

江豚声学行为的观察与水下声信号的初步研究*

张思照 宋政修 齐孟鸢

(中国科学院海洋研究所)

江豚 (*Neophocaena phocaenoides* G. Cuvier) 俗称江猪, 属鲸目 (Cetacea), 齿鲸亚目 (Odontoceti), 鼠海豚科, 是海豚类中最小型的一种, 也是我国沿海最常见的一种近岸小型无鳍鼠海豚。一般体长不超过 2 米, 体重约 30—80 公斤^[1], 如图 1 照片所示。



图 1 江豚

江豚与其他海洋哺乳动物一样, 能发出多变的声信号, 而且每一种声信号都受其生态行为的支配。发声系统是它们赖以生存的重要官能。海豚用其发射的声信号测定水下目标的距离、方位和大小, 以至判断其形状, 因而能有效的绕过障碍, 避开或驱逐来犯之敌。依靠其声信号能更有效的捕获足够的食物, 营养自身, 抚育后代。声信号是海洋哺乳类动物在自然界进行生存斗争的有利武器。声信号又是海洋哺乳动物的语言, 借以进行“社会”联络和通讯, 甚至教育它们的后代。为此, 人们把它们的这种功能称作“第六官能” (sixth sense)。

观察海兽类的声学行为, 测试分析其声信号的结构和物理特性, 是揭示它们的回声定位系统的机制, 破译其“语言”奥密所必不可少的一步。从而将为驯养它们成为人类的水下得力“助手”提供可靠的实验方案, 也将为仿生学等新的学科研究提供有效的理论依据。

本实验是为了把江豚驯养成“水下警犬”, 使其在海湾、河口进行人工放养鱼群的放

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 819 号。

参加实验工作的还有许兰英、徐如彦同志。本文得到钱正绪、滕怀德同志的帮助, 谨此致谢。

收稿日期: 1982 年 2 月 1 日。

牧,以及协助人类进行水下作业等目的而进行的基础工作,也是研究海洋哺乳动物回声定位的发射与接收机制的探索。实验工作是在一定的半自然条件下,对江豚某些生态行为下的声信号作了较详细的记录与分析。

一、实验条件与仪器

本实验是于1981年3月16日至28日,在上海崇明陈镇地区进行的,正值该地区江豚盛多季节。为了使实验更接近于自然条件,并避免活标本运输上的麻烦,实验选择在离江豚捕获地点不远的海岸河塘里进行。河塘平均宽度5米左右,长约1000米,平均水深1.5米,水质比较混浊。河床底部较平坦,底质为泥沙,两岸壁陡峭,岸上有便于观察、行走的小路,是一个较理想的实验观测场地。由于离捕获地区较近,活标本未经长途运输,所以江豚能很快适应新的生活条件,生态处于正常。

实验是对三头成体江豚,分别在个体和成对两种情况下,结合生态行为的观察,进行水下声信号的记录。

现场观测记录系统,如图2所示。水听器放置于河的中央水深1米处,自然成为江豚游动中的障碍物。水听器为GS-1型(中国科学院声学研究所制),20赫—46千赫之间的灵敏度为-179分贝(0分贝=1伏/微帕),水平方向无指向性。电压放大采用丹麦产2203精密声级计。日本产GF-555型录音机作为终端记录,录音机的频率响应在45赫—10千赫平直。

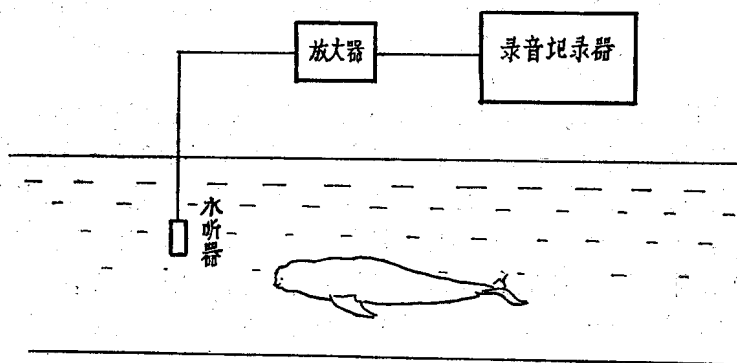


图2 实验记录系统示意图

二、江豚的声信号及其特性

对现场记录的大量磁带资料,用7030 ADC型KAY声图仪、7T08型信号处理器进行了上百个取样分析,对江豚各种行为下的声信号波形作了较详细的观察研究。在我们特定的实验环境条件下,以及观测系统的有效记录范围内(频率45赫—10千赫),江豚的声信号波形主要有以下几种。

1. 脉冲声

为叙述方便起见,文中把 6—10 千赫范围的信号,称为“高频调制脉冲”,1—3 千赫范围的称为“低频调制脉冲”;这仅是对实测资料的一种划分。

(1) 低频调制脉冲(以下称低频脉冲) 低频脉冲的宽度在 4—10 毫秒之间,脉冲间隔在 20 毫秒到 100 毫秒的范围内变化,超过 100 毫秒的情况也偶有出现。能量主要集中在 1—2 千赫。图 3、图 4 是单个脉冲波形及其频谱图。图 5 是连续三个脉冲及其平均频谱图。这种脉冲平均谱中往往有几个峰值出现。从 KAY 声图仪获得的频谱图(图 6)上也可看到脉冲能量的分布情况。

