱼类承受峰值声压值。因此, 此类噪声不合适采用峰值声压级作为评价指标。本次打桩测量计算得到的声暴露源级平均值约 197.7 dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>·s, 根据本研究海域声传播衰减规律和大黄鱼听觉试验结果, 利用公式(9)可以推算出单根打桩过程中, 对养殖区大黄鱼幼鱼的行为影响范围约为 16.9 km、生理损伤影响范围约为 0.35 km; 对养殖区大黄鱼中鱼的行为影响范围约为 10 km、暂时性听觉位移影响范围约为 0.18 km。由于海洋生物听觉敏感性是与频率相关的, 有必要分析水下打桩噪声的频谱分布。大黄鱼的敏感频段分布在 100 Hz~1 kHz 频带内, 阈值在 90~110 dB, 高于相同频段内的海洋背景噪声级<sup>[20]</sup>。图 10 可知, 水下打桩噪声能量分布 50 Hz~1 kHz, 与大黄鱼的听觉敏感频段相重叠, 因此此类噪声对大黄鱼影响较大。图 11 给出了 O2 测量站位水下冲击打桩噪声的频谱与大黄鱼的听觉阈值<sup>[31]</sup>曲线对比, 可以看出 100 Hz~1 kHz 频段, 水下冲击打桩噪声的频带声压级明显高于大黄鱼的听觉阈值, 最大相差 35 dB。

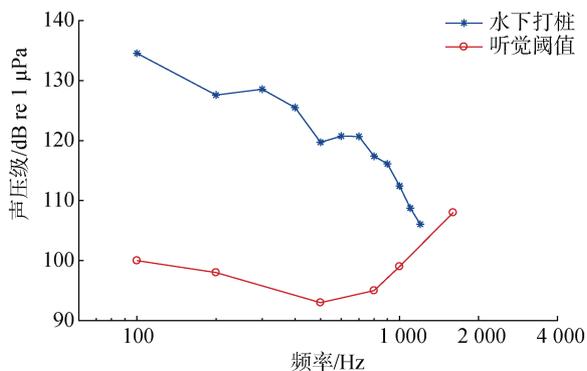


图 11 水下打桩噪声功率谱图和大黄鱼听觉阈值曲线  
Fig. 11 Spectrums for piling pulse and audiograms of large yellow croaker

## 4 结论

通过对福建省兴化湾海上风电场二期工程建设期风机桩基打桩作业辐射水下噪声监测及时频域特性分析, 结合大黄鱼听觉影响实验结果, 研究了水下冲击打桩噪声对大黄鱼的影响, 得出了以下几点结论。

(1) 水下打桩噪声呈现为低频、高强度的脉冲信号, 主要能量分布在 1 kHz 以下, 单次击打产生的峰值声源级和声暴露级分别达到 209.4 $\pm$ 2 dB 和 197.7 $\pm$ 2 dB。

(2) 单根桩柱作业初期, 760 m 测量点获取的水下噪声峰值声压级和声暴露级离散分布并存在一定的起伏, 随着打桩锤能量逐渐增加, 测量值趋于稳定, 并且在同一能量打桩锤的作用下, 对应的测量值变化不大。

(3) 水下打桩噪声的声源级除与打桩锤能量有关之外, 还与桩柱参数密切相关, 如桩材质、直径、长度、壁厚等。水下打桩噪声的传播衰减, 与水文底质环境参数有关, 如传输路径上的声速剖面、水深、底质类型等。本研究适用于所有水下打桩作业, 但研究结果是针对特定桩柱特定海域, 仅为相似工程作为参考。

(4) 峰值声压级用于描述声信号的最大声压值, 与信号持续时间无关; 而声暴露级是描述声信号在持续时间内能量的累积。对于水下打桩, 峰值声压级不足以表征打桩启动和停止时间内的信号能量, 因此应采用峰值声压级和声暴露级相结合评价大黄鱼的影响程度。水下打桩噪声频域能量分布与大黄鱼的听觉敏感频段相重叠, 此类噪声对大黄鱼影响程度和范围较大, 短期会干扰大黄鱼的行为甚至听觉位移、生理损伤, 造成养殖户利益损失。

(5) 为减缓水下打桩噪声对附近大黄鱼的影响, 对于自然环境下的鱼类, 一般采用软启动作业, 打桩锤低能量缓慢启动过程中, 让打桩点附近的鱼类逃离危险区域; 对于养殖区鱼类, 可通过单层或多层气泡帷幕、桩体隔离套管来减弱辐射至水中的声波强度, 也可以通过搬迁养殖区。

### 参考文献:

- [1] WILLIAMS R, WRIGHT A J, ASHE E, et al. Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management[J]. Ocean & Coastal Management, 2015, 115: 17-24.

