抛石噪声特性及其对长江江豚的可能影响

居 涛[1,2]，张天赐[1,2]，王志陶[1]，谢 燕[3]，郑超蕙[3]，王克雄[1]，王 丁[1]
(1. 中国科学院水生生物研究所，湖北武汉 430072;
2. 中国科学院大学，北京 100049;
3. 交通运输部规划研究院，北京 100028)

摘要：为保障长江通航能力，抛石作为航道整治的一种常用方式而被频繁实施。为了探索抛石产生的水下噪声特征及其对长江江豚的潜在影响，采集了 4 种不同类型的抛石施工产生的水下噪声，分析声信号的声压级、功率谱密度等。结果表明，抛石噪声的声源级均大于 151 dB；能量主要集中于中低频(<20 kHz)部分；20～100 kHz 频率范围的声压级均大于 45 dB；记录到的 1/3 倍频程声压级在绝大多数频率处都高于长江江豚听觉阈值，说明抛石噪声可被江豚感知。结合长江江豚声信号及听觉特性，认为抛石噪声可能会压缩长江江豚的自然栖息地；对幼年长江江豚造成伤害的可能性较大；对长江江豚的听觉可能造成不利影响。最后基于分析结果提出了缓解方案。

关键词：长江江豚；抛石噪声；航道整治；水下噪声
中图分类号：R136.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2017)-06-0580-09
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.06.014

Characteristics of riprapping underwater noise and its possible impacts on the Yangtze finless porpoise

JU Tao[1,2], ZHANG Tian-ci[1,2], WANG Zhi-tao[1], XIE Yan[3], ZHENG Chao-hui[3], WANG Ke-xiong[1], WANG Ding[1]
(1. *Institute of Hydrobiology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Wuhan* 430072, *Hubei*, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;
3. *Transport Planning and Research Institute*, *Ministry of Transport*, *Beijing* 100028, *China*)

Abstract: In order to strengthen the shipping capacity of the Yangtze River, riprapping is frequently conducted as a common way of waterway adjustment activities. To study the riprapping noise and its potential impacts on the Yangtze finless porpoise, the underwater noises by four types of riprapping were collected and their sound pressure levels (SPL) and power spectral densities were analyzed. The results show that the source levels of riprapping noise are greater than 151 dB re 1 μPa with majority energy concentrating in low frequency components (< 20 kHz). Root-mean-square SPL of the frequency range between 20 Hz and 100 kHz are higher than 45 dB re 1 μPa, and the one-third octave SPLs are higher than majority of the hearing threshold of the porpoise, indicating that the riprapping noise can be sensed by the porpoise. Considering the porpoise's vocalization and hearing characteristics, it is concludud that the riprapping noise might degrade the natural habitat of the porpoise, and has greater negative effects on the porpoise in infancy, however, less likely damage the auditory of the porpoise. Finally, mitigation measures are proposed based on the analysis.

Key words: Yangtze finless porpoise; riprapping noise; waterway adjustment activity; underwater noise

0 引 言

鲸类动物是高度依赖声音进行导航、交流、觅食等生存活动的水生物种。随着水环境中人类活动，诸如航运、声呐、打桩等[1]的加剧，水体噪声污染对于鲸类等水生哺乳动物的影响正在引起人们越来越多的关注[2-3]。Bailey[4]等人研究了近岸风力发电机组施工时的打桩噪声，结果表明在距离打桩点 100 m 范围内的噪声可能造成瓶鼻海豚(*Tursiops truncatus*)的听觉损伤，即使是在距离打桩点 50 km 之外的海域，打桩噪声仍可能会干扰瓶鼻海豚的行为。Tougaard[5]等发现在打桩噪声可影响范围的港湾鼠海豚(*Phocoena phocoena*)的发声行为，其发声行为减少，直至打桩结束后 48 h 才可恢复到打桩前的水平。李松海[6]等通过对广西三娘湾的观豚快艇噪声研究发现，快艇高速行驶时会产生频率大于 100 kHz 的高频噪声，并可能对中华白海豚(*Sousa chinensis*)的声信号造成掩蔽。

收稿日期：2017-02-27; **修回日期：**2017-05-05
基金项目：交通运输部委托专项课题(Y649051101、Y691162102)
作者简介：居涛(1988－)，男，江苏连云港人，硕士研究生，研究方向为鲸类保护生物学
通讯作者：王丁，E-mail: wangd@ihb.ac.cn

长江流域人工水下噪声研究也已有一些工作，如王振太[7]等报道了洞庭湖内作业中的采砂船噪声，其声源级范围在 150～170 dB re 1μPa(后文声压级的单位均简写为 dB)且能量主要集中在 1 kHz 以下。时文静[8]等研究了长江洪湖段的打桩噪声，报道其声源级可达 205.4±2.6 dB。张天赐[9]等研究了石首天鹅洲保护区内常见的小型快艇噪声，发现其在高速航行状态下，大于 10 kHz 的高频声压级可达 130 dB。

长江江豚(*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*)是白鱀豚(*Lipotes vexillifer*)功能性灭绝后长江中仅存的鲸类[10]，仅分布于长江中下游干流及两大通江湖泊——洞庭湖和鄱阳湖。2012 年底的调查结果表明，长江江豚种群数量大约仅为 1040 头，且呈加速下降：长江干流的江豚种群数量在 2006 年之前的年下降速率约为 6.4%，而到了 2006～2012 年间，年下降速率达 13.7%[11-12]。基于种群动态模型的预测结果显示，如果长江流域栖息地条件得不到显著改善，且长江江豚保护又没能取得明显效果，长江江豚在未来 10 余年内存在较高的灭绝风险[13]。长江江豚目前仍属国家二级保护野生动物，2014 年底，农业部已发文要求各渔业主管部门，按照国家一级重点保护野生动物的保护要求，对长江江豚实施最严格的保护和管理措施。