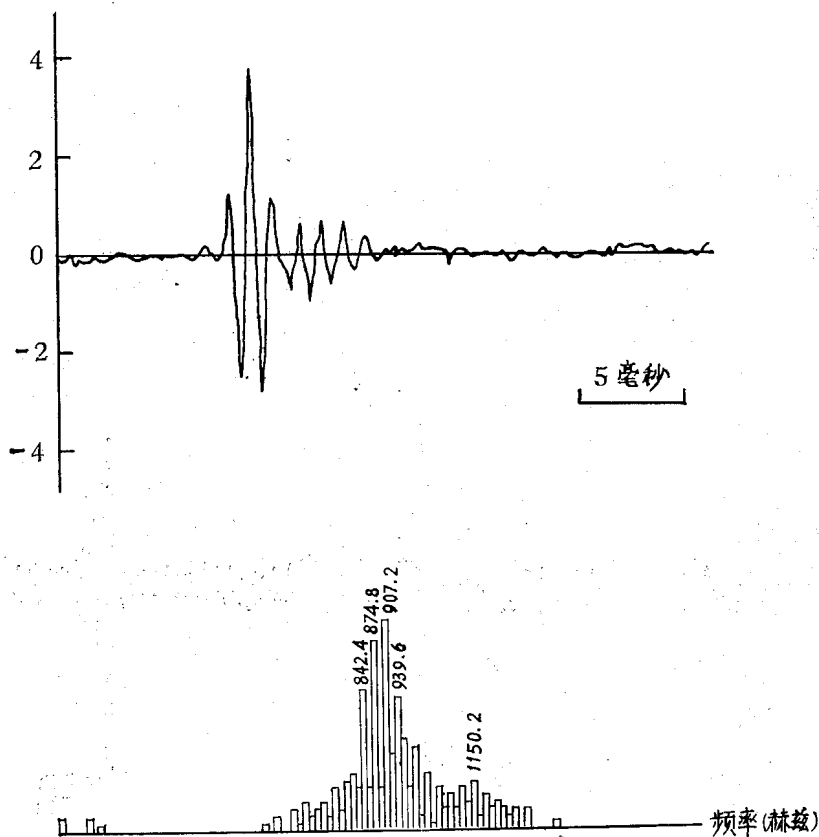


图 3 单个低频调制脉冲及其频谱图

(2) 高频调制脉冲(以下称高频脉冲) 高频脉冲宽度一般在 1—2 毫秒,脉冲间隔在 20 毫秒左右。图 7 是一个脉冲的波形及其频谱图。这种高频脉冲信号经常与其他声信号同时存在。图 8 是高频脉冲与低频脉冲同时存在的波形与频谱图。高频脉冲的幅度较低频脉冲小三到五倍,其能量主要集中在 6—8 千赫。

(3) 爆破型脉冲 脉冲间隔与低频脉冲相同,有较大的变化范围;但脉冲宽度较窄,一般在 1.5—4 毫秒。频谱较宽,增加了低频分量。图 9 和图 10 分别是单个和几个脉冲的波形与频谱图。