- [2] ERBE C, REICHMUTH C, CUNNINGHAM K, et al. Communication masking in marine mammals: A review and research strategy[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 103: 15-38.
- [3] FAULKNER R C, FARCAS A, MERCHANT N D. Guiding principles for assessing the impact of underwater noise[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55: 2531-2536.
- [4] National Research Council. *Ocean Noise and Marine Mammals*[M]. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2003.
- [5] POPPER A N. *The effects of noise on aquatic life II* [M]. New York: Springer-Verlag, 2016.
- [6] NOWACEK D P, THORNE L H, JOHNSTON D W, et al. Responses of cetaceans to anthropogenic noise[J]. *Mammal Review*, 2007, 37: 81-115.
- [7] POPPER A N, HASTINGS M C. The effects of anthropogenic sources of sound on fishes[J]. *Journal of Fish Biology*, 2009, 75: 455-489.
- [8] FRIEDRICH L, RICHARD R F. Auditory evoked potential audiometry in fish[J]. *Review Fish Biology Fisheries*, 2013, 23: 317-364.
- [9] SIMPSON S D, ANDREW N R, NEDELEC S L, et al. Anthropogenic noise increases fish mortality by predation[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10544.
- [10] BAILEY H, SENIOR B, SIMMONS D, et al. Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore wind farm and its potential effects on marine mammals[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60: 888-897.
- [11] BRANSTETTER B K, BOWMAN V F, HOUSER D S, et al. Effects of vibratory pile driver noise on echolocation and vigilance in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*)[J]. *Journal of the Acoustical Society America*, 2018, 143: 429-439.
- [12] KASTELEIN R A, HELDER-HOEK L, KOMMEREN A, et al. Effect of pile-driving sound on harbor seal (*Phoca vitulina*) hearing[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 143: 3583-3594.
- [13] LI S H, WU H P, XU Y H, et al. Mid- to high-frequency noise from high-speed boats and its potential impacts on humpback dolphins[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, 138: 942-952.
- [14] LIU M M, DONG L J, LIN M L, et al. Broadband ship noise and its potential impacts on Indo-Pacific humpback dolphins: Implications for conservation and management[J]. *Journal of the Acoustical Society America*, 2017, 142: 2766-2775.
- [15] WANG Z T, WU Y P, DUAN G Q, et al. Assessing the underwater acoustics of the world's largest vibration hammer (OCTA-KONG) and its potential effects on the indo-pacific humpbacked dolphin (*Sousa chinensis*)[J]. *PLoS One*, 2014, 9: e110590.
- [16] 汪启铭. 海上风电场建设水下噪声对中华白海豚影响研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.  
WANG Qiming. Research on the impact of underwater noise radiated from offshore wind farm on Chinese white dolphin (*Sousa chinensis*)[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.
- [17] 苏冠龙, 许肖梅. 水下打桩和船舶噪声对斑海豹听觉影响的初步分析[J]. *应用海洋学学报*, 2013, 32: 178-183.  
SU Guanlong, XU Xiaomei. Preliminary analysis on the impact of underwater pile driving noise and shipping noise on spotted seal (*Phoca largha*)[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, 32: 178-183.
- [18] 时文静, 王志陶, 方亮, 等. 打桩水下噪声对长江江豚影响初探[J]. *水生生物学报*, 2015, 39: 399-407.  
SHI Weijing, WANG Zhitao, FANG Liang, et al. A preliminary study on impact of piling underwater noise on the Yangtze finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39: 399-407.
- [19] 张天赐, 居涛, 李松海, 等. 长江和畅洲江段大型船舶的噪声特征及其对长江江豚的潜在影响[J]. *兽类学报*, 2018, 38: 543-550.  
ZHANG Tianci, JU Tao, LI Songhai, et al. Navigation noise properties of large vessels in Hechangzhou region of the Yangtze River and their potential effects on the Yangtze finless porpoise[J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2018, 38: 543-550.
- [20] HORODYSKY A Z, BRILL R W, FINE M L, et al. Acoustic pressure and particle motion thresholds in six sciaenid fishes[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2008, 211: 1504-1511.
- [21] RAMCHARITAR J, POPPER A N. Masked auditory thresholds in sciaenid fishes: A comparative study[J]. *Journal of the Acoustical Society America*, 2004, 116: 1687-1691.
- [22] 刘贞文, 许肖梅, 黄二辉, 等. 大黄鱼的声刺激行为研究[J]. *应用海洋学学报*, 2014, 33: 105-110.  
LIU Zhenwen, XU Xiaomei, HUANG Erhui, et al. Study on behavior of sound stimulation for large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*)[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2014, 33: 105-110.
- [23] 周在明, 杨燕明, 牛富强, 等. 影响大黄鱼的水中声指标[J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37: 734-740.  
ZHOU Zaiming, YANG Yanming, NIU Fuqiang, et al. Index of underwater acoustic waves impacting on large yellow croakers[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37: 734-740.
- [24] 刘贞文, 许肖梅, 覃柳怀. 隧道爆破声波对毗邻养殖水中声场环境的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31: 88-94.  
LIU Zhenwei, XU Xiaomei, QIN Liuhuai. Underwater

