

中华白海豚和东亚窄脊江豚回声定位 信号分析与比较^{*}

王月云¹ 王先艳² 徐晓辉^{3,4} 宋忠长^{3,4} 杨武夷^{3,4} 张 宇^{3,4†}

(1 集美大学诚毅学院 厦门 361003)

(2 自然资源部第三海洋研究所 厦门 361000)

(3 厦门大学 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门 361000)

(4 厦门大学 海洋与地球学院 厦门 361000)

2020 年 3 月 16 日收到

2020 年 6 月 30 日定稿

摘要 为了增进珍稀齿鲸物种的了解和保护,对中华白海豚 (*Sousa chinensis*) 和东亚窄脊江豚 (*Neophocaena asiaeorientalis sunmeri*) 的回声定位信号特性进行了分析和比较。通过船只观测与声学监听的方式对厦门海域中华白海豚和东亚窄脊江豚的回声定位信号进行了调查,并对其声学参数进行了统计和对比。结果表明:中华白海豚回声定位信号具有持续时间短、高频、宽频带的特征;相较而言,东亚窄脊江豚则呈现时长较长、高频、窄频带的特点;声学参数统计上,两者在持续时间、中心频率、-10 dB 带宽等指标上具有明显的差异性。

PACS 数: 43.80

Analysis of echolocation from Indo-Pacific humpback dolphin (*Sousa chinensis*) and finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis sunmeri*)

WANG Yueyun¹ WANG Xianyan² XU Xiaohui^{3,4} SONG Zhongchang^{3,4} YANG Wuyi^{3,4} ZHANG Yu^{3,4}

(1 Chengyi University College, Jimei University Xiamen 361003)

(2 Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources China Xiamen 361000)

(3 Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology Ministry of Education, Xiamen University Xiamen 361000)

(4 College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University Xiamen 361000)

Received Mar. 16, 2020

Revised Jun. 30, 2020

Abstract To gain a deeper understanding on odontocetes click and develop smart protection strategy for endangered species, clicks of Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) and finless porpoises (*Neophocaena asiaeorientalis sunmeri*) were recorded and analyzed. Passive acoustic monitoring was used to record the clicks emitted by Indo-Pacific humpback dolphins and finless porpoises during boat-based field surveys in the Xiamen waters. Subsequent analysis shows: clicks emitted by Indo-Pacific humpback dolphins are characterized by short duration, high frequency, and broadband bandwidth. Comparatively, finless porpoise' clicks have a relatively longer duration, higher peak frequency, and narrower bandwidth. Duration, centroid frequency and -10 dB bandwidth of clicks are significantly different between the two species.

^{*} 国家重点研发计划项目(2018YFC1407505, 2018YFC1407504)、厦门市海洋与渔业发展专项项目(20CZB015HJ01)、福建省教育厅中青年教育科研项目(JT180873)、国家自然科学基金面上项目(12074323)和广东省水利科技创新项目(2020-16)资助

[†] 通讯作者: 张宇, yuzhang@xmu.edu.cn

引言

栖息于近岸的鲸豚物种中, 齿鲸会发射高分贝超声脉冲信号, 即回声定位信号 (Click), 进行定位、导航和猎食^[1]。经过长期演化, 不同的齿鲸物种在不同区域环境、不同行为特征条件下发出的 Click 信号具有不同的声学特征^[1]。利用该特性, 研究人员可通过对齿鲸声信号的监听评估齿鲸状态, 如出没、行为方式、种群分布、数量变化等。与传统评估方法相比, 无源声学监听 (PAM) 具有低成本、全时段、全气候条件等优点, 被认为是一种具有应用前景的齿鲸监测技术^[2-4]。厦门周边海域存在有多种齿鲸种类, 如中华白海豚 (*Sousa chinensis*)、东亚窄脊江豚 (*Neophocaena asiaeorientalis sunameri*)。中华白海豚, 又称印太洋驼背豚 (Indo-Pacific humpback dolphin), 为我国国家一级保护鲸豚类动物和国际自然保护联盟清单近危物种^[5]; 而东亚窄脊江豚, 隶属于江豚属 (*Neophocaena*), 也是一类珍稀小型水生哺乳动物 (国家二级保护动物)^[6]。对该两齿鲸物种 Click 信号特征的分析 and 比较可为 PAM 技术的应用提供基础。

近年来中华白海豚 Click 信号特征的相关研究获得了越来越多学者的关注。2004 年, Goold 等在香港大屿山岛附近海域记录了一群中华白海豚 (10 头) 的 Click 信号, 并对其时、频域特征进行定性分析^[7]。Sims 等于 2011 年统计分析了香港西部海域中华白海豚 Click 信号的时间间隔特性: 具有恒定和可变两种模式^[8]。2013 年, Li 等对北部湾搁浅的中华白海豚进行了圈养状态下 Click 信号的测量^[9]。2017 年, Fang 等用一个九单元的水听器十字阵列对广西三娘湾区域中华白海豚进行了主轴 Click 信号声学特征与声波束特性的测定, 揭示其利用声信号进行聚焦定位的现象^[10]。