广义的抛石是指抛投块石、卵石等人工或天然石料，在指定区域铺砌形成符合一定设计要求的结构体，并使其具备某种功能的施工方法[14]。在长江航道整治应用方面，抛石可表述为在河岸或河底抛填质地坚硬、裂隙较少、不易水解风化的具备一定体积和重量要求的石块，减缓水流对于河岸或水下构造物冲刷的一种航道整治施工方法。伴随着人类对于长江流域的大规模开发利用，由此产生的大量水下噪声，很可能会对依赖水下声探测和声通讯进行生存和繁衍的长江江豚造成愈来愈严重的不利影响。因此，为了更有效地保护长江江豚，很有必要加强对包括航道整治施工噪声在内的长江涉水工程施工噪声进行监测和研究[15]。本研究针对长江航道整治过程中经常采用的抛石施工，研究了其水下噪声特征，分析了其可能对长江江豚造成的不利影响，并提出了相应的缓解措施。

1　研究方法

1.1　研究区域及对象

研究区域位于长江下游和畅洲北汊江段(见图 1)。和畅洲南汊为主航道，航运繁忙，人为噪声干扰较大；北汊为江苏镇江长江豚类省级自然保护区核心区，禁止通航，除航道整治施工外，偶尔有船舶抛锚，人为噪声干扰较小。北汊水面宽为 1 000～1 600 m，最深处可达 60 m，河底较为平缓。北汊河床多为泥沙质，岸地类型兼有泥沙质岸和人工水泥及石块固化岸，泥沙质地疏松，吸声性能强，可以有效减弱声信号的反射干扰，为了确保数据的真实性，本研究的噪声采集位点尽量选择在泥沙质河岸范围内。此外，考虑到北汊受到潮汐的影响，本研究的噪声采集时间尽量选择在潮位相近的时间段内，以降低潮汐因素对实验的干扰。采样点信息见表 1。

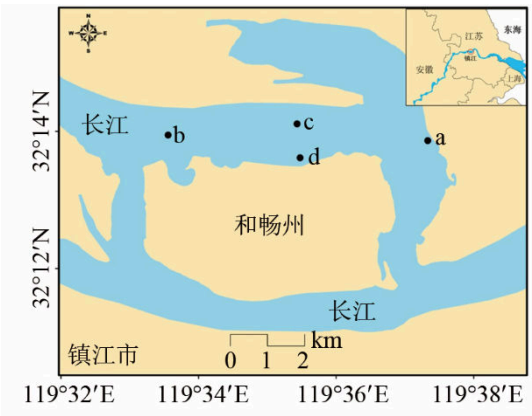


图 1　抛石水下噪声采集点(a-斗式抛石，b-挖掘机抛石，c-网兜沉石，d-网兜抛石)

Fig.1　Data collection points for riprapping noise (a-riprapping by bucket, b-riprapping by excavator, c-riprapping with net-bag, d-riprapping by net-bag)

表 1　抛石噪声采样点基本信息

Table 1　Basic information of riprapping noise sampling sites

施工类型	经纬度	水深/m	采样点与抛石施工点距离/m
斗式抛石	32.231081°N 119.622190°E	21.5	45
挖掘机抛石	32.232425°N 119.559293°E	31.9	40
网兜沉石	32.235159°N 119.590532°E	11.9	40
网兜抛石	32.226914°N 119.591288°E	23.4	45

研究对象为航道整治施工中常用的四种抛石方式，即斗式抛石、挖掘机抛石、网兜沉石和网兜抛石(见图 2)。不同类型抛石方式的工艺如下：斗式抛石，每次每斗石料重 17～18 t，通过吊机控制斗仓，当斗仓接触水面附近后，通过翻动斗仓，将石块抛入江中，抛石持续时间为 3～6 s。挖掘机抛石，

挖掘机在平底货船上，用抓斗将石块推入江中或将石块铲起再倒入江中，石块从距离水面 0.5～1.5 m 高度落下，每艘运石船石量为 800～1 000 t，需耗时 20～30 min 才能抛完，但抓斗每次推入水中或每次铲起倒入水中的石量差异很大。网兜沉石，每个网兜盛放石料重 7～10 t，抛石过程中，每两袋为一组，通过吊机缓慢送入水下 10～15 m，在接近河床或接触河床的时候放下，石块和网兜一起沉入江底，抛石过程持续约 10～15 s(从网兜接触水面到放下网兜)。网兜抛石，每个钢丝网兜内石料重约 2～3 t，通过吊机控制网兜，在距离水面 2～3 m 的时候翻动网兜，让石料落入江中，持续时间为 2～3 s(从石料最初接触水面开始到最后一块岩石落入水中)。四种抛石工艺的主要特征参考表 2。对于本研究中的四种抛石而言，单位时间内落入水中的石量差异较大。石块与水体的碰撞以及相关抛石设备的运行是形成噪声的最主要原因，此外，石块下沉时与河床的碰撞也会产生噪声。

(a) 斗式抛石 (b) 挖掘机抛石

(c) 网兜沉石 (d) 网兜抛石

图 2 四种抛石施工图

Fig.2 Four types of riprapping

表 2 不同类型的抛石特征(*表示数据未知)

Table 2 Characteristics of different riprapping(* means data unknown)

类型	斗式抛石	挖掘机抛石	网兜沉石	网兜抛石
每次抛石量/t	17～18	*	14～20	2～3
石块自由下落时与水面距离/m	0	0.5～1.5	10～15	2～3
每次抛石持续时间/s	3～6	*	10～15	3～5