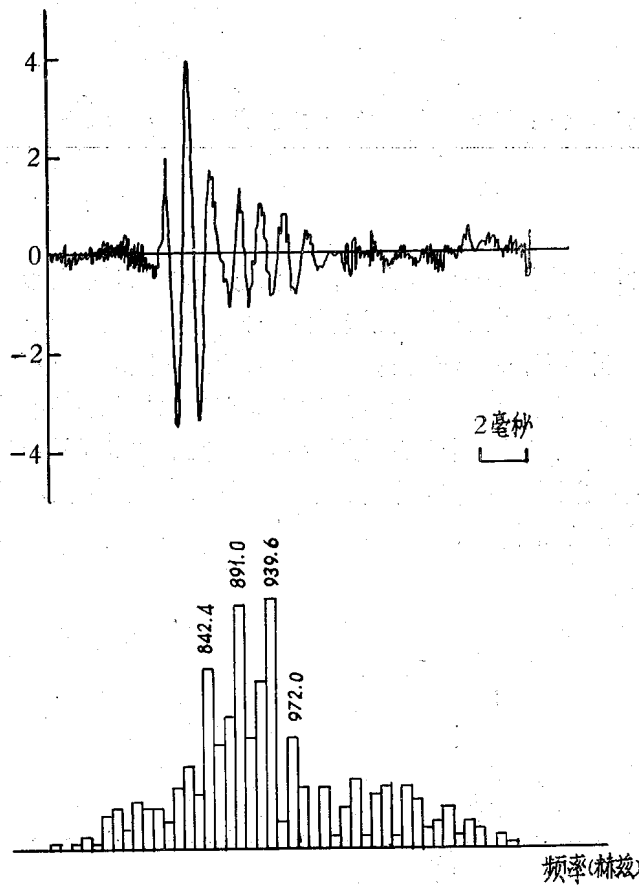


图 4 单个低频调制脉冲及其频谱图

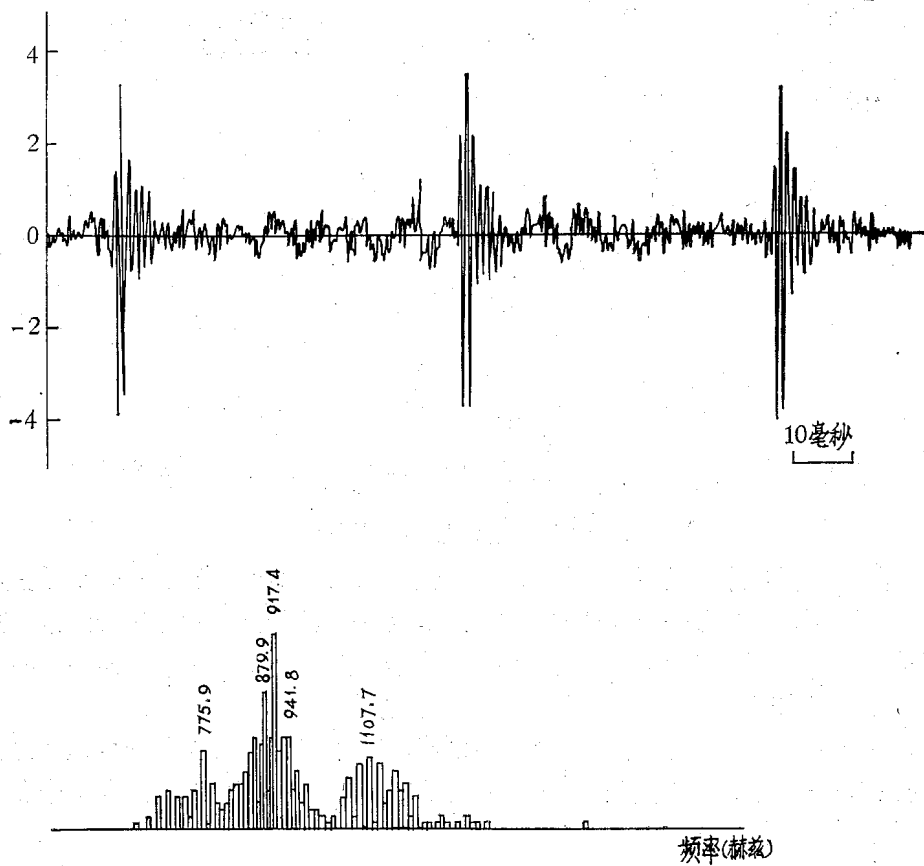


图 5 低频调制脉冲列及其平均频谱图

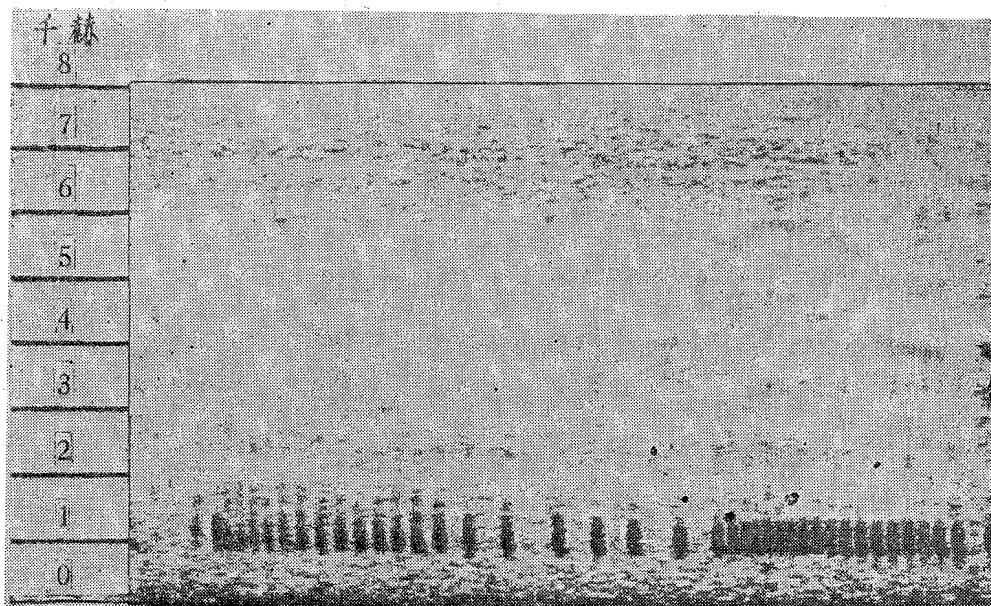


图 6 低频调制脉冲三维声谱图

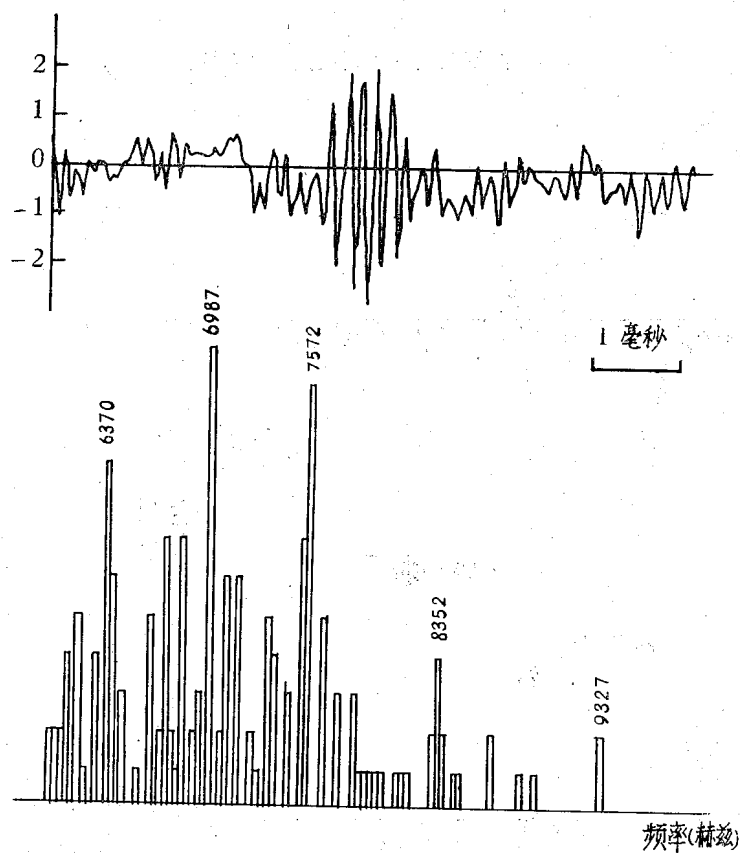


图 7 单个高频调制脉冲及其频谱图

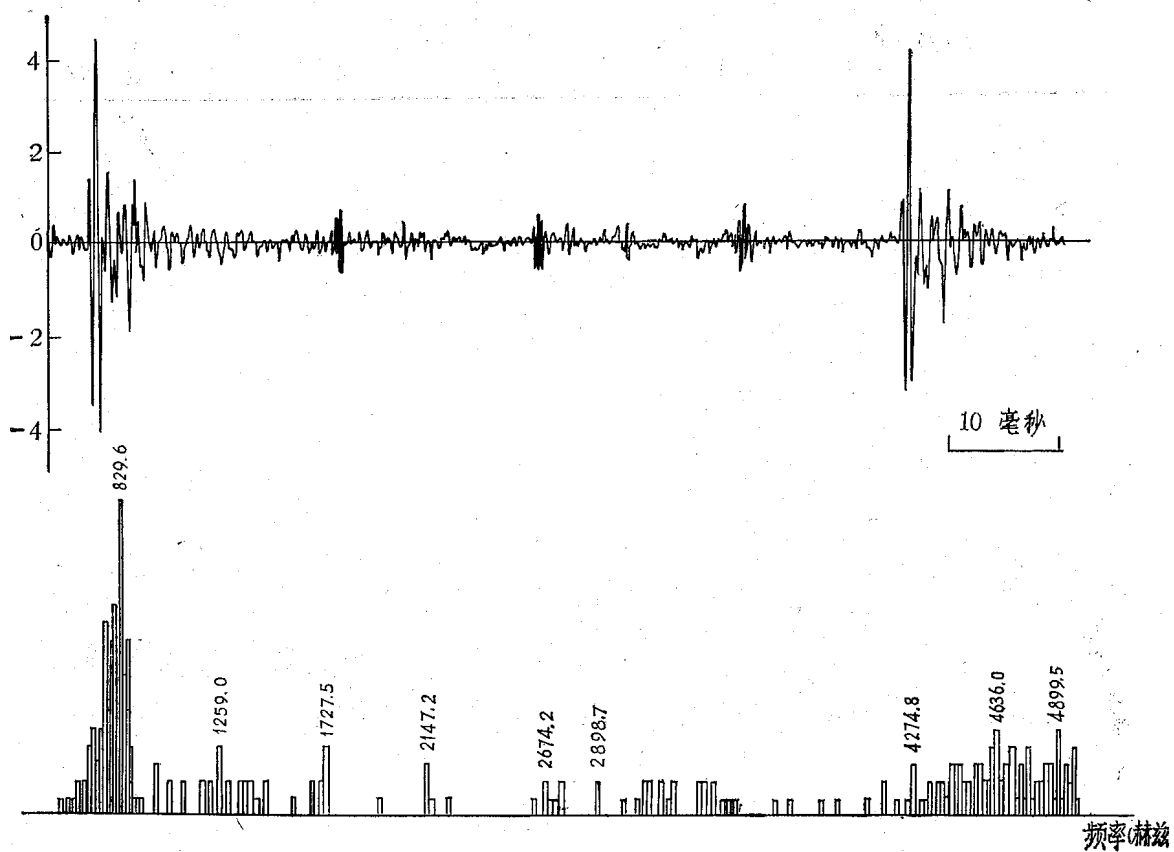


图 8 高频调制脉冲列及其平均频谱图

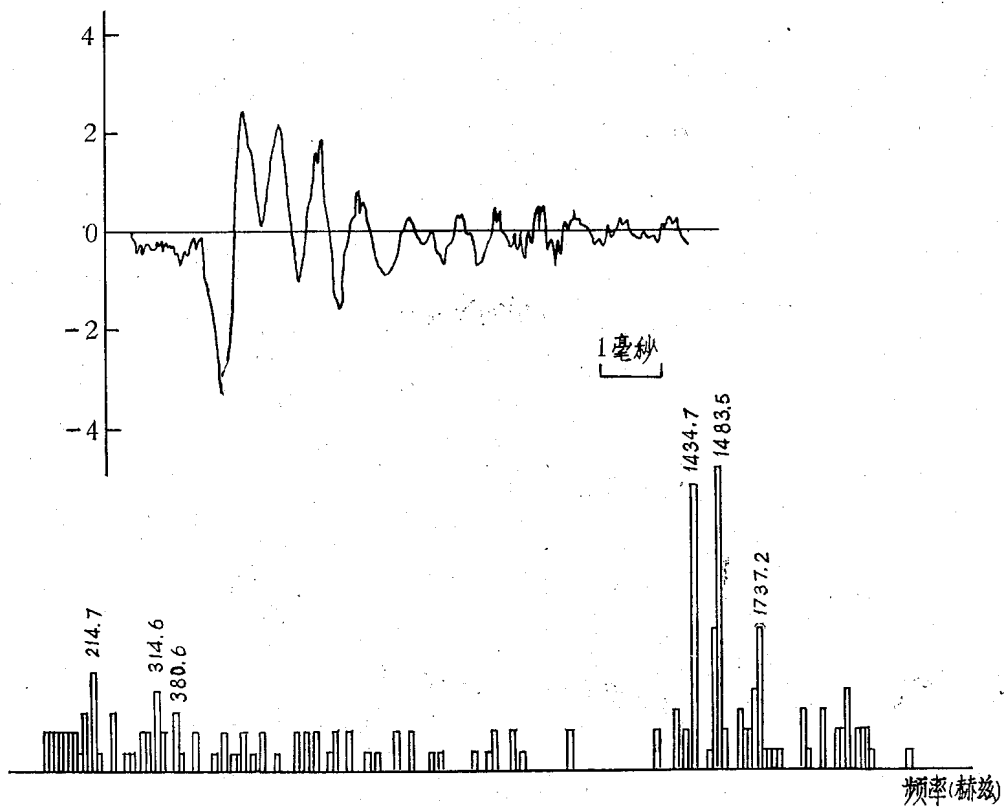


图 9 爆破型单个脉冲及其频谱图

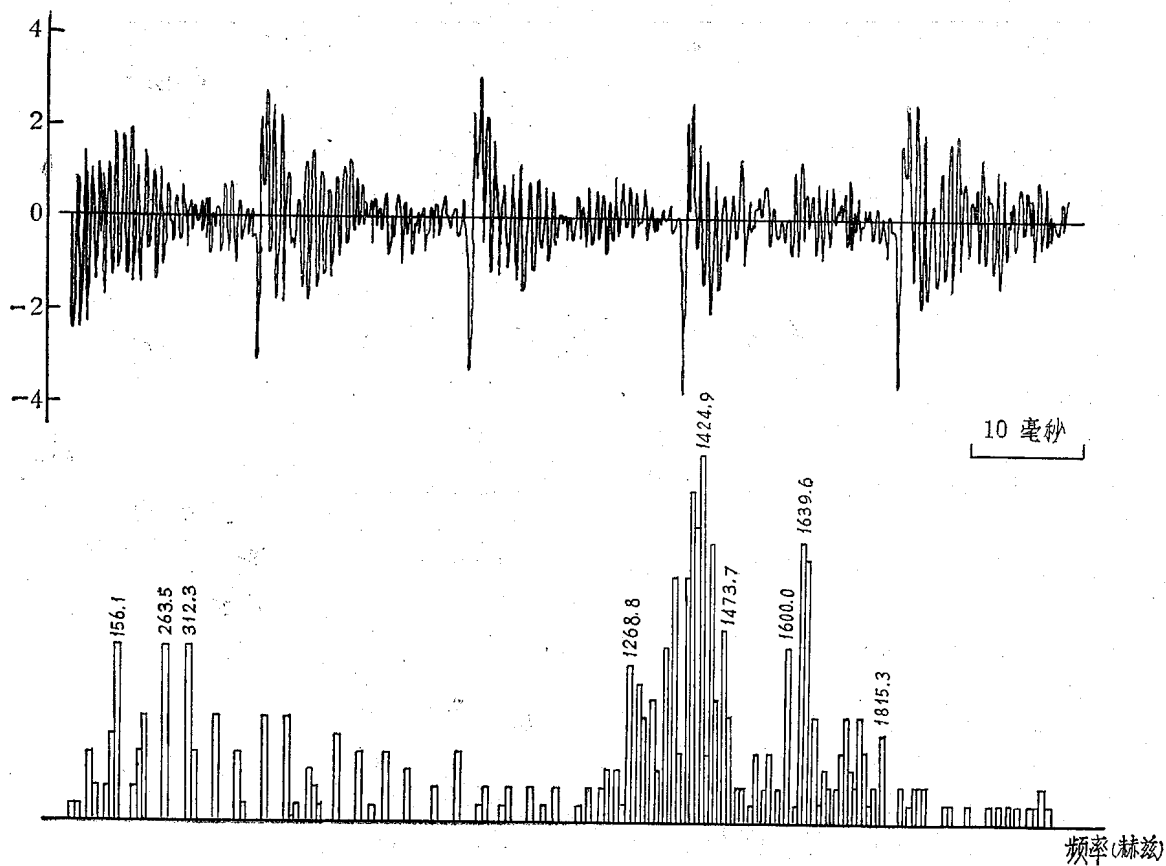


图 10 爆破型脉冲列及其平均频谱图

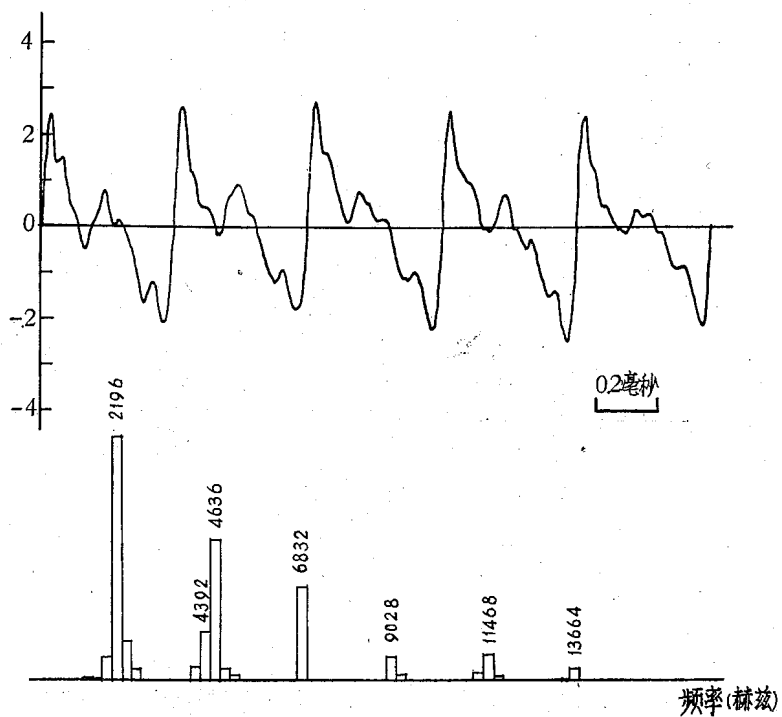