在东亚窄脊江豚声信号研究方面, Kamminga 等 (1986 年) 记录了日本海域四头东亚窄脊江豚的声信号, 并对其时、频域特征进行了统计和分析^[11]。1997 年, Nakahara 等对一头东亚窄脊江豚 Click 信号的目标识别能力进行了初步测量^[12]。2007 年, Li 等用一套带宽为 145 kHz 的水听器测试系统, 对辽东湾内东亚窄脊江豚的 Click 信号进行测量和分析, 并与长江江豚的信号进行了比较^[13]。2017 年, Song 等于台湾海峡西侧海域应用一套单水听器测试系统 (200 kHz 宽带) 记录了东亚窄脊江豚的 Click 信号, 并对其信号特征进行了统计和讨论^[14]。

综合以上, 在中华白海豚和东亚窄脊江豚 Click

信号研究工作中, 其声信号来源于不同的区域和时期, 或者是应用不同的测量方法和数据处理方式等, 从而限制了两个物种 Click 信号声学参数的直接对比。本文应用同一套测试系统记录到了同一时期, 同一区域 (厦门海域) 中华白海豚与东亚窄脊江豚的 Click 信号, 并对其声学参数进行了统计和比较。

1 研究对象及方法

1.1 实验对象与数据采集

2016 年 5 月 15 至 17 日期间, 研究人员对厦门湾及其周边海域进行鲸豚活动的现场船只调查。调查海域以砂质底质为主, 水深在 4~20 m 之间。调查期间, 天气晴朗、海况 2~3 级, 船只以 13 km/h 至 15 km/h 的速度航行。调查人员站于离水面 3 m 左右的甲板上, 通过肉眼或双目望远镜对附近海面进行观察。一旦发现鲸豚物种, 立即对动物的活动进行跟踪, 并记录其数量、群体结构、外形特征、行为活动。为防止惊扰游动中的鲸豚, 调查船和动物的距离保持在 50 m 左右。待其活动状态相对稳定时, 关闭调查船发动机, 迅速布置好实验仪器进行声信号采集 (水听器置于水下 1.5 m 深度), 并记录相应的时间与位置。

水声信号的采集是由一套单水听器单元的水声测量系统完成 (如图 1 所示)。该系统以某公司 8103 水听器 (灵敏度: $-194.7 \text{ dB} \pm 8 \text{ dB re } 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$, 带宽: 1~200 kHz) 为传感器 (经水声计量站校准), 后接前置放大器进行前端的滤波 (高通滤波, 截止频率为 5 kHz) 和放大 (根据现场情况, 设置在 20~30 dB 档位之间); 然后通过某公司数据采集卡 (16 位, 440 kHz 采样率) 完成模数转换, 最后由笔记本电脑上的测试程序进行终端的信号实时显示与储存。

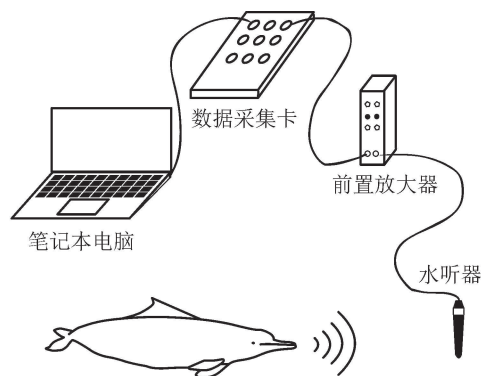


图 1 水声信号测量系统示意图

1.2 数据分析方法

首先, 应用某音频处理软件进行数据的初步筛选: 对每一条 Click 序列 (或称 Click 脉冲串) 的时、

频域特征进行查看，初选出其中具有高信噪比的声信号。之后利用自行编写的数据处理程序来完成信号处理和分析：首先对导入的声信号进行水听器灵敏度曲线校正；并应用巴特沃斯高通滤波函数（截止频率为 10 kHz）进行数字滤波，消除海浪或者其它低频背景噪声的影响。然后应用一个 200 μs （可调）的时间窗口检测所载入的序列信号，以逐个提取所在序列内的单 Click 信号。

由于声波在近海海洋环境中传播具有明显的多途效应，因此记录的 Click 信号中经常叠加有海面或者海底的反射信号。另外，齿鲸 Click 信号具有指向性：相比于主轴方向的声信号，偏离主轴的信号在时、频域都呈现一定程度的变形，会干扰声学参数的比较和分析。综合以上两点，有必要对以上粗选的 Click 信号进行筛选，具体标准为：（1）高信噪比，即通过设定信噪比阈值（5 dB）进行信号选择；（2）单 Click 波形信号，即剔除由于多途效应或者多头齿鲸同时发声引起的叠加信号；（3）Click 信号时域波形具有平滑的包络，且时域波形特征与两种齿鲸物种公开文献特征基本相符，无明显扭曲或变形；（4）Click 信号频域特征与公开文献基本相符，无明显扭曲或变形。因此，所挑选出的 Click 信号为信噪比高，且时、频域包络光滑的直达声信号（不全是主轴信号）。