1.2 数据采集

声学数据的采集平台为一艘长为 15.1 m、吨位为 0.9 t 的渔船，数据采集时间为 2016 年 11～12 月，此时长江处于枯水期，水流较缓，水流对于数据干扰较小且数据采集操作易于执行；此外，此时北汊航道整治施工接近尾声，施工点较少且分散，数据采集时基本不受其他施工点噪声的干扰。实验期间，通过向施工方咨询以及现场实地勘查，发现有抛石施工时，则开船行驶至抛石施工点附近，将船挂靠在锚漂或者挂靠在施工浮吊平台上并关闭发动机。采样点设置在渔船上或施工浮吊平台上，之后对周边环境进行观察判断。当方圆 1.5 km 范围内没有其他人为噪声干扰且没有江豚出现时，则用遥控器启动声学记录仪(SoundTrap 300HF, Ocean Instruments Ltd, New Zealand)，并将记录仪垂直浸没至水下约 2 m 深处进行记录。声学记录仪的参数如下：有效工作频率范围：20 Hz～150 kHz ；灵敏度：–171.3 dB re 1V/μPa(高增益档)；采样率：288 kHz；模数转换位点数：16 bit。采样点环境背景噪声的采集选择在人为噪声干扰最弱，即采样点附近 1.5 km 范围内既无其它施工也无施工船航行的时段进行，仪器选择和参数设置与采集施工噪声相同。声学数据采集过程中，同时记录采样点的位置信息、石块入水时间以及声学记录仪出、入水的时间(位置和时间信息从 GPS 中读取：GPS72, Garmin, Schaffhausen, Switzerland)和水深信息。水深信息通过水深仪(Hondex electronics CO., LTD. Aichi, Japan)测量获得。采样点和抛石点的间距由激光测距仪(ELITE1500 LRF, Bushnell, Missouri)测量获得。所有数据采集均在蒲氏风级<3 且无雨无雹的天气情况下进行。需要说明的是，采集噪声数据时，四种抛石方式均为独立施工，且每种抛石方式仅是一台机械单独施工。实验结束后，将声学记录仪记录下的音频文件(.wav 格式)导入电脑并分类存储。采集抛石施工噪声现场如图 3 所示。

图 3 采集抛石施工噪声现场

Fig.3 The scene of collecting riprapping noises

1.3 数据分析

所有.wav 文件均用 Adobe Audition 3.0 软件(Adobe Systems Inc., San Jose, California)查看波形图，选择信噪比较高的文件，截取抛石过程中的 3 段时长为 4 s 的具有代表性的音频数据用作下一步

分析。

用 Matlab 软件(Math Works, Natick, MA)对截取的声信号(带宽为 20 Hz～144 kHz)进行进一步的校准和分析。测定的声学参数包括均方根声压级 SPL_{rms} (单位为 dB)、声暴露级 SEL(单位为 dB re 1μPa^2·s)以及声源级 SL(单位为 dB)。相关参数的计算公式为[16]：

$$SPL_{rms}=10\lg\left(\frac{1}{T}\int_T\frac{P^2(t)}{P^2(0)}\mathrm{d}t\right) \tag{1}$$

$$SEL=10\lg\left(\int_T\frac{P^2(t)}{P^2(0)}\mathrm{d}t\right) \tag{2}$$

$$SL=SPL_{rms}+TL \tag{3}$$

其中，$P(t)$ 为 t 时刻对应的声压(单位为 Pa)，$P(0)$ 为基准声压 1 μPa，T 为声信号时长；TL 为<50 m 的浅水环境中声音的传播损耗，可近似认为[17]

$$TL=10\lg R \tag{4}$$

其中：R 为采样点与声源之间的距离(单位为 m)；在计算声信号的功率谱密度(Power Spectral Density，PSD)、进行声信号的频谱声压级统计和计算声信号的 1/3 倍频程声压级时选用汉宁窗(窗宽 1 s，窗口重叠 50%)。

2　结 果

2.1　不同类型抛石的噪声强度比较

四个采样点的环境背景噪声强度基本一致。各类抛石的宽频噪声数据如表 3 所示。从表 3 可得，环境背景噪声级约为 108.1 dB，而所有类型抛石噪声的宽带声源级均高于 151 dB，明显高于本底噪声。不同类型抛石按声源级由大到小排列依次为：网兜抛石>斗式抛石>挖掘机抛石>网兜沉石。其次，各类抛石噪声的声暴露级也明显高于本底噪声，由大到小排列依次为：网兜抛石>斗式抛石>挖掘机抛石>网兜沉石(见表 3)。此外，结合表 2 可以发现，不同类型抛石的声源级大小同石块自由下落时与水面的距离呈正相关。

表 3　不同类型抛石的宽频噪声

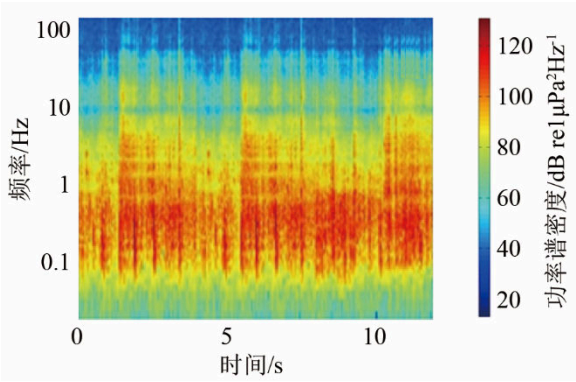
Table 3　Broadband noise levels of different riprapping

类型	斗式抛石	挖掘机抛石	网兜沉石	网兜抛石	环境背景
均方根声压级/dB	141.5	140.0	135.3	142.8	108.1
声暴露级/(dB re 1μPa^2·s)	151.7	150.2	145.5	153.0	113.6
声源级/dB	157.0	156.0	151.3	159.3	108.1
与环境背景的声暴露级的差值/(dB re 1μPa^2·s)	38.1	36.6	31.9	39.4	0
与环境背景噪声级的差值/dB	48.9	47.9	43.2	51.2	0