图 11 似“口哨声”波形及其频谱图

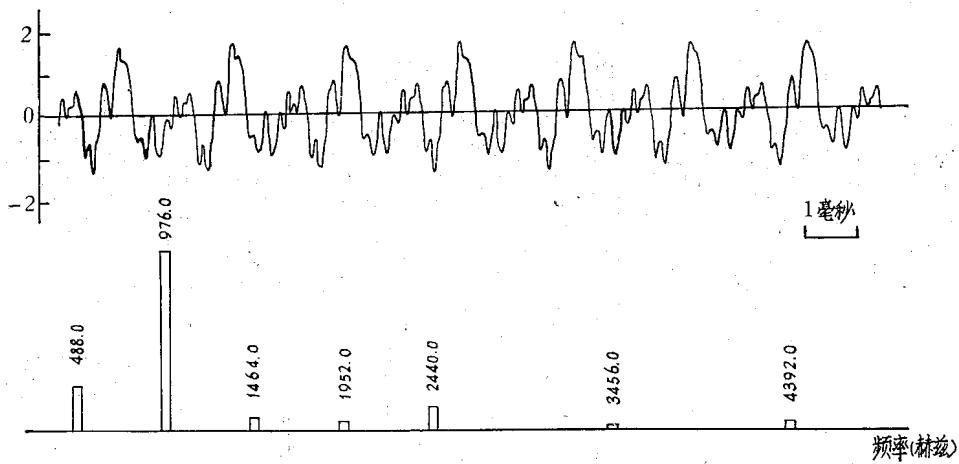


图 12 似“猫叫声”波形及其频谱图

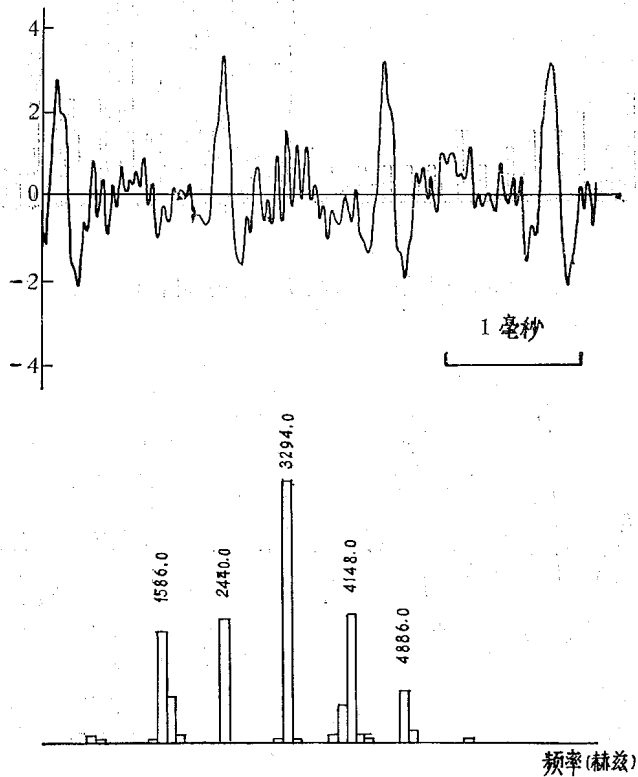


图 13 似“开门声”波形及其频谱图

2. 连续声

具有明显的音调变化和乐音特点。频谱很宽，可从几百赫延伸至十几千赫。波形多

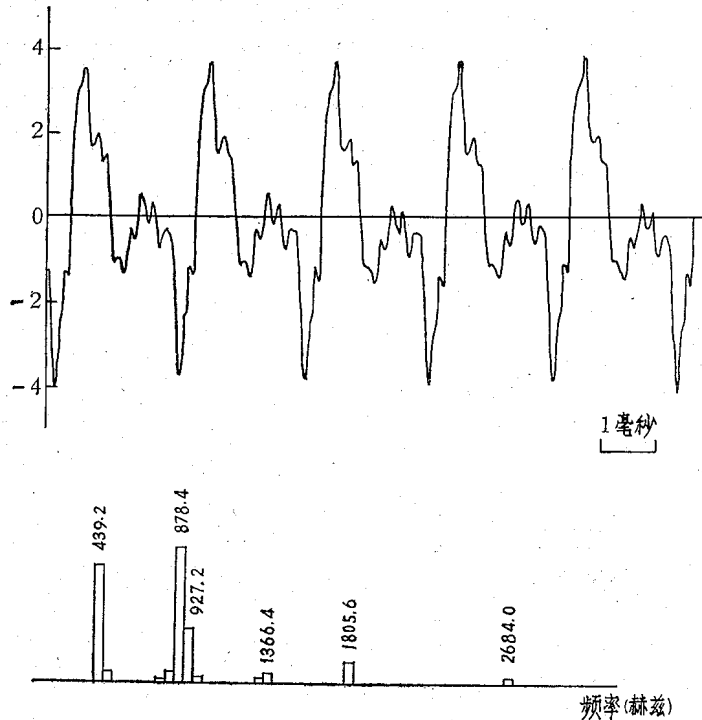


图 14 似“羊叫声”波形及其频谱图

变。在声频范围内监听到有：“口哨声”，如图 11 所示；“猫叫声”，如图 12 所示；类似开门的“吱嘎—”声，如图 13 所示；以及类似“羊叫声”，如图 14 所示。

三、江豚的声学行为

根据实验观察，江豚的声信号大部分都代表着一定的行为，可以说信号与行为息息相关；它们在不断的游动过程中，还能随时调整其声信号的发射方式和频率范围。