通过以上办法，从 48 段中华白海豚 Click 序列信号中选出 156 个 Click 信号；从 39 段东亚窄脊江豚 Click 序列信号中选出 264 个 Click 信号。以上被遴选出的信号打包导入声学参数分析程序中进行进一步的处理和计算，其中涉及的声学参数^[10]包括信

号持续时间（ ∇t ，单 Click 波形积累能量流密度占比从 2.5% 到 97.5% 过程所持续的时间长度）、中心频率 f_c （频谱中算术平均能量值最大处的频率）、峰值频率 f_p （频谱中能量值最大处的频率）、-3 dB 带宽（幅值等于频谱最大值 -3 dB 时对应的频带宽度）、-10 dB 带宽（幅值等于频谱最大值 -10 dB 时对应的频带宽度）。其中， ∇t 计算中是以时间为变量，计算 Click 波形累积能量随时间变化的趋势：累积能量为 2.5% 与 97.5% 的两个时间点之间的差值即为信号持续时间。频域分析使用快速傅里叶变换函数：窗函数采用汉宁窗，点数设置为 256 点。最后对以上参数计算所得结果导入数据分析软件中，进行统计分析。

2 结果与讨论

在两天的现场船只调查中，研究人员于 2016 年 5 月 16 日成功地在同一海域发现了中华白海豚和东亚窄脊江豚，其具体信息如表 1 所示。另外，在整个观测和声信号采集过程中，调查者在研究区域内未发现其它齿鲸物种出现，可以排除其它种类齿鲸声信号干扰的可能。

图 2 为典型中华白海豚单个 Click 信号的波形图和频谱图：波形图上看中华白海豚声信号的特征为短脉冲，先快速的上升，之后逐步衰减；频谱特征为宽频带，且分布不对称：以峰值频率为界，低频部分的能量占比更大，高频部分则显示出快速下降的趋势。相对而言，东亚窄脊江豚 Click 信号（如图 3）持续时间较长，波形呈缓慢上升趋势，之后再对称的缓慢衰减；时域波形包络光滑，且包络之下有清晰的

表 1 现场调查信息

齿鲸物种	GPS 位置	时间	种群特征	行为特征
中华白海豚	东经 118.006391°，北纬 24.422426°	9:26AM—11:38AM	三头成年个体	捕食行为，时而分散时而聚集
东亚窄脊江豚	东经 118.162870°，北纬 24.368754°	1:27PM—3:19PM	单头成年个体	无法定义具体行为

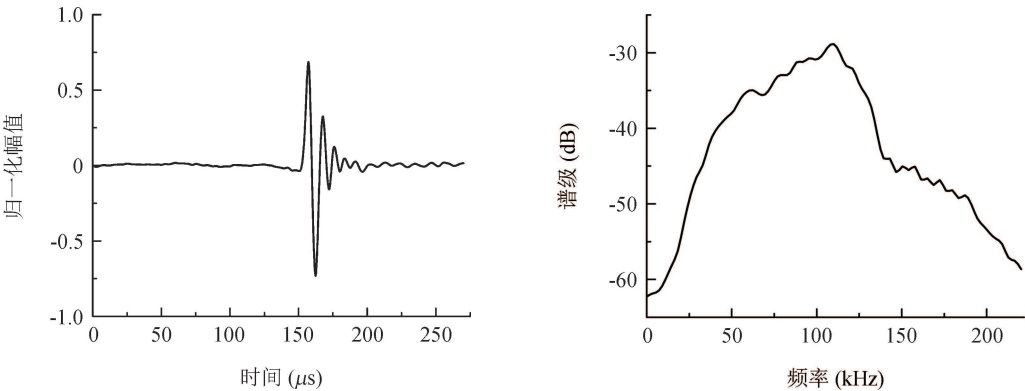


图 2 典型中华白海豚 Click 信号的波形图和频谱图

正弦调制波形,即具有类 Gabor 波形特征。其频谱大体以峰值频率为轴成对称分布;频谱特征为高频、窄频带、单峰对称分布。

如图 4,为中华白海豚和东亚窄脊江豚 Click 序列信号的时频图:两物种序列信号内均呈现单 Click 不断重复、时频域特征基本稳定的特点。另外,一般情况下,Click 序列信号中都存在大量的海底或者海面的多途声信号;因此,在其时频图上信号的持续时间或者频谱特性会发生相应的改变,如持续时间延长或者频带展宽等方面特点(如图 4)。