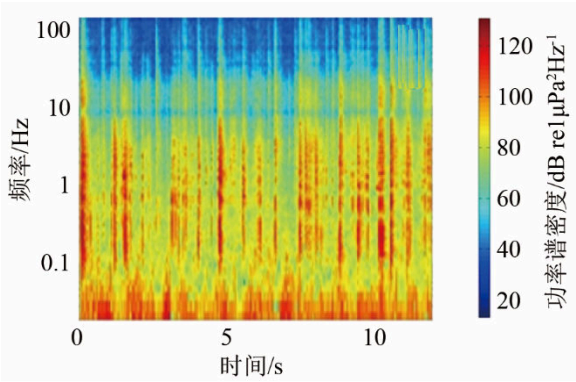
2.2　不同类型抛石的噪声在不同频率的能量分布

为了探索不同类型的抛石噪声所包含的频率成分的能量分布，进一步分析了它们的功率谱密度图(如图 4 所示)。四个采样点环境背景噪声的特征非常接近。抛石噪声声压级在不同频率段的分布概率统计如图 5 所示，其中，P 表示百分位数。不同施工类型噪声的均方根声压级对比如图 6 所示。需要强调的是，因传播损耗，图 4、5 和 6 所示噪声强弱都是来自采样点的数据，均低于其相应的声源级水平。

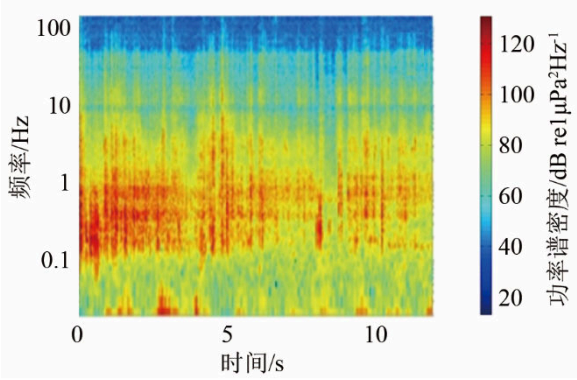
由图 4 可知，环境本底噪声的能量分布在时间上的连续性较好，其能量主要集中于<1 kHz 的低频部分，1 kHz 以上的频带所包含的能量较小(<70 dB re 1μPa^2·Hz^{-1})，且呈现频率越高，所含能量越小的趋势。抛石噪声的能量分布在时间上呈现不连续性，这一点与抛石施工方式吻合。斗式抛石和网兜沉石的噪声能量主要集中在 0.1～10 kHz，而挖掘机抛石和网兜抛石的噪声能量在 20 Hz～10 kHz 的频段均有分布。总体而言，四种抛石的水下噪声能量主要集中在中低频段，在>20 kHz 的高频段，能量均小于 80 dB re 1μPa^2·Hz^{-1}。



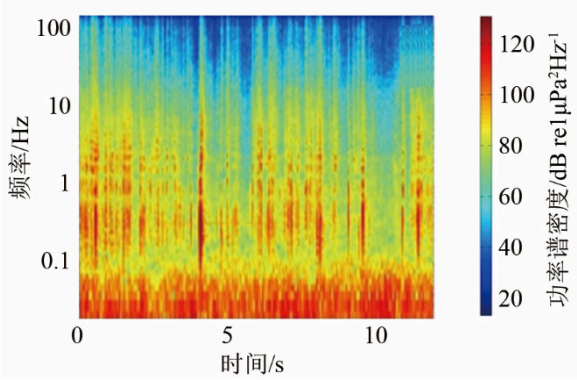
(a) 斗式抛石



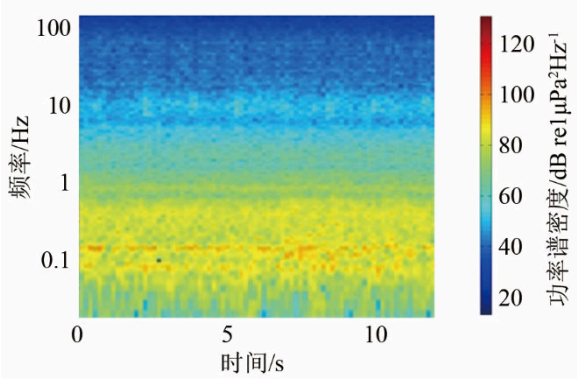
(b) 挖掘机抛石



(c) 网兜沉石



(d) 网兜抛石

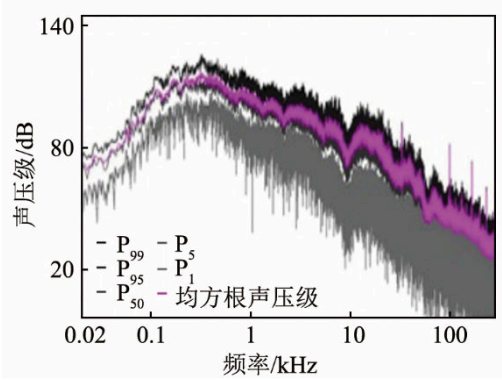


(e) 环境背景

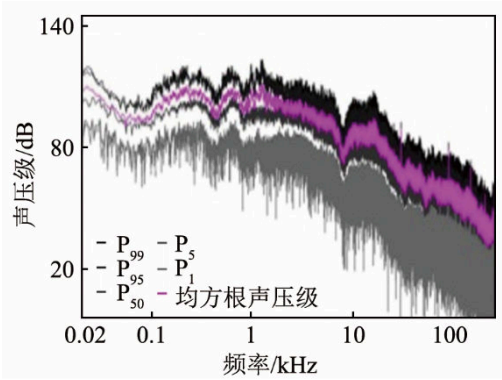
图 4 功率谱密度图(x 轴时间范围 0～12 s)