1. 在正常情况下，江豚为了对周围环境进行搜索，不断发出“嘎嘎……”的低频脉冲列。这种脉冲序列的持续时间从二秒至十几秒不等。序列间的停顿时间为 0.5—1.0 秒。应予以注意的是在发低频脉冲时，还经常发出一种波形与重复周期都不相同的高频脉冲(图 7, 8, 15)。两个低频脉冲之间可以出现两个以上的高频脉冲，多者可达四、五个(图 15)。

江豚可能用这两种不同的脉冲相互补充，以提高回声定位的精确度：低频用于较远距离粗线条的扫描，高频则用于较近距离细线条(即高分辨率)的观察。

2. 当江豚发现目标或接近障碍物时，头部往往左右频繁摆动，所发低频脉冲的重复频率逐渐增高，而脉冲宽度随之减小。“嘎嘎……”的断续声，变成开门似的“吱嘎—”连续声(或呻吟声)。所以当江豚从障碍物(水听器)旁通过时，监听到的是音调从低到高，然后又变为低的十分动听的“歌唱声”。图 16 表示了这种音调的变化，图中▲符号表示障碍物的位置。

江豚处于静止和停止游动时，没有记录到脉冲声信号。

3. 两只江豚一前一后游动时,后一只经常是“默默”不语,很少发声,依靠前一只“带路”。“响导”因某些外界因素回声定位失灵而触及障碍物时,会发出犬吠似的“噢—”惊叫声。尾随的另一只会对这种叫声作出响应,且会发出同样的叫声,并有效地避开障碍。