为对两种齿鲸的声信号参数进行量化比较,进行了如下统计分析:(1)分别对所摘选的两齿鲸物种声学参数样本进行平均值以及标准偏差的计算和对比,并给出两组数据的 p 值以判断统计差异度;(2)统计两齿鲸物种声信号参数样本在区间范围内的分布情况,通过制图直观分析两者数据分布差异性。具体情况如表 2 以及图 5—图 8。

2.1 声信号统计结果

对比两种齿鲸物种表 2 的统计结果,可看出:时域上看,中华白海豚 Click 持续时间的均值 ($28.43\ \mu\text{s}$)

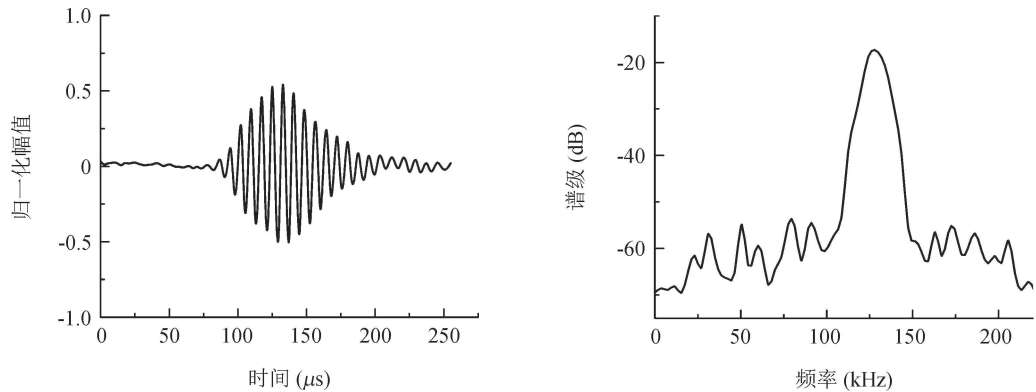


图 3 典型东亚窄脊江豚 Click 信号的波形图和频谱图

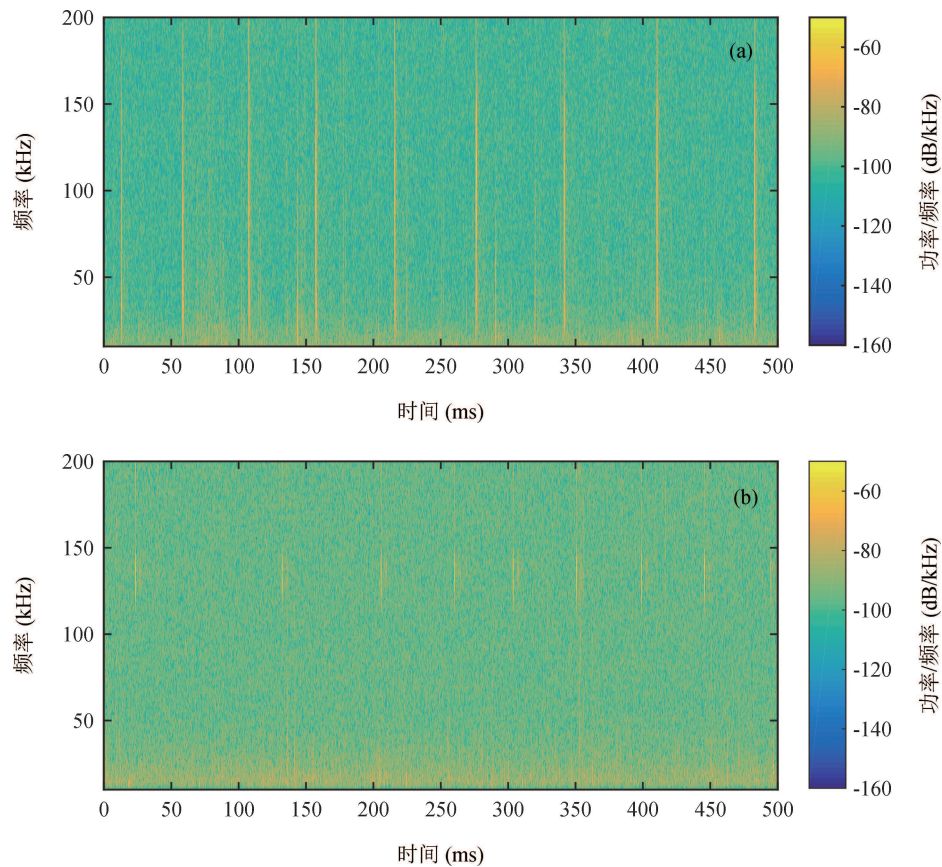


图 4 中华白海豚 (a) 与东亚窄脊江豚 (b) Click 序列信号的时频图

小于东亚窄脊江豚 (82.32 μs); 从该参数统计分布图 (如图 5) 可以看出, 中华白海豚 Click 信号的持续时间均小于 50 μs , 而东亚窄脊江豚则 98.12% 以上信号的持续时间则大于 50 μs ; 两组数据的 p 值小于 0.01, 表明两物种该参数上具有显著差异性。相应地, 在频谱宽度上, 则中华白海豚的 -3 dB 带宽、 -10 dB 带宽均值均是东亚窄脊江豚的 2 倍以上。以 -10 dB 带宽为例, 中华白海豚的均值 (100.16 kHz) 是东亚窄脊江豚 (26.98 kHz) 的 3.71 倍, 且分布范围 (中华白海豚: 60.76 ~ 158.09 kHz , 江豚: 15.40 ~ 37.40 kHz) 是完全错开的 (如图 6), 是一个良好的声学监听鉴别

指标。

