

白暨豚的声训练*

王 丁

景荣才

(中国科学院水生生物研究所, 武汉)

(中国科学院声学研究所, 北京)

提 要

1982年4月—1983年4月对一头白暨豚进行了训练, 目标识别实验的结果表明, 白暨豚愿意满足训练员的要求, 且记忆力较强。

关键词 白暨豚, 训练, 声纳

白暨豚 (*Lipotes vexillifer*) 长期生活于混浊的江水之中, 视觉已经退化^[2]。之所以能生存至今, 主要是借助于在漫长的进化过程中形成和发展的声纳系统。借助于这个系统捕捉食物, 逃避敌害和进行社群交往。在恶劣的环境中得以繁衍生息。国外, 特别是美、苏两国对一些海豚(如宽吻海豚 *Tursiops truncatus*) 的声纳系统作了深入的研究。有些研究成果在经济、军事等部门获得了重要的应用^[7]。与海豚相比, 白暨豚由于其生活环境能见度低等因素的影响, 因而视力较差, 声纳系统相对较发达, 但究竟具有怎样的特点, 完善程度如何, 成了目前国内外学者深切关注的问题。近几年我国已开展了这方面的初步研究^[4-6]。为了进一步探讨白暨豚声纳系统的性能并与最佳理想系统进行比较, 为仿生学的研究提供一些有益的启示, 从而为进一步开展白暨豚声纳系统检测、分辨、识别性能等方面的研究作准备, 我们进行了白暨豚的声训练的研究。

训练过程及结果

“淇淇”(白暨豚名), 雄性, 现饲养在中国科学院水生生物研究所。1980年1月12号渔民偶然捕获于湖南省城陵矶附近。捕获过程中严重受伤, 经过4个多月的治疗痊愈^[1]。至1982年4月, 体长1.66 m, 体重64.5 kg, 年龄4岁多。

训练共分三个阶段。1982年4月6日—7月15日: 基本动作的分解训练。12月5日—28日: 动作的温习及巩固。1983年3月15日—4月28日: 目标识别实验的初步探讨。

* 本工作是在黄曾珣研究员, 林克杰先生的悉心指导和具体参与下进行的, 郑肇本、梅建平同志参加部分工作, 承陈佩薰研究员、刘仁俊和华元渝先生热情指导及对论文提出宝贵意见, 在此一并致谢。

1987年7月16日收到。

1. 基本动作的分解训练

手喂鱼 (Hand-feeding) 这种喂食方式能够加深训练员和豚之间的感情交流,并且加快进食速度,保证训练的连续性^[8]。实现的方法是逐步引导。开始,用手持鱼击水,引诱豚接近,然后逐步将鱼提出水面,促使豚将吻伸出水面,并且张开嘴,训练员就将鱼投入其嘴里。经过 20 天,每天约 58 次的训练,淇淇能够将整个吻伸出水面,等待训练员喂食。

Bridge 信号 Bridge 信号是一纯音信号,要求豚一听到该信号即回至训练员面前将头伸出水面待食。Bridge 信号与食物的密切关系使得它成了训练员与豚之间联系的桥梁。借此能将人的意图传达给豚。假若豚作出了一个所需要的动作,训练员马上发出 Bridge 信号并待豚回到训练员面前后立即喂食以资鼓励。这样,可以对豚作出的正确动作迅速地直接地予以加强,不受时间及豚所处位置的限制。豚出于求食的本能,就会不断重复这一动作,直至最终掌握。对于 4—7 kHz 的纯音信号,淇淇以自身的啸叫声 100% 的应答率应答^[4]。这一点也许与发射纯音信号的频率与淇淇自身啸叫声的主频率 (6 kHz) 相近有关。根据仪器情况选用 10 kHz 的纯音信号作为 Bridge 信号,通过水下声发射换能器发射,脉冲宽度、强度可调。实验表明,在一定脉宽及强度下,不管豚位于实验池的任何位置,均能迅速、准确、可靠地感觉到这一信号的发射。从而确立了 10 kHz 的纯音信号作为 Bridge 信号使用的稳妥性及可靠性。训练方法是在每次喂食前给一个 Bridge 信号,反复多次后,豚就建立了这种条件反射。即一旦听到 Bridge 信号,无论位于何处,会迅速回到训练员面前待食。这种反射建立后, Bridge 信号本身就是一种加强。通过 14 天,每天 26 次的训练,豚已完全达到上述要求。