4. 两只江豚在相对游动过程中相遇,会发出一呼一应的“哇—”、“哇—”声,犹如猫叫(又像婴儿啼哭)。很明显,它们之间用这种声信号“打招呼”或“通讯”。图 18 中前半部的弧形谱线是一只的呼叫声,后半部则是另一只的应答声。

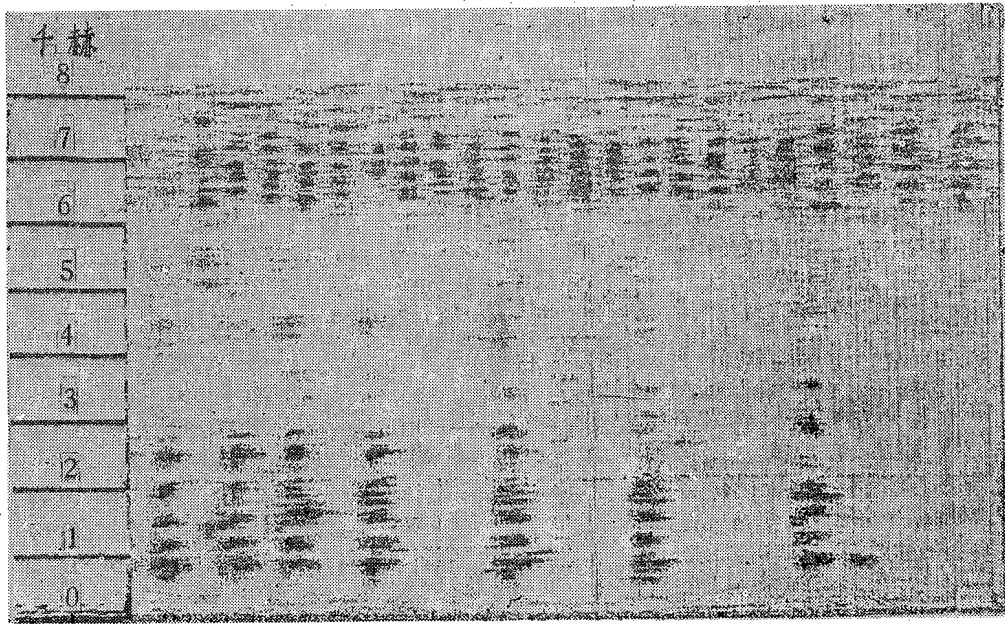


图 15 江豚游动发出低频和高频脉冲列三维声谱图

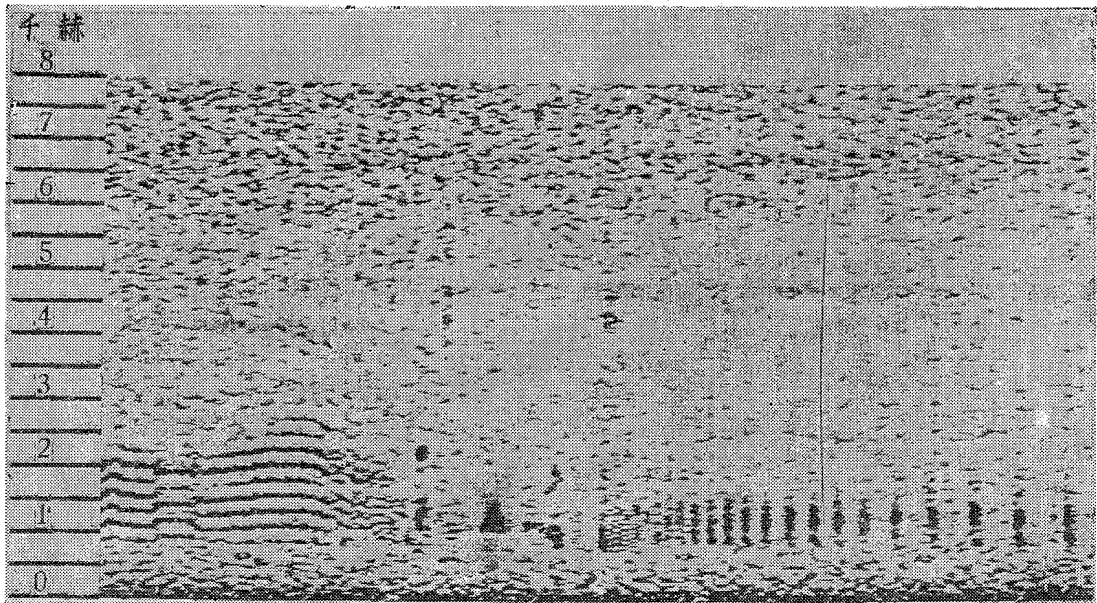


图 16 江豚接近、离开障碍物时发出的连续声和脉冲声三维声谱图

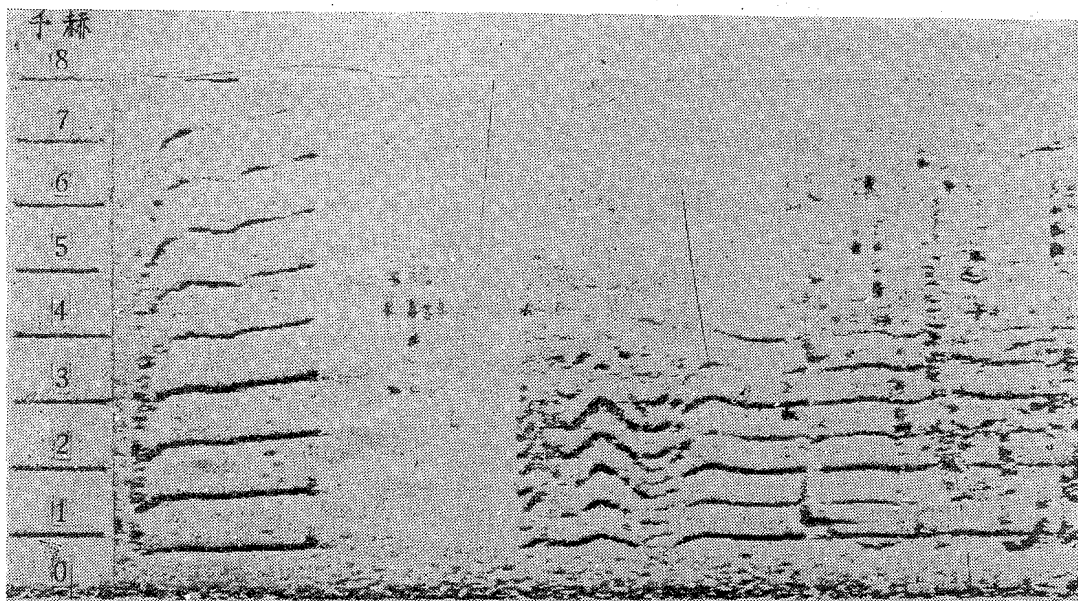


图 17 江豚触及障碍物时发出的似“犬吠”声三维声谱图

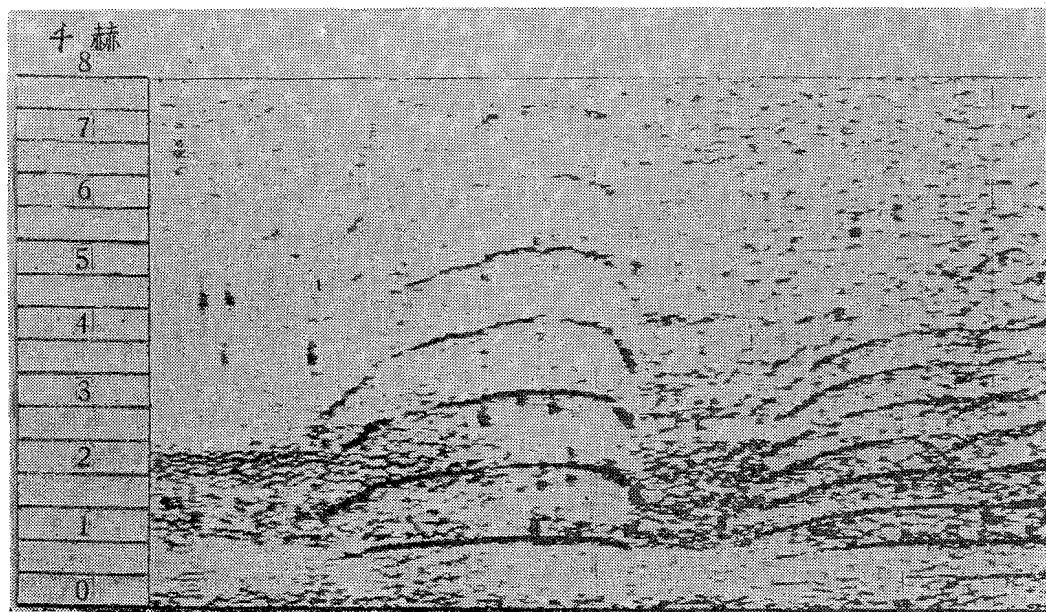


图 18 两只江豚相遇时所发的呼应声三维声谱图

图 19 则表示江豚在相互接触时所发出的另一种“口哨”声（或口琴声）。左面一组平直的谱线是呼叫，右下角一组短而陡者则是远处另一只的应答。