Fig.4 PSD maps (x axis: 0～12 s)

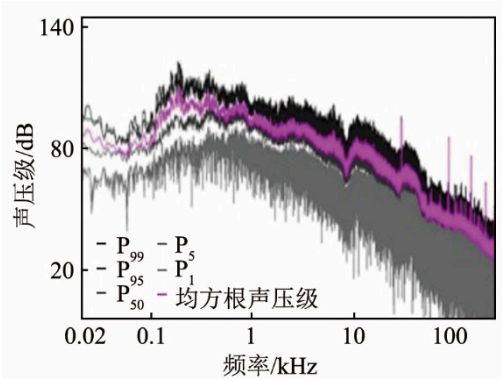
图 5 亦表明，抛石噪声以高强度的中低频为主，噪声的频带较宽且高频成分的声压级普遍较低。在>20 kHz 的噪声频带，只有网兜抛石和挖掘机抛石达到了 60 dB。在>200 Hz 时，所有抛石的噪声声压级均随频率增加而呈下降趋势；在 20～200 Hz 时，斗式抛石和网兜沉石的噪声声压级随频率增加而呈增加趋势；总体而言，所有类型抛石的噪声声压级随频率的变化趋势均较为复杂，其中以挖掘机抛石和网兜抛石尤为明显。就均方根声压级而言(见图 6)，抛石噪声声压级均小于 120 dB。在 20 Hz～100 kHz 范围内，抛石噪声声压级均大于 45 dB。在 20～80 Hz 以及>3 kHz 范围内，网兜抛石的均方根声压级最高，在>50 Hz 的频段，网兜沉石的均方根声压级最低。对所有类型抛石的噪声而言，声压级在 200 Hz～120 kHz 频段内随频率增加而下降的速率较缓，此后声压级随频率增高而加速



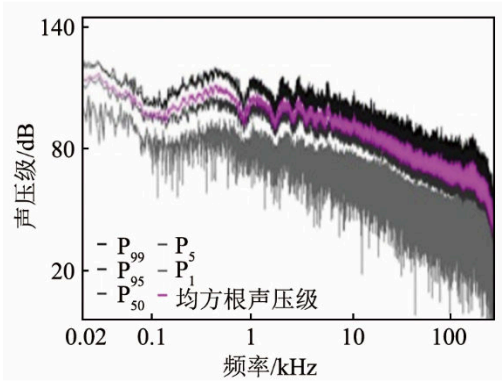
(a) 斗式抛石



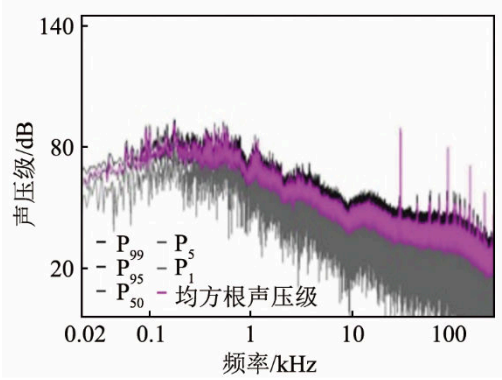
(b) 挖掘机抛石



(c) 网兜沉石



(d) 网兜抛石



(e) 环境背景

图 5　不同类型抛石工艺在各频率处的声压级统计图(x 轴频率范围 20 Hz～144 kHz；y 轴幅值 0～140 dB)

Fig.5　Distribution patterns of different riprapping noises at different frequencies (x axis: 20 Hz～144 kHz; y axis: 0～140 dB)

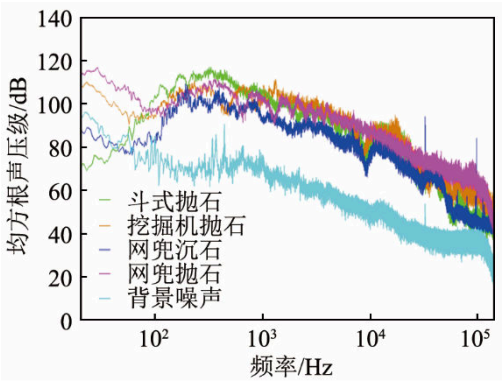


图 6　不同类型抛石的均方根声压级对比(x 轴幅值 20 Hz～144 kHz)

Fig.6　Comparison between SPL_{rms} of different riprapping noises (x axis: 20 Hz～144 kHz)

下降。在所有频段内，所有类型的抛石噪声声压级均大于背景噪声，在 200 Hz～10 kHz 范围内，抛石噪声与背景噪声的声压级差值变化不明显，10 kHz 之后，抛石噪声与背景噪声的声压级差值随频率增加而减小。数据显示，各种抛石作业会在所有频率范围内提升环境背景噪声的声压级。

2.3　抛石噪声 1/3 倍频程声压级对比

因为哺乳动物听觉系统的有效滤波带宽接近 1/3 倍频程[18]，所以进一步计算了抛石噪声的 1/3 倍频程功率谱来评估抛石对长江江豚的影响(见图 7)。

由图 7 显示，背景噪声的 1/3 倍频程声压级数值在所有频率范围内都低于所有类型的抛石噪声(四个采样点背景噪声的 1/3 倍频程声压级基本一致)。在<400 Hz 的频段，抛石噪声的 1/3 倍频程声压级呈现随频率增高而增加的趋势，而在>400 Hz 频段，抛石噪声的 1/3 倍频程声压级呈现随频率增高而降低的趋势。在<13.6 kHz、>142.7 kHz 这 2 个频率范围内，长江江豚的听觉阈值高于背景噪声的 1/3 倍频程声压级，无法听到这些频段的本底噪声。