定位 (Station) 要求豚在每次训练开始之前到训练员面前待命。以准备接受训练员发出的作下一个动作的命令信号。这一动作表明豚进入训练状态。训练方法是用一个定位标(色彩鲜艳,易于辨认)插入训练员面前的水中。豚开始不敢接近,当豚逐步熟悉后,并敢在定位标附近停留时,就发出 Bridge 信号并投食给予奖励。当豚敢用吻顶住定位标时,再逐步延长停留的时间。通过 7 天,每天 25 次的训练,淇淇能够按照训练员要求的时间作定位动作。

碰标 (Touching pinger) 作为一种响应方式,使豚能将实验中要求其判断的结果用碰不同标的方式告诉训练者。训练方法类似于定位的训练,即逐步逼近 (Successive approximation)。开始只要其吻指向响应标,即发出 Bridge 信号并喂食。通过 8 天,每天 28 次的训练,淇淇从开始回避到逐渐接近,最后能主动用吻去顶响应标。

探测 (Detection) 豚执行训练员的命令信号,对某个特定位置的目标有无,或者目标材料的异同等进行探测训练。我们利用了豚对击水声很敏感这一习性,在紧挨需要其探测的目标处发出一个击水声,实际上等于一个命令信号。接到这个命令信号后,淇淇就会马上将头对准这个方向进行探测,并发射声脉冲。通过这种方法进行 4 天,每天 43 次的训练,淇淇就能很好地完成探测,即命令信号-转身-发射声脉冲这一动作。此时,并没有要求豚对目标的有无或材料的异同进行检测和识别,而是只要其形式上完成这一动作系列即给予奖励。豚是否能准确地探知目标的有无或材料的异同尚有待于以后实验予以确

认。

1982 年 12 月 5—28 日对淇淇进行了复习性的训练。即对第一阶段训练完成的基本动作进行了重温、巩固、提高。基本动作的分解训练总的情况如表 1 所示。

表 1 基本动作训练
Tab. 1 Basic action training

训练情况 Situation of training 动作名称 Name	训练天数 Training period (days)	天平均次数 Average times per day	训练顺序 Order	结果 Result	温习 Review
手喂鱼 Hand-feeding	20	58	1	整个吻出水面，张开嘴待食，训练员可以触摸其身体。	一恢复训练即恢复原水平
信号 Bridge	14	26	2	不管豚位于何处，一发出该信号即回至训练平台前吻出水待食。	同上
定位 Station	8	25	3	吻顶住定位标，按训练员要求时间长短定位待命。	一天后即恢复原水平
碰标 Touching pinger	8	28	4	吻端可靠地碰标，将标顶出水面	同上
探测 Detection	4	27	5	一接到探测命令信号即转身游到距待探测目标 5 m 以外探测，并发射声脉冲。	同上

2. 目标识别实验的初步工作

在基本训练的基础上，初步作了目标材料识别实验。实验是在一个 25 × 20 × 2.5 m 的混凝土池子中进行的。实验装置如图 1 所示。

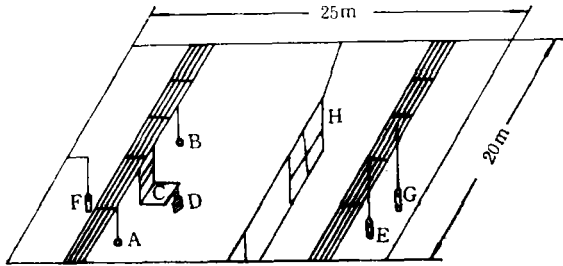


图 1 训练池中的实验装置

Fig. 1 Experimental set-up in the training tank

A、B 为两个响应标，C 为训练平台，离水面约 10 cm，D 为定位标，E 为待探测的目标，F 为 Bridge 信号发射换能器，G 为监测豚是否发声的信号记录水听器，H 为栅栏，以保证豚探测时距离目标 E 最少不得小于 5 m。

目标材料识别实验就是要求豚用声纳系统去判别形状相同但材料不同的目标之间的差异，并通过某种响应方式将其判别结果告诉人。用这种方法来判断豚目标识别的能力。实验的大致程序是：定位标一插入水中，豚即在定位标前定位待命。然后在其背后约 15 m 处随机选取两个待识别的目标中的一个（两目标均为圆柱形，大小均为 4 × 18 cm，