另外, 两种齿鲸 Click 信号的峰值频率分布特征不同 (如图 7)。中华白海豚 f_p 为宽频带分布的特点: 53.6% 分布于 110 kHz 附近, 40.13% 分布于 70 kHz 附近, 分布范围和标准差范围相对较大。东亚窄脊江豚的 f_p 则主要分布 130 kHz 以上 (占比 94.38%), 分布范围和标准差范围较小。同样, 以上特性反应在中心频率上则是 (如图 8): 中华白海豚 f_c (均值为 89.78 kHz) 在频带范围内呈宽分布特征, 而东亚窄脊江豚的 f_c (均值为 136.11 kHz) 则主要集中在相对高频部分, 两者分布范围内无重叠现象。

表 2 Click 信号声学参数统计结果

声学参数	中华白海豚 $n=156$		东亚窄脊江豚 $n=264$		p 值
	平均值 $\pm$ 误差	范围	平均值 $\pm$ 误差	范围	
持续时间 ∇t (μs)	28.43 ± 6.23	15.27 ~ 47.78	82.32 ± 18.22	46.86 ~ 134.96	<0.01
峰值频率 f_p (kHz)	91.32 ± 17.64	42.43 ~ 135.04	136.37 ± 4.54	127.29 ~ 143.84	<0.01
中心频率 f_c (kHz)	89.78 ± 10.58	55.83 ~ 124.26	136.11 ± 3.38	127.68 ~ 149.60	<0.01
-3 dB 带宽 (kHz)	40.63 ± 10.17	19.20 ~ 81.44	15.07 ± 4.77	7.79 ~ 24.52	<0.01
-10 dB 带宽 (kHz)	100.16 ± 22.10	60.76 ~ 158.09	26.98 ± 6.84	15.40 ~ 37.40	<0.01

