综 述

水生哺乳动物信标跟踪记录技术及其应用

王克雄[1,3] 王 丁 赤松友成[2]
(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 日本国立水产工学研究所, 茨城 314-0421, 日本; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

BIO-LOGGING TECHNOLOGY AND ITS APPLICATIONS ON AQUATIC MAMMALS

WANG Ke-Xiong[1,3], WANG Ding[1] and Tomonari AKAMATSU[2]
(1. *Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430072;
2. *National Research Institute of Fisheries Engineering, Ibaraki* 314-0421, *Japan*;
3. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039)

关键词: 信标跟踪记录; 水生哺乳动物; 行为; 生态; 生理
Key words: Bio-logging; Aquatic mammals; Behavior; Ecology; Physiology
中图分类号: Q178.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2005)01-0091-06

水生哺乳动物(主要是鲸类和鳍脚类)分布范围广、活动范围大、行为复杂, 且在水下活动时间长, 常规的目视观察受时间和空间限制, 通常只能获取有限的信息。信标跟踪记录(Bio-logging)具有可跟随移动和自主操作的特征, 能在很大程度上突破时间和空间限制, 实时获取动物及其栖息环境信息。水生哺乳动物的信标跟踪记录始于 20 世纪 60 年代[1,2], 40 年来, 无论是记录技术, 还是应用研究, 都有了很大发展。2003 年在日本东京国立极地研究所召开的"信标跟踪记录科学国际学术讨论会(International Symposium on Bio-logging Science)", 收到来自法、美、英、日、澳、德、意、加、南非和中国共 152 名与会代表的 104 篇论文。这些论文主要介绍信标跟踪记录技术及其应用的现状和未来趋势。会议以不同研究对象分专题进行交流, 共分为鲸类、鳍脚类、鸟类、爬行类、鱼类和其他类 6 个专题, 其中鸟类专题论文最多, 其次是鱼类专题。有关水生哺乳动物的研究论文共 22 篇, 除了 4 篇介绍记录技术外, 其他论文主要介绍信标跟踪记录的应用研究, 包括潜水行为、捕食策略、能量代谢、栖息地标识和发声策略研究。本文是近年来水生哺乳动物信标跟踪记录研究领域相关论文的综述, 除介绍水生哺乳动物信标跟踪记录技术及其应用研究现状外, 还对其不足之处和可能的发展趋势进行了讨论。此外, 还重点介绍了我国珍稀动物长江江豚(*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*)信标跟踪研究的一些进展。

1 信标跟踪记录技术的发展简史和现状

早在 1963 年人们就开始使用机械式的时间-深度记录仪(Time-depth recorder, TDR)记录南极威德尔海豹(*Leptonychotes weddellii*)的潜水时间和潜水深度[1,2]。这是首次针对海洋哺乳动物开展的信标跟踪记录研究, 记录时间短, 仅记录 1h 息此后, 这种类型的记录仪发展较快。20 世纪 70 年代, 一种改进的 TDR 被用于记录南极皮毛海狮(*Arctocephalus gazella*)和南极威德尔海豹潜水活动, 记录时间达 14d[1]。80 年代, 随着微处理器技术的发展, 记录仪原有的机械式记录方式被电子数字式记录方式所取代。尽管记录时间没有大的突破, 仍限于 2—3 周, 但是小型化技术使得记录仪的体积和重量大为减小, 存储容量增加, 能同时记录更多的测量变量。到了 90 年代, 新型的 TDR 能连续几个月采集数据, 可以记录南象海豹(*Mirounga leonina*)整个迁移周期内的每一次潜水活动[1]。卫星传送技术对记录仪的发展具有推动作用, 借助卫星传送, 人们可以精确地确定动物在地球上的位置, 并及时获得动物的活动和生理数据。使用卫星接收的无线电信标和 TDR, 跟踪鲸类动物的时间可达 6—12 个月或更长[3—5]。

收稿日期: 2004-04-01; 修订日期: 2004-06-03
基金项目: 中国科学院创新领域前沿项目(01220303); 中日合作项目(020104)资助
作者简介: 王克雄(1963—), 男, 汉族, 湖北黄梅人, 助理研究员, 硕士, 主要从事鲸类行为学研究
通讯作者: 王 丁, wangd@ihb.ac.cn

为了延长记录时间，除增大内存外，还必须尽可能延长记录仪电池供电时间。借助卫星接收信号的记录仪通常只在动物露出水面时才激活信号发射功能，以节省电力，延长采样时间[6]。有些记录仪还能通过动物本身的运动产生电能，供记录仪使用[6]。

信标跟踪记录技术的另一个显著进展是感受器功能增多。最简单的感受器是压力感受器和水温感受器，能采集水深和水温信息[7]。这是海洋哺乳动物行为记录仪最基本功能。随着技术发展，信标跟踪记录仪的感受器也具多样化。速度和加速度感受器能采集动物游泳速度和身体移动加速度数据，加速度包括背—腹向和头—尾向两个方向的数据，这些数据可用于重建动物的水下运动模式[8,9]。三维地磁感受器或方向感受器（Compass bearing）能确定动物的巡游方向[10,11]。声音感受器（水听器），或称为声学跟踪记录仪（Acoustical data-logger），能记录动物发出的声信号和环境噪声[8,12,13]，双通道水听器还能确定声源的方位。有一种近磁场感受器能感受局部磁场强度变化，比如在动物下颌固定一块稀土磁铁，在上颌固定这种感受器，就能记录动物口腔张合的次数[14]。这种感受器还能记录鳍肢和尾鳍摆动情况。近年来，摄影和录像设备也被嵌入信标跟踪记录仪。微型近红外摄像机能连续记录动物群体活动和环境动态变化[1,10]。微型数字照相机能拍摄静态照片[15]。部分信标跟踪记录仪还集成了微型GPS天线，能记录动物的位置信息[10]。除了记录动物的行为和水温等信息外，部分记录仪的感受器还能采集其他环境理化信息。溶氧感受器能测量水体溶氧水平，光强感受器能测量水下光照水平[10]，另外还有pH值感受器、盐度感受器、电导率感受器、浊度感受器和叶绿素感受器等。还有一类感受器用于记录动物的生理状况，比如心率、胃温，不过目前这类感受器较少应用于海洋哺乳动物研究[16]。

虽然记录仪的设计和制造技术发展较快，但是记录仪的固定技术却鲜有突破性进展。实际上，记录仪固定的位置和固定的稳固程度对连续采样时间和所获数据的质量有着非常重要的影响。固定记录仪的方法因研究对象和研究目的不同而多种多样。可以使用粘合剂将记录仪粘附在动物身上；或者给动物套上布质背心，然后把记录仪固定在背心上；或者用橡皮吸