但材料不同,分别是钢和铝做成)放入水中,并发出击水声命令淇淇转身探测。探测后即回到训练平台前用碰不同响应标的形式告诉训练员其判别的结果(钢标时碰 A 响应标,铝标时碰 B 响应标)。若其判断正确,训练员发出 Bridge 信号并喂食以资鼓励。淇淇吃完鱼后,再回到定位标前进入待命状态,等待命令准备重复上述动作。

豚经过探测后,即使能发现目标的差异,也不可能自动把探测结果与不同的响应对应起来。这一点需要训练。训练的方法就是引导。A 标、B 标分别放置在训练员的左、右两侧,训练员振动 A 标以引诱豚碰 A 标,振动 B 标以引诱豚碰 B 标。随着豚对这种对应关系的逐步建立,逐渐减小振动的幅度,推迟振动引导开始的时间,直至消除引导。这时要求豚建立钢目标碰 A 标,铝目标碰 B 标的对应关系,作出正确的响应。这一训练最后未能全部完成。

讨 论

1. 训练的适应和 Bridge 信号的作用

从上述的训练情况可以看出,不管动作的难易程度,各个动作的训练所花费的天数和总次数基本上是逐渐减少的。这表明了训练的适应过程和 Bridge 信号作为奖励手段所起到的作用。一般认为,由于手喂鱼、Bridge 信号两个动作直接跟食物-鱼相联系,利用了豚的摄食本能,应该比较简单和容易训练的,而定位和碰标等无法与豚的任何自然行为直接对应,训练应该相对较难。可事实上恰好相反。定位和碰标的总天数都只有手喂鱼的 2/5, Bridge 信号的 4/7,总次数只有手喂鱼的 1/6 左右, Bridge 信号的 1/2。这两个原因:①淇淇从未驯化状态转入训练状态有一个适应过程。作为从未接受过正式训练的淇淇开始很难与训练员相配合接受训练。②开始训练时,还没有一个很好的加强手段,对淇淇的正确反应无法进行及时的直接的加强,只有用喂鱼的办法来给予奖励。虽然鱼对豚的吸引力很大,但往往由于奖励不及时而使其作用减弱。当 Bridge 信号训练成功后,就能对淇淇的正确反应作出及时的直接的加强,而不管豚位于何处。因此,训练必须循序渐进,而且 Bridge 信号的训练成功是整个训练成功的基础和关键。

2. 奖励和惩罚的正确使用

奖励是训练的基本手段。而惩罚是奖励的必要补充。适当运用奖励和惩罚,会使训练收到事半功倍的效果。比如训练碰标时,开始一段时间进展不大。后来一次偶然的机,豚吻碰了一下响应标,训练员抓紧时间立刻发出 Bridge 信号,同时投给它两条鱼以增大加强的作用。这时淇淇一下子就明白了训练员的要求,并接二连三地碰起标来。如发现豚探测时不发射声脉冲,训练员即采用惩罚的方法,即一套动作完成后不发 Bridge 信号和不喂食,但效果不大。反而见豚加大了探测距离,改变了一些不需要改变的动作。这主要是惩罚的时机不准,意义不明。一套动作包括定位、探测(含发声)、碰标等。动作完成后不给予奖励,豚就不知道错在哪一步,随意改变某一动作,造成混乱。后来改用 Bridge 信号直接加强,即当它偶一发声就立即发出 Bridge 信号给予奖励,这时豚立刻明白发声是训练员所要求的,后来每次探测发出的脉冲个数都比较多。

3. 环境因素和自身情绪对训练的影响

从整个训练来看,环境安静,豚的精神状态好,训练效果就比较好,反之就差,甚至不能训练。

如果正在刮风下雨时训练,由于风、雨所产生的噪声干扰对豚感觉系统的影响,淇淇不能集中注意力,命令信号的接收等亦受到干扰,动作经常出错。池子周围脚步声、参观的人群、建筑施工所造成的噪声均会影响训练。多次发现训练本来很顺利时,环境突然变得嘈杂,随即训练效果变差,甚至不能训练。更为典型的是,1982年12月的一天,上午的训练一切正常,中午的训练却动作完全失误。以前已经学会并且早晨完成很好的动作没有一个重现(包括定位、碰标、探测等)。甚至对从未出错,反射已经牢固建立的 Bridge 信号也毫无反应。淇淇就象突然丧失了记忆力一样,无法进行训练。究其原因,是工人当天上午在池边打夯造成的。打夯引起的强烈振动通过地面传入水中,对淇淇的刺激十分强烈,才导致这种局面。下午的训练仍然如此。直至第二天上午的训练才基本恢复正常。但一般说来,只要噪声源不紧靠池子,且强度不要过大,并且在训练1小时以前恢复平静,训练一般能正常进行。