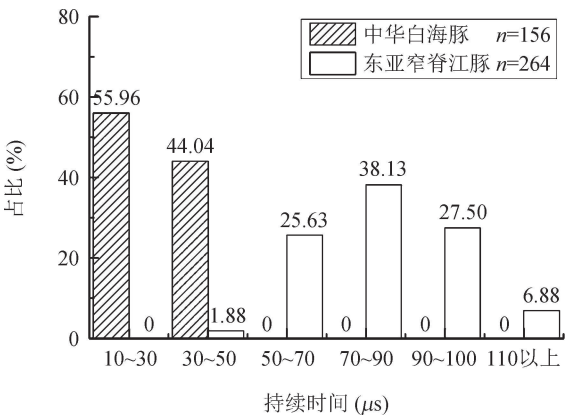


图 5 持续时间 ∇t 统计分布图

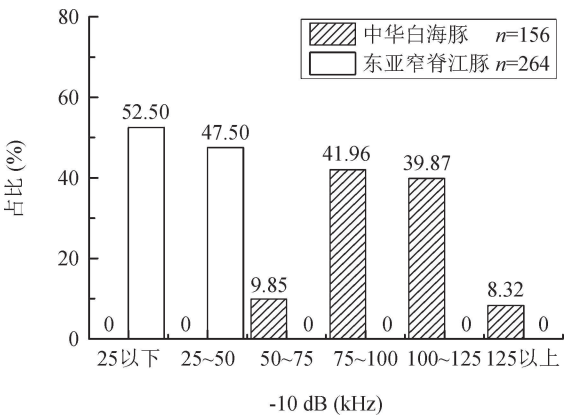


图 6 -10 dB 带宽统计分布图

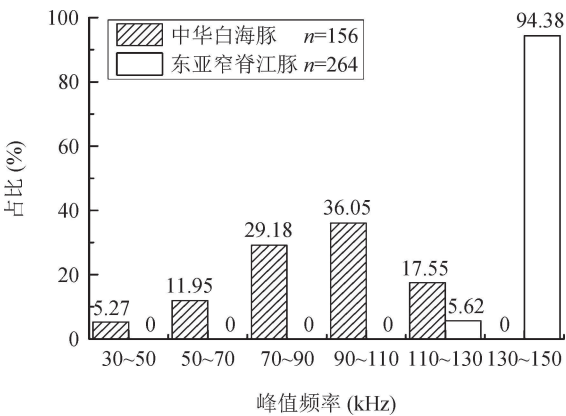


图 7 峰值频率 f_p 统计分布图

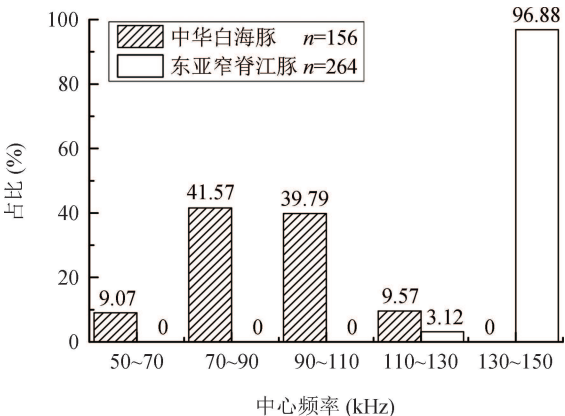


图 8 中心频率 f_c 统计分布图

2.2 相关讨论

综合以上各个声学参数对比情况, 在应用 PAM 技术时可考虑从以下方面进行两种齿鲸 Click 信号的自动判断和识别: (1) 信号的时域波形特征: 波形是否具有类 Gabor 波形特性, 即波形包络是否类高斯对称分布, 且单周期内是否含有多个正弦调制信号。(2) 持续时间 ∇t : 以 $50\ \mu\text{s}$ 为阈值, 中华白海豚 Click 信号持续时间均小于该值, 而东亚窄脊江豚则 98% 以上大于 $50\ \mu\text{s}$ 。(3) 中心频率 f_c : 两者的数值区间无交叉重叠; 从统计区间上看, 东亚窄脊江豚 Click 信号中心频率大于 $110\ \text{kHz}$ 占比为 96.88%, 而中华白海豚 Click 信号中心频率 90.43% 比例小于该值。(4) $-10\ \text{dB}$ 带宽: 以 $50\ \text{kHz}$ 为判断阈值, 两种齿鲸 Click 信号的 $-10\ \text{dB}$ 带宽统计值无任何重叠。

在 PAM 应用中, 单水听器测量系统具有低成本、简单易用等优点。而其天然局限性是无法快速有效的进行主轴声信号的选取。即使通过一定的选择标准 (如前文所述), 所摘选出来的声信号也难免会存在一定比例的非主轴信号。非主轴声信号会延长 Click 信号的持续时间, 改变或展宽信号时、频谱特征^[1,15]。如此, 会造成声信号参数统计结果 (特别是中华白海豚) 与公开文献 10 中严格的主轴信号声参数结果存在一定的差异性。另外, 齿鲸个体的差异或其生存环境的变化 (Click 信号具有自适应调节特性) 等也可能会引起声学参数的差异^[16]。

东亚窄脊江豚 Click 信号特点为宽发射角; 相对而言, 中华白海豚的信号具有窄发射角的特性。两物种头部生理结构的不同可能是造成以上差异的原因。相比中华白海豚, 东亚窄脊江豚的头部较小, 且上颌骨长度短。由于齿鲸指向性波束形成的主要机制是头部内上颌骨、气囊以及额隆等生理结构的联合调控^[17], 东亚窄脊江豚生理结构尺寸短小的特点使其声呐系统所发射出的声信号波束角相对更大^[18-19]。

比较表 2 两种齿鲸各参数统计结果, 可发现在单水听器测量条件下, 中华白海豚的声学参数表现出更大的标准偏差。相比于东亚窄脊江豚, 中华白海豚 Click 信号具有更强的波束指向性^[10]; 因此, 在单水听器接收声信号时 (无法有效遴选主轴信号), 容易造成所探测的声信号结果标准偏差变大; 而东亚窄脊江豚的 Click 信号声波束角较大, 可在更大角度范围内接收到主轴声信号, 反应在声参数统计上则离散程度更小。