5. 江豚有很好的记忆能力。实验中为了把它们限制在河塘的有限范围内进行观察，实验人员用竹竿击水产生声音进行恐吓，不让其超越规定界线。这种过程只要重复几次，江豚便能较牢固的记住这种击水声信号的含意，以后只要一拍水，便能迅速回头。而后不用这种击水信号，它们也能在预定的地点自动返回。由此可见江豚与其他海豚一样容易驯化。

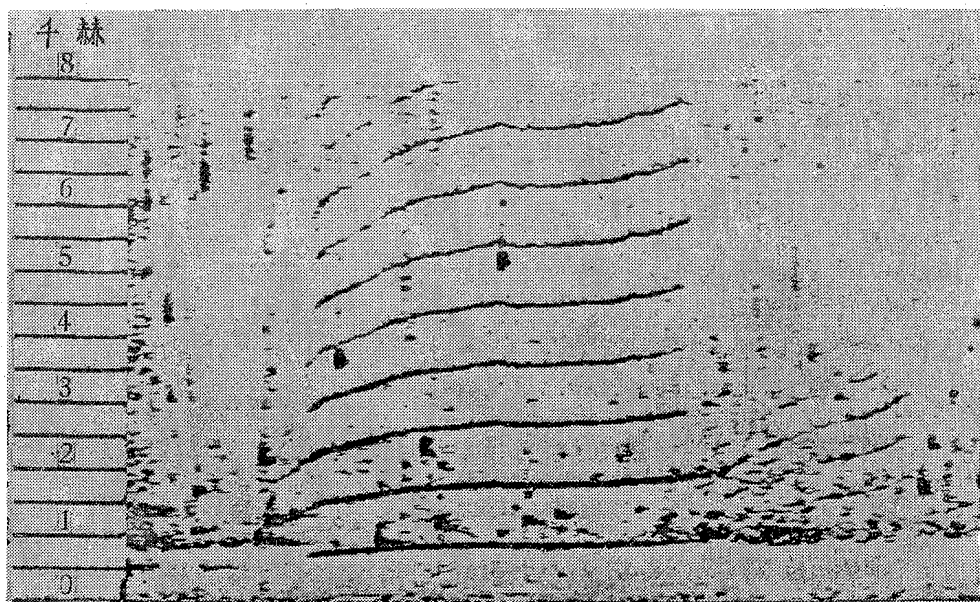


图 19 两只江豚相遇时发出的呼应声三维声谱图

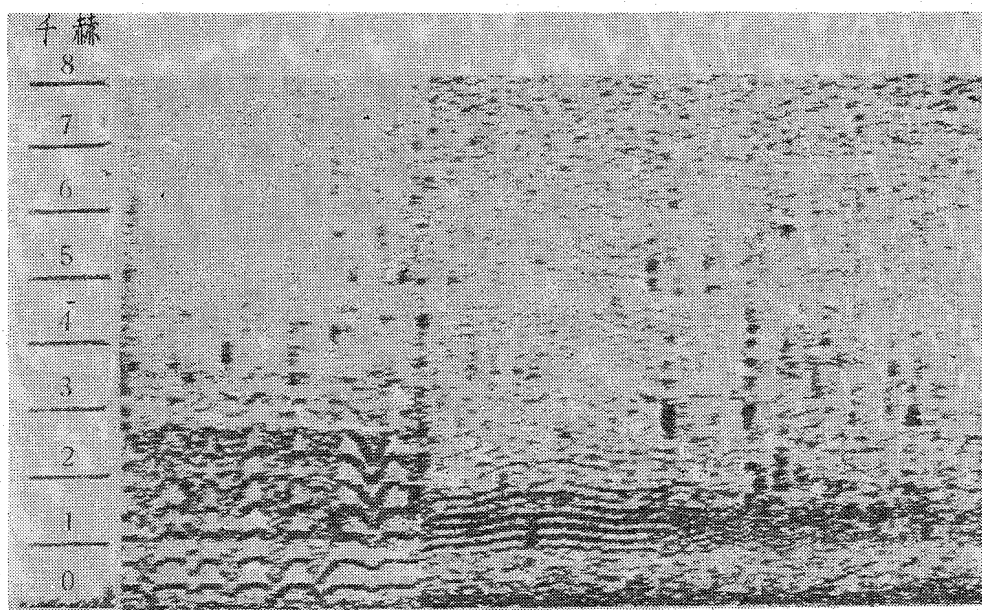


图 20 似羊叫“咪啊—”声和似开门“吱嘎”声的三维声谱图

然而江豚也有不听指挥的时刻,尽管实验人员发出警告不让其继续前进,它们仍然是直往前冲,同时表示出极不耐烦的样子,还发出“哼哼—”的尖叫声(像猪一样的嚎叫)。这种声音是由爆破型脉冲列组成,如图 9, 10 所示,其频谱较宽,在几百赫到三千赫之间;100—1000 赫一段似乎是一组等间隔的纯音,而 1000—3000 赫则表现出爆破脉冲的连续谱特性。