- sound effects generated by tunnel explosion near the coastal harbor[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31: 88-94.
- [25] ISO 18406. Underwater acoustics – Measurement of radiated underwater sound from percussive pile driving, 2017.
- [26] URICK R J. Principles of underwater sound[M]. New York: Peninsula Publishing, 1983.
- [27] 中华人民共和国国家标准编写组. 爆破安全规程: GB 7622—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. National standards compilation group of the People's Republic of China. Safety regulations for blasting: GB 7622—2014[S]. Beijing: China Standards Press, 2015.
- [28] NMFS (National Marine Fisheries Service). The marine mammal protection act[S]. Silver Spring, Maryland: NOAA's National Marine Fisheries Service, 2007.
- [29] HAWKINS D A, POPPER A N. A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates[C]. *ICES Journal of Marine Science*, 2017, 74: 635-651.
- [30] HUBERT J, NEO Y Y, WINTER H V, et al. The role of ambient sound levels, signal-to-noise ratio, and stimulus pulse rate on behavioural disturbance of seabass in a net pen[J]. *Behavioural Processes*, 2020, 170: 103992.
- [31] 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. YIN Leiming. The behavior response and attractive mechanism of *Larimichthys crocea* to acoustic stimulus[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017.

## Impact of pile driving underwater noise from offshore wind turbines on the large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*)

NIU Fu-qiang<sup>1</sup>, LI Zhi<sup>2</sup>, XUE Rui-chao<sup>1</sup>, YANG Yan-ming<sup>1</sup>, MA Li<sup>1</sup>

(1. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China; 2. Fujian Energy Investment Co. Ltd, China Three Gorges Corporation, Fuzhou 350001, China)

**Received:** Oct. 19, 2020

**Key words:** offshore wind turbine; underwater pile driving noise; sound exposure level; large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*); environmental assessment

**Abstract:** Pile-driving for wind turbines radiates high-intensity underwater noise during offshore wind farm construction. Therefore, it is imperative to study the measuring methodologies, underwater noise characteristics, and the impact on marine life. In the present study, underwater noise was measured synchronously at multiple stations using a self-contained underwater sound recorder during the entire piling at the construction phase of the Xinghua Bay offshore wind farm phase II project in Fujian Province, China. The sound source level and sound exposure level of noise were obtained by Least-squares fitting after a time and frequency domain analysis. The results showed that underwater noise for piling is a typical low-frequency, high-intensity impulsive noise of a 90 and 100 ms duration, a peak sound source level of  $209.4 \pm 2$  dB, and an average sound exposure level of  $197.7 \pm 2$  dB for a single pulse. The dominant energy of the piling noise was distributed in the 50 Hz to 1 kHz frequency band. The sound pressure level was increased by 40–50 dB in the band at the same measurement station, compared to the ambient noise at 750 m distance from the pile-driving station. Because the energy distribution of underwater piling noise overlaps with the auditory sensitive frequency band of a sizeable yellow croaker in the frequency domain, the piling noise will considerably impact the fish. The sound exposure level should be used as an evaluation index in practical engineering applications.

(本文编辑: 康亦兼)