单水听器 PAM 测量系统中, 在直达声信号、海底第一次反射声信号、海面第一次反射声信号波形清

晰分离的条件下, 可利用其传播时间差异进行发声齿鲸 Click 信号声源级参数的估算^[20]。由于实验过程中没有收集到足够多符合以上标准的声信号样本, 因此在声参数统计中未进行声源级的计算和比较。造成此结果的可能原因有: (1) 进行如上声源级计算要求海底比较平坦且是具有高反射率 (岩石或者砂质底质)。调查海域为九龙江的入海口, 部分区域可能存在泥土沉积的现象。泥质底质声反射率相对较低, 会减弱海底反射声信号的幅值; (2) 信号监测过程中, 海面的起伏 (受现场海风干扰), 会影响声信号海面反射的过程; (3) 东亚窄脊江豚的 Click 信号持续时间相对较长, 更容易引起多途信号的叠加。根据公开文献结果, 中华白海豚的声源级为 $187.7 \pm 5.1\ \text{dB re } 1\ \mu\text{Pa}$ (范围: $177.1 \sim 207.3\ \text{dB re } 1\ \mu\text{Pa}$)^[10]; 而东亚窄脊江豚的声源级参数目前尚未见到公开报道。如果以同属的长江江豚 (*N. a. asiaorientalis*) 声源级参数: $180 \pm 4\ \text{dB re } 1\ \mu\text{Pa}$ (范围: $167 \sim 192\ \text{dB re } 1\ \mu\text{Pa}$)^[21] 为参考, 则两者的声源级参数均值较为接近, 且分布区间存在重叠现象。另外, 齿鲸具有根据环境或者探测任务的不同动态调整声源级参数的特征^[1]。综合以上, 声源级参数可能不是一个合适的 PAM 判别指标。

由于近海海洋环境的复杂以及海豚运动状态的多变, 水听器记录的 Click 声信号大部分存在较为明显的变形、延展或者反射信号叠加直达信号等情况。如图 9 和图 10 分别为中华白海豚和东亚窄脊江豚在多途效应下 Click 信号的波形图及相应的频谱图。

从图 9 和图 10 中可以看出, 多途信号的叠加会大大延长两种齿鲸 Click 信号的持续时间; 且频谱中会出现更多低频成分, 频谱分布也发生了形变。以上影响无疑会大大扭曲原有的信号特征, 从而干扰 PAM 的应用。所以, 在实际应用 PAM 时, 需进一步考虑如何甄别或者消除多途信号的影响。

3 结论

栖息于我国沿海的中华白海豚与东亚窄脊江豚为濒危齿鲸物种, 且二者有混群现象。为促进物种的了解和保护, 对该两种齿鲸 Click 信号特征的统计和分析是一定应用价值的基础性工作。前人的相关工作时常受限于其声信号来源于不同的区域和时期, 或者是不同的测量方法和数据处理方式等, 无法进行直接对比。本文用同一套测试系统记录到了同一时期, 同一区域 (厦门海域) 中华白海豚与东亚窄脊江豚的 Click 信号, 并对其进行了统计和比较: 中华白海豚 Click 信号具有持续时间短、高频、宽频带的