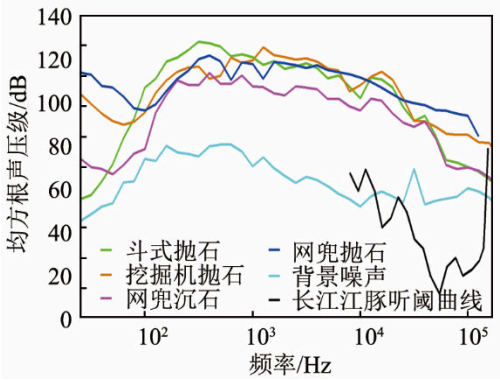


图 7　不同类型抛石噪音的 1/3 倍频程均方根声压级与长江江豚听阈曲线图的比对(x 轴频率范围 25 Hz～170 kHz，图中长江江豚的听阈曲线引自文献[19])

Fig.7　Comparison of 1/3 octave SPL_{rms} of different riprapping noises and the audiogram of the Yangtze finless porpoise (x axis: 25 Hz～170 kHz, the porpoise audiogram is adopted from reference[19])

抛石噪声绝大部分频率的 1/3 倍频程声压级都远高于长江江豚对应频率的听觉阈值，可被长江江豚感知；仅在>158.5 kHz 的频率段，抛石噪声的 1/3 倍频程声压级迅速降低，而长江江豚的听觉阈值则急剧上升，该频段的抛石噪声可能不能被长江江豚听闻。此外，由于实验中记录到的抛石噪声是噪声源在水下传播损耗后的信号，因此抛石噪声可被江豚感知的距离应远大于本实验的 40 m 及 45 m。

3　讨　论

3.1　抛石噪声对长江江豚栖息地的影响

和畅洲北汊江段属于江苏镇江长江豚类省级自然保护区的核心区，相对于南汊主航道，水环境较为安静。据中国科学院水生生物研究所 2010 年和 2012 年的考察数据以及保护区管理处长期的监测数据，在航道整治施工前，北汊水域长期有 20 余头稳定的江豚群体活动，这些江豚由于长期在水下环境较为安静的水域生活，很可能对北汊的安静水体产生了一定程度的依赖，对噪声耐受性较低。长江江豚可以在北汊保持较为稳定的种群，说明它们已经很好地适应了该水域的水下背景环境。由表 3 可见，抛石施工噪声的声源级和声暴露级都明显高于背景噪声；而图 7 更加直观地表明，抛石噪声的 1/3 倍频程均方根声压级在长江江豚听力曲线频率范围内均远大于背景噪声，由此推测，抛石噪声可能会对一定范围内的长江江豚造成水下声环境上的明显不适。北汊航道整治施工前期，各种抛石施工覆盖范围较大(大约占据北汊水域面积的一半)，大规模的水体施工可能会进一步压缩江豚原有

的栖息地甚至造成栖息地的丧失，江豚进入和畅洲南汊主航道水域的时间可能被迫增加，随之而来的是较高的动物被船舶伤害的风险。通过在施工水域江豚的目视考察也进一步支持了上述的推测：自北汊航道整治施工开始以来，在北汊目击江豚的频次明显减少。综上所述，抛石所产生的水下噪声很可能会进一步压缩长江江豚有限的栖息地，对其生存造成不利影响。

3.2 抛石噪声对长江江豚声信号的影响

3.2.1 对长江江豚高频声信号的影响

长江江豚在巡游和捕食时主要使用高频回声定位信号[20]，野外环境下的成年长江江豚的回声定位信号中心频率可达 129 kHz，表观声源级可达 176 dB[21]。对比图 5 可知，记录到的抛石施工产生的>100 kHz 的噪声的声压级小于 80 dB 且随频率升高而下降，明显小于长江江豚的回声定位信号的声源级。因此可以认为，只有在距离施工点很近的情况下，抛石噪声才有可能掩蔽长江江豚的高频回声定位信号，即抛石噪声对于长江江豚的高频声信号造成掩蔽的可能性较小。

3.2.2 对长江江豚低频声信号的影响

值得注意的是，长江江豚亦会发出 2～3 kHz 的低频声信号。例如，圈养于野外水域以及人工豢养下的长江江豚，在有较多个体一起活动并伴有社交行为时，会发出<15 kHz 的低频声信号[22]；人工豢养的长江江豚在巡游、试图交配和探索水听器等情况下会发出 1.1～2.4 kHz 的低频声信号[23]；人工豢养的新生幼年长江江豚只能发出频率在 2～3 kHz、声压级为 130 dB 左右的低频声信号，在出生约 20 天后才能发出>100 kHz 的高频声信号，但声压级只有约 150 dB；此外，幼豚出生 100 天内，仍不能熟练发出高频声信号，可能仅依赖低频声信号与母亲联系[24-25]。在小于 15 kHz 的频段，抛石噪声声压级较高，均大于 80 dB，而在 1～3 kHz 的频段，抛石噪声均大于 90 dB，有的甚至大于 100 dB (见图 5)，考虑到低频声音传播衰减较慢，影响范围相应较大，因此认为，抛石噪声可能对于长江江豚低频声信号具有较强的掩蔽作用。由于长江江豚的低频声信号多与个体间的交流通讯和情感表达有关[22-23]，因此抛石噪声可能会对长江江豚个体间的交流造成干扰。对于成年长江江豚而言，由于具备独立捕食能力且可以使用不易被掩蔽的高频声信号，因此抛石噪声对其影响较小；然而，对于幼年江豚尤其是刚出生不久的江豚而言，由于不具备独立捕食能力、且只能发出易被掩蔽的低频声信号或不能熟练发出高频声信号(出生不到 100 天)，因此抛石可能造成幼豚与母豚分离，由于低频噪声强度大、影响范围广，且幼豚游泳能力及体力较差，失散后的母子豚较难恢复联络，幼豚易于发生意外。研究野外收集的标本也表明，在不同年龄段，幼年长江江豚的死亡率较高[26]，正说明其生存能力较弱，更容易受到伤害。