水质的好坏对训练也至关重要,水质变坏时,藻类生长很快。豚皮肤上的霉菌繁殖也很快。感觉不舒服,老爱在池壁上蹭痒,训练时显得疲倦,动作完成不够理想。

1982年4月,淇淇开始发情。经常在池中猛烈跳跃,高速游动、翻滚、常腹部贴墙扭动身体甚至猛地往池壁上冲撞,十分兴奋、激动,有时游动特别快;有时显得疲倦不堪,游动乏力。因而难以进入正常的训练状态。

一般说来,淇淇对训练员没有选择。当更换训练员时,淇淇并没有什么明显不同的表现。它最关心的是鱼,而不是喂鱼的人。这可能是视力较差的原因,与视力较好的海豚有所区别,但是不同的训练员,在训练时掌握的标准也稍有差异,这样训练效果就稍有不同,这是应该注意的。

4. 白暨豚的训练的可行性

由于豚类具有十分发达的大脑和相应复杂的行为,因而一般认为豚是一类十分聪明的高等哺乳动物。而且事实上根据国外的一些研究表明,某些豚类的确可以接受相当复杂的训练以完成声纳系统的研究和为人类从事某些特殊工作^[7]。通过对淇淇的训练和观察,可以对白暨豚的训练的可行性作出初步的判断。

白暨豚愿意满足训练员的要求 在作识别实验训练时,用振动响应标的方式引导豚正确碰标。有时由于振动幅度过小或其它原因豚仍会游向错误的响应标。这时训练员用力振动该碰的响应标,此刻即使豚已非常接近错误的响应标仍会立刻转身游向该碰的响应标并作出正确的响应。

豚在训练时也有偷巧现象。如碰标,有时仅吻端挨一下响应标即回到训练平台前待食。这时训练员仅喂小鱼以示不满。而豚对训练员的不满似乎心领神会,第二次碰标就会认真得多,有时甚至将标顶出水面。

有时豚接受训练不认真,动作马虎,甚至不服从命令。这时训练员拿走鱼桶,取下定

位标,并离开训练平台以示惩罚。如 5—10 分钟后重新开始训练,豚会表现十分积极,每一个动作都完成得准确。

总之,从对训练中豚表现的行为来观察,豚总是企图了解训练员的意图,满足训练员的要求,以期望获得食物奖励。

白暨豚有较强的记忆能力 通过训练说明,白暨豚的记忆能力是比较强的。①淇淇对于新的动作一经掌握,就不会忘记。第一天刚学会的动作,第二天仍能熟练完成,除了外界环境的干扰外,从没有出现过第二天忘记第一天动作的事情。② 第一阶段结束训练至第二阶段训练开始,其间相隔 4 个半月,没有进行任何复习性的训练(包括手喂鱼在内)。而在 12 月 5 日第二阶段开始的第一天,一发出 Bridge 信号,淇淇即出水待食,反应迅速、敏捷。而个别动作也只要一天的复习即可恢复到原有水平。

综上所述,可见淇淇在训练中愿意满足训练员的要求,且具有较强的记忆能力,从而初步说明白暨豚是可以训练的。

5. 目标识别实验的训练未能最后完成的原因

从 1983 年 3 月 12 日—4 月 28 日,进行了 43 天目标识别实验。开始 5 天后淇淇即能顺利完成所有基本动作的串连;即定位,接到探测命令转身探测,碰标以告之判别结果,接到 Bridge 信号出水待食,尔后定位等待下一轮的动作开始。但是从豚选择回答的结果来看,说明豚对判别结果的选择始终是随机的。由于其它原因,训练暂停。因此,目标识别实验的训练没有最后完成。其原因有以下几点:

(1) 时间过短 目标识别实验的训练实际上是要求豚将探测任务的执行结果作出回答。这种实验程序称为双择-强迫选择程式 (Two-Alternative Forced Choice Procedure 简记为 TAFC 程式)。这对动物来讲是一种较高的训练要求。国外对一些海豚(如宽吻海豚)花费较长时间才训练成功,而对白暨豚的训练只坚持了 43 天。

(2) 训练方法不够完善 训练豚对不同目标作出不同的选择回答时,训练员没有准确无误地将其要求——即判断两目标的异同通过碰不同响应标的方法回答判断的结果转达给豚。即没有指导豚将目标的异同和碰标的选择直接对应起来。而对于豚来讲,它所关心的只是食物,它只要正确碰标(这一点可根据判断振动诱导的来源而达到目的)就可以获得食物。因此它只是注意观察哪一个响应标在振动。如果均不振动,它就只好随机选择碰标了。所以完成这一训练的关键也许还在于如何准确地将训练员的要求转达给豚。与海豚有所区别的是白暨豚视力较差,很难用手势作为命令信号进行训练。如何突破这一难关,建立人-豚之间准确、有效的联系,有待于今后工作的进一步摸索。如这一点能获得突破,白暨豚声行为及声纳系统的研究将会有重大进展。

6. 训练中应注意的问题

(1) 训练应在环境安静、豚活动正常时进行。豚在饥饿时较易接受训练。一次训练以 20—30 尾鱼为宜。次数太多,训练后期豚感觉疲倦,效果不佳,甚至拒绝训练。如太少,则训练效果不易巩固。

(2) 训练时要尽量保证训练员给出的每一个信息(包括奖励和惩罚)都只有一个特定

含义。只有含义唯一,才能得到一个特定的所需要的反应。否则训练会出现紊乱。

(3) 要保证训练的连续性,不能随意中断训练。训练员前后训练时掌握的标准要尽量一致。连续动作的分解必须合理,既不宜分得过细,也不宜分得过粗。应保证训练新的动作时同时温习旧的动作,以不断巩固。

淇淇基本动作的训练成功,证明白暨豚是可训的。为进一步开展白暨豚声行为及声纳系统检测、分辨、识别性能的研究以及为评价白暨豚的学习能力和智力发展水平奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 刘仁俊、林克杰, 1982。白暨豚的外伤治疗。海洋与湖沼, 13(6): 548—552。
- [2] 吴奇久、李俊凤、肖悦梅, 1982。白暨豚视觉通道的组织学研究—视神经结构, 纤维计数和纤维直径谱。中国科学(B 辑), (11): 1001—1005。
- [3] 周佩芬译(格鲁勃柯夫著), 1984。海豚水声定位器。国防工业出版社。
- [4] 荆显英、肖友英、景荣才, 1981。白暨豚的声信号及声行为。中国科学, (2): 233—239。
- [5] 荆显英、肖友英、景荣才, 1982。白暨豚额隆的声功能。声学学报, 7(1): 14—22。
- [6] 荆显英、肖友英、景荣才, 1983。白暨豚的回声定位信号。海洋学报, 5(1): 11—18。
- [7] Busnel, R. G. and Fish(eds.), J. F., 1980. Animal Sonar Systems. Plenum Press, New York.
- [8] Pepper, R. L. and Defran, R. H., 1975. Dolphin Trainer's Handbook: Part 1. Basic Training. Naval Undersea Center, San Diego.
- [9] Purves, P. E. and Pilleri, G. E., 1983. Echolocation in Whales and Dolphins. Academic Press, London.

ACOUSTIC TRAINING OF THE CHINESE RIVER DOLPHIN *LIPOTES VEXILLIFER*

Wang Ding

(Institute of Hydrobiology, Academia Sinica, Wuhan)

Jing Rongcai

(Institute of Acoustics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

We trained the Chinese river dolphin from April 1982 to April 1983. The purpose of the training was to study the detection, discrimination and recognition abilities of the sonar system of the dolphin, and to compare the dolphin's abilities with those of the ideal system. During the training period, we also carried out a preliminary target recognition. The training results showed that the dolphin was willing to content the trainer and had a good memory. It was verified that the dolphin could be trained. The results provide basis for advanced researches on the dolphin's acoustic behaviour and sonar system.

Key words *Lipotes vexillifer* (Chinese River Dolphin), Training, Sonar