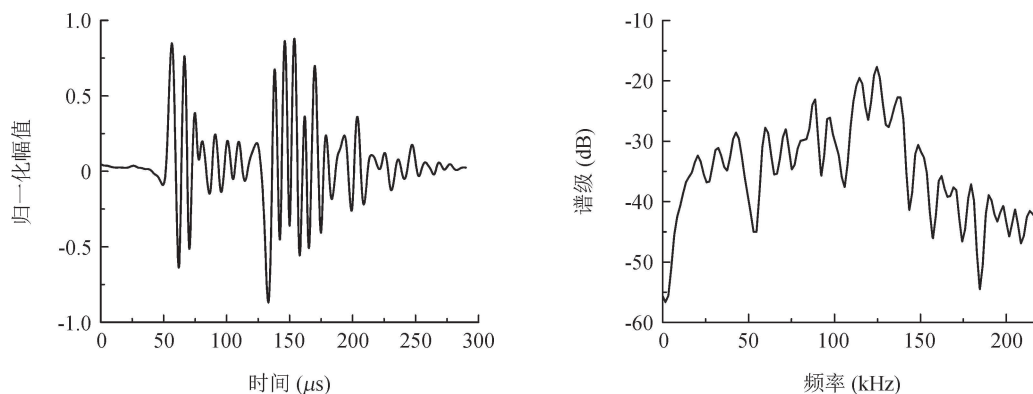


图 9 中华白海豚多途 Click 信号的波形图及频谱图

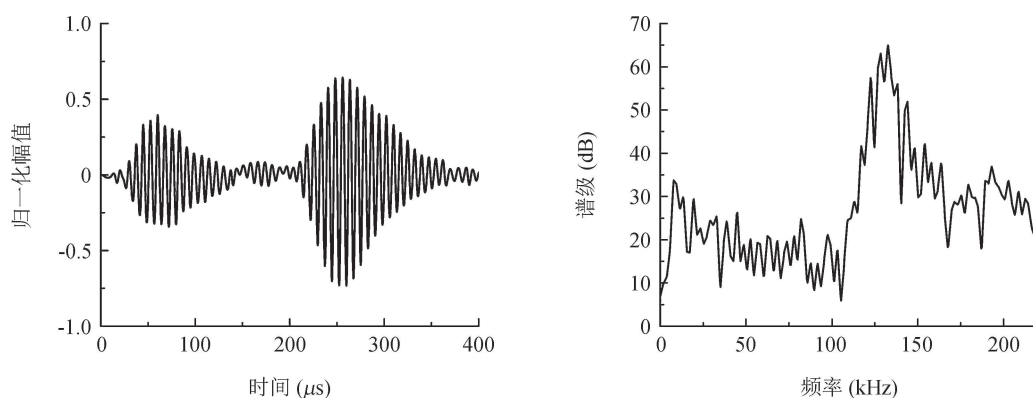


图 10 东亚窄脊江豚多途 Click 信号的波形图及频谱图

特征; 而东亚窄脊江豚则呈现较长时长、高频、窄频带的特点; 声学参数统计上, 两者在持续时间、中心频率、-10 dB 带宽等指标上具有显著差异性。

参 考 文 献

- 1 Au W W L. The sonar of dolphins. New York: Springer-Verlag, 1993: 120—135
- 2 Mellinger D K, Stafford K M, Moore S E. An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*, 2007; **20**(4): 36—45
- 3 Zimmer W M X. Passive acoustic monitoring of cetaceans. London: Cambridge University Press, 2011
- 4 杨武夷, 孙馨喆, 宋忠长, 张宇, 杨燕明. 宽吻海豚 Click 信号的视频滤波检测方法. *声学学报*, 2017; **42**(4): 445—450
- 5 Li S H. Humpback dolphins at risk of extinction. *Science*, 2020; **367**(6484): 1313—1314
- 6 Jefferson T A, Hung S, Law L *et al.* Distribution and abundance of finless porpoises in Hong Kong and adjacent waters of China. *Raffles Bulletin of Zoology*, 2002(Suppl. 10): 43—55
- 7 Goold J C, Jefferson T A. A note on clicks recorded from free-ranging Indo-Pacific humpback dolphins, *Sousa chinensis*. *Aquatic Mammals*, 2004; **30**(1): 175—178
- 8 Sims P Q, Vaughn R, Hung S K *et al.* Sounds of Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) in West Hong Kong: A preliminary description. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2011; **131**(1): EL48—EL54
- 9 Li S H, Wang D, Wang K X *et al.* Possible age-related hearing loss and corresponding change in echolocation parameters in a stranded Indo-Pacific humpback dolphin. *The Journal of Experimental Biology*, 2013; **216**(22): 4144—4153
- 10 Fang L, Wu Y P, Wang K X *et al.* The echolocation transmission beam of free-ranging Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*). *Journal of the Acoustical Society of America*, 2017; **142**(2): 771—779
- 11 Kamminga C, Kataoka T, Engelsma F J. Investigations on cetacean sonar vii. Underwater sounds of neophocaena phocaenoides of the Japanese coastal population. *Aquatic Mammals*, 1986; **12**(2): 52—60
- 12 Nakahara F, Takemura A, Koido T *et al.* Target discrimination by an echolocating finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides*). *Marine Mammal Science*, 1997; **13**(4): 639—649
- 13 Li S H, Wang D, Wang K X *et al.* Echolocation click sounds from wild inshore finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides sunameri*) with comparisons to the sonar of riverine *N. p. asiatorientalis*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2007; **121**(6): 3938—3946

- 14 Song Z C, Zhang Y, Wang X Y *et al.* Vocalizations of a wild finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis sunmeri*) in the western coast of the Taiwan Strait, China. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2017; **11**(1): 45—52
- 15 Au W W L, Kastelein R A, Rippe T *et al.* Transmission beam pattern and echolocation signals of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*). *Journal of the Acoustical Society of America*, 1999; **106**(6): 3699—3705
- 16 Au W W L, Carder D A, Penner R T *et al.* Demonstration of adaptation in beluga whale echolocation signals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1985; **77**(2): 726—730
- 17 Wei C, Au W W L, Song Z *et al.* The role of various structures in the head on the formation of the biosonar beam of the baiji (*Lipotes vexillifer*). *Journal of the Acoustical Society of America*, 2016; **139**(2): 875—880
- 18 Zhang Y, Song Z C, Wang X Y *et al.* Directional acoustic wave manipulation by a porpoise via multiphase forehead structure. *Physical Review Applied*, 2017; **8**(6): 064002(1)—064002(9)
- 19 Song Z C, Zhang Y, Wang X Y *et al.* A simulation of temperature influence on echolocation click beams of the Indo-Pacific humpback dolphin (*Sousa chinensis*). *Journal of the Acoustical Society of America*, 2017; **142**(4): EL381—EL387
- 20 Aubauer R, Lammers M O, Au W W L. One-hydrophone method of estimating distance and depth of phonating dolphins in shallow water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2000; **107** (5): 2744—2749
- 21 Fang L, Wang D, Li Y T, Cheng Z L *et al.* The source parameters of echolocation clicks from captive and free-ranging Yangtze finless porpoises (*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*). *PLoS ONE*, 2015; **10**(6): e0129143