综上，抛石噪声对于长江江豚高频声信号的掩蔽作用不明显，对其低频声信号的掩蔽可能性较大。因此可以认为，抛石对于幼年长江江豚造成伤害的可能性大于成年长江江豚。

3.3 抛石噪声对长江江豚听觉的影响

当动物暴露在强度高、持续时间长的噪声环境下，容易引发暂时性听力阈移(Temporary Threshold Shift， TTS) 和 / 或永久性听觉阈移 (Permanent Threshold Shift，PTS)，Popov[27]等研究了噪声引起的人工豢养的长江江豚的 TTS 和噪声暴露后的听觉恢复。结果显示，将长江江豚暴露在强度为 140 dB、频率为 32 kHz 的单频噪声环境中 3 min，会导致其对 45 kHz 的测试信号产生高达 25 dB 的 TTS，且听觉恢复时间需要 18 min；将长江江豚暴露在 150 dB、23 kHz 的单频噪声中 1 min，动物对 32 kHz 的测试信号的听觉阈值上升了 27 dB，恢复时间需要大约 23 min，当暴露时间延长至 3 min 时，其对 32 kHz 的测试信号的听觉阈值提高了 30 dB，恢复时间则超过 100 min。即随着噪音暴露时间的增长，长江江豚在不同频率下的听觉阈值加速提高，恢复时间亦随之延长。

由图 7 可见，本实验中获得的各类抛石噪声的 1/3 倍频程均方根声压级在各频率处均不超过 130 dB，然而，在距抛石施工点更近的水域，其噪声的 1/3 倍频程均方根声压级可能会超过 140 dB，在累积效应的作用下，可能对长江江豚造成 TTS，因此，初步认为抛石在近距离下可能对长江江豚的听觉造成不利影响。

3.4 缓解措施

综上分析，抛石对长江江豚的可能不利影响主要是压缩其栖息地和伤害幼年江豚。从抛石类型来看，抛石的噪声声源级与石块开始落水时和水面的距离呈正相关，而与每次抛石的重量关系不大。由此提出以下缓解措施：

(1) 减少网兜抛石和挖掘机抛石的使用强度，或者将其改良，使得石料开始落水的位置距离水面更近，以降低噪声。

(2) 抛石施工不宜大批量同时作业。应选择在

小范围内小规模作业，以减小对长江江豚的栖息地的压缩。

(3) 施工期应该避开长江江豚的交配高峰期和抚幼关键期(3～9 月份)[28-29]。

(4) 在抛石施工前和施工过程中，应仔细观察附近水域有无江豚活动，特别是有无幼豚活动。如果发现有江豚活动，则应暂缓施工或中止施工，待江豚游出视线范围(约 1 000 m)后再行施工。

3.5 本研究的局限和不足

本研究在整个录音过程中都没有直接发现江豚出现在施工附近水域，因此缺乏江豚对施工操作的实际行为反应观察的直接证据，而仅是在分析了相关抛石噪音的基础上，预测了抛石噪声对江豚的潜在影响；其次对于抛石噪音强度而言，其强度可能与每次的抛石量、抛石高度都有关，因此本研究的结果可能并不能普遍地适用于其它类似方式的抛石作业。此外，声源(抛石的落水点)的位置会发生变动，虽然采样过程中该变动范围很小，约在 2 m 以内，但测量点与声源之间的距离仍然存在一定程度的不确定性。

4 结 论

(1) 抛石水下噪声声源级均大于 151 dB，明显高于环境背景噪声；抛石水下噪声频带较宽，以高强度的中低频为主；能量主要集中在中低频段。

(2) 抛石产生的水下噪声会压缩长江江豚的栖息地；对长江江豚高频声信号造成干扰的可能性较小，对长江江豚的低频声信号可能造成掩蔽，对幼年长江江豚造成伤害的可能性较大；可能引发长江江豚的 TTS。

(3) 通过改良抛石工艺、进行小规模的抛石作业、避开长江江豚的繁殖期和加强施工过程中对长江江豚的观察等措施，可减小抛石作业对长江江豚的不利影响。

致谢：感谢中国科学院水生生物研究所鲸类保护生物学学科组全体老师、同学和工作人员，感谢江苏镇江长江豚类省级自然保护区朱孝锋主任等工作人员的大力支持，感谢中交第一航务工程局有限公司朱成龙安全总监对相关问题的细心解答，感谢深水航道建设工程指挥部的佘俊华处长，及交通运输部规划研究院的韩兆兴博士在工作过程中提供的便利，感谢镇江渔民朱春荣、宗桂兰在野外工作生活中的照顾，感谢湖北大学的叶雷凯和南京师范大学的居康提供的帮助。

参 考 文 献

[1] Ren H, Halvorsen M B, Deng Z D, et al. Aquatic acoustic metrics interface utility for underwater sound monitoring and analysis[J]. Sensors, 2012, **12**(6): 7438-7450.

[2] Pine M K, Jeffs A G, Wang D, et al. The potential for vessel noise to mask biologically important sounds within ecologically significant embayments[J]. Ocean & Coastal Management, 2016, **127**: 63-73.

[3] Popper A N, Hawkins A. The effects of noise on aquatic life [M]. New York: Springer, 2012: 277-280.

[4] Bailey H, Senior B, Simmons D, et al. Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, **60** (2010): 888-897.

[5] Tougaard J, Kyhn L A, Amundin M, et al. Behavioral reactions of harbor porpoise to pile-driving noise, the effects of noise on aquatic life [M]. New York: Springer, 2012: 277-280.