6. 江豚接近障碍物时,除能监听到它们“吱嘎—”的开门声外,偶而还交替出现羊叫一

样的“咪啊—”声。这种声音看来同样是为了更详细地确定障碍物的方位、距离和性质。图 20 是从羊叫声转为开门声的一种典型情况。图中左边的一组小弧形线就是“咪啊—”的三维频谱线。

四、海豚发声机制的讨论

国外不少学者早就指出,海豚类的发声器官,主要是位于颅骨鼻孔上方头部软组织中的一组空气囊^[5]。其中有前庭囊、下前庭腔、鼻颞囊和前颞囊四部分,如图 21 所示。每个囊都有开口与鼻道相通。特别值得注意的是鼻颞囊的下方有一个肌肉发达的鼻塞。Mead (1972) 通过对海豚前额进行详细解剖后指出,海豚的鼻塞肌肉组织与人舌的肌肉组织相似,在发声的过程中起着关键的控制作用,犹如人在讲话中舌头的功能。

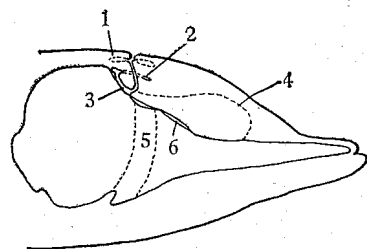


图 21 海豚发声器官示意图

Evans 等人用海豚头作过发声的模拟实验,并获得了类似活海豚在自然条件下发出的爆破脉冲声,这为发声机制的研究提供了重要依据。

文献[6]在综合了 Evans, Norris 等人的意见后,提出了一个简单的发声模式:首先腹肌和隔膜肌收缩将气体从肺部压出,通过鼻管进入前庭囊,然后鼻塞关闭鼻颞囊与鼻管相连的开口,依靠前庭囊壁的收缩将气体通过鼻塞的控制压入鼻颞囊,同时发出爆破脉冲。而鼻颞囊的气体则仍旧通过放松的鼻塞和鼻管回到肺部。前庭囊的气体用完后,再重复下一次循环。

上述这种简单发声机制模式,是极有参考价值的。但根据我们的实验情况,感到按此还难以解释某些实验资料。如江豚在发低频脉冲时,还不断发射重复周期与频谱完全不同的高频脉冲。这两种不同的信号,不大可能由发声器官的同一部位承担。Lilly 于 1962 年曾记录到海豚能同时发“口哨”声和“咔嚓”声,并且认为头部的左边发“咔嚓”声,右边发“口哨”声。这说明海豚的发声器官具有较复杂的结构,发声的过程远不是一个简单的模式所能包括得了的。由此可见,这还是一个值得深入研究的问题。

又如,江豚用来进行“通讯联络”的各种连续声信号,更不是单一器官所能奏效的。看来最适宜的器官是鼻颞囊和前颞囊。鼻颞囊形如“牛角号”,发出脉冲声时,前庭囊的空气通过鼻塞的控制进入鼻颞囊后贮存起来,需要时依靠发达的囊壁皱纹肌的收缩和放松鼻塞,将气体重新排回前庭囊,这就形成吹“牛角号”的动作,发出一定的连续声。肺内气体依靠腹肌与横膈肌的压迫进入腔内,腔壁的压力又可将气体排出。气体流经囊口,有可能发出“口哨声”(或“风琴声”)。至于下前庭腔和鼻管道本身,对各种发声也起着重要的辅助作用。

海豚的肺部气体,由于发声的需要,通过鼻管和各类发声气囊,最后进入容量很大的前庭囊贮存起来,待鼻孔露水面排出废气,吸入新鲜空气。此时新鲜空气通过鼻管直接进入肺部进行体内交换和下一个发声循环。

关于海豚的声信号接收机制,是一种更复杂的官能活动过程,并且必定与一系列高级神经活动有关,并非一般电子设备所能模拟,这方面的研究工作也决非单一专业所能胜任。

国外学者在七十年代以前对海豚的研究工作侧重于生理解剖和生态观察,对动物的声信号也作了不少测试、研究,但对信号作详细分析的工作则报道甚少,这可能是由于当时信号分析处理设备比较落后的缘故,我们的实验尽管力求在接近自然的条件下进行,然而,毕竟还不是完全的自然条件,这就可能使江豚的声信号失去一定程度的自然性。但是,这次实验在声频范围所获取的资料和结果,比纯人工饲养条件下进行的实验要“自然”得多。

参 考 文 献

- [1] 陈万青, 1978。海兽检索手册。科学出版社, 96—104页。
- [2] Caldwell, M. C., D. K. Caldwell and W. E. Evans, 1966. Sounds behavior of captive Amazon Freshwater Dolphins, *Inin Geoffrensis*. *Los Angeles County Museum Contributions in Science*. No. 108. p. 24.
- [3] Caldwell, D. K. and M. C. Caldwell, 1970. Echolocationtype signals by two Dolphins, genus *Sotalia*. *Quarterly Journal of the Floride Academy of Sciences*. 33 (2): 124—131.
- [4] Caldwell, D. K., M. C. Caldwell and J. F. Miller, 1969. Three brief narrow band sound emissions by a captive male Riss's Dolphin, *Gramous Griseus*. *Bull. So. Calif. Acad. Sci.* 68 (4): 252—256.
- [5] Malins, D. C. and J. R. Sargent, 1975. Biochemical and biophysical perspectives in marine biology. Vol. 2, pp. 371—393. Academic Press, New York.
- [6] Tavolga, W. N., 1964. Marine bio-acoustics. pp. 317—393. Pergamon Press, New York.

THE OBSERVATION OF ACOUSTIC BEHAVIOUR OF FINLESS BLACK PORPOISE (*NEOPHOCAENA PHOCAENOIDES*) AND PRELIMINARY STUDIES OF ITS UNDERWATER SOUND SIGNALS*

Zhang Sizhao Song Zhengxiu and Qi Meng'e

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica*)

ABSTRACT

This paper deals with the acoustic behaviour and all the possible underwater sound signals of Finless Black Porpoise, which is common in China, under semi-natural condition. After analysing and processing the underwater sound signals in laboratory, three kinds of echo location pulse are found in a specific environment: (1) low frequency modulated pulse (1—2kHz); (2) high frequency modulated pulse (6—8 kHz); (3) plosive modulated pulse. The paper also presents more than ten different types of continous sound signals and their frequency spectrums.

Comprehensive analyses of the relationship between the sound signals and the field behaviour data of Finless Black Porpoise prove that its echo location ability depends mainly on the three kinds of sound pulse mentioned above, while continuous sound is secondery. And communication (or language) between the Finless Black Porpoises is performed by means of several kinds of continous sound signal with harmonic feature.

*Contribution No. 819 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.