[6] 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]. J. Acoust. Soc. Am., 2015, **138**(2): 942 -952.

[7] 王振太, 李青青, 时文静, 等. 洞庭湖采砂船水下噪声对长江江豚的影响研究[J]. 声学技术, 2014, **33** (S1): 20-25.
WANG Zhentai, LI Qingqing, SHI Wenjing, et al. Impact assessment of underwater noise caused by dredging ships in Dongting Lake on the Yangtze finless porpoise[J]. Technical Acoustics, 2014, **33**(S1): 20-25.

[8] 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** (2): 399-407.
SHI Wenjing, 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** (2): 399-407.

[9] 张天赐, 居涛, 董黎君, 等. 天鹅洲豚类保护区内快艇噪声研究[J]. 声学技术, 2016, **35** (5): 130-135.
ZHANG Tianci, JU Tao, DONG Lijun, et al. Noise from two kinds of fast-speed boats in Tian-E-Zhou oxbow[J]. Technical Acoustics, 2016, **35**(5): 130-135.

[10] Turvey S T, Pitman R L, Taylor B L, et al. First human-caused extinction of a cetacean species?[J]. Biology Letters, 2007, **3**(5): 537-540.

[11] Mei Z G, Zhang X Q, Huang, S L, et al. The Yangtze finless porpoise: On an accelerating path to extinction?[J]. Biological Conservation, 2014, **172**: 117-123.

[12] Zhao X J, Barlow J, Taylor B, et al. Abundance and conservation status of the Yangtze finless porpoise in the Yangtze River, China [J]. Biological Conservation, 2008, **141**(12): 3006-3018.

[13] Mei Z G, Huang S L, Hao Y J, et al. Accelerating population decline of Yangtze finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*)[J]. Biological Conservation, 2012, **153**: 192-200.

[14] 陶亦寿, 谭界雄, 董建军, 等. 中国堤防工程施工丛书 3: 抛石法[M]. 北京: 水利水电出版社, 2006: 2-3.
TAO Yishou, TAN Jiexiong, DONG Jianjun, et al. China embankment construction book series 3: Riprapping[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006: 2-3.

[15] 王克雄, 王丁. 航道整治工程对长江江豚影响及缓解措施分析[J]. 环境影响评价, 2015, **37**(3): 13-17.
WANG Kexiong, WANG Ding. Analysis of impact of waterway adjustment activities on Yangtze finless porpoise and mitigation measures[J]. Environmental Impact Assessment, 2015, **37**(3): 13-17.

[16] Erbe C. Underwater acoustics: noise and the effects on marine mammals a pocket handbook 3rd edition[M]. Brisbane: JASCO

Applied Sciences, 2011: 6.

[17] Dazey E, McIntosh B, Brown S, et al. Assessment of underwater anthropogenic noise associated with construction activities in Bechers Bay, Santa Rosa Island, California[J]. Journal of Environmental Protection, 2012, **3**(10): 1286-1294.

[18] Richardson W J, Greene C R, Malme C I, et al. Marine Mammals and Noise[M]. San Diego: Academic Press, 1995: 205-240.

[19] Popov V V, Supin A Y, Wang D, et al. Evoked-potential audiogram of the Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*)[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2005, **117** (5): 2728-2731.

[20] Li S H, Wang K X, Wang D, et al. Echolocation signals of the free-ranging Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientialis*)[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2005, **117**(5): 3288-3296.

[21] 方亮. 中华白海豚和长江江豚回声定位信号特征研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2015: 53-70.
FANG Liang. Studied on characteristics of echolocation signals of Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) and Yangtze finless porpoises(*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*)[D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2015: 53-70.

[22] 王丁. 长江江豚声信号及其声行为的初步研究. 水生生物学报[J], 1996, **20**(2): 127-133.
WANG Ding. A preliminary study on sound and acoustic behavior of the Yangtze river finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1996, **20** (2): 127-133.

[23] 王克雄, 王丁. 豢养长江江豚声信号特征和功能[C]//中国声学学会 1999 年青年学术会议, 1999.
WANG Kexiong, WANG Ding. Characteristics and functions of sound of the Yangtze finless porpoise in captivity[C]//Conference of the Young Academic Conference of the Acoustical Society of China, 1999.

[24] Li S H, Wang D, Wang K X, et al. The ontogeny of echolocation in a Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) (L)[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2007, **122** (2): 715-718.

[25] Li S H, Wang K X, Wang D, et al. Simultaneous production of low- and high-frequency sounds by neonatal finless porpoises (L)[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2008, **124** (2): 716 – 718.

[26] 杨光, 周开亚, 高安利, 等. 江豚生命表和种群动态的研究[J]. 兽类学报, 1998, **18** (1) : 1-7.
YANG Guang, ZHOU Kaiya, GAO Anli, et al. A study on the life table and dynamics of three finless porpoise populations in the Chinese waters[J]. Acta Theriologica Sinica, 1998, **18**(1): 1-7.

[27] Popov V V, Supin A Y, Wang D, et al. Noise-induced temporary threshold shift and recovery in Yangtze finless porpoises *Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2011, **130**(1): 574-584.

[28] 陈佩薰, 刘仁俊, 王丁, 等. 白鱀豚生物学及饲养与保护[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 231-232.
CHEN Peixun, LIU Renjun, WANG Ding et al. The biology of Baiji and its breeding and conservation[M]. Beijing: Science Press, 1997: 231-232.

[29] 郝玉江, 王丁, 张先锋. 长江江豚繁殖生物学概述[J]. 兽类学报, 1996, **26** (2): 191-200.
HAO Yujiang, WANG Ding, ZHANG Xianfeng. Review on breeding biology of Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*)[J]. Acta Theriologica Sinica, 1996, **26**(2): 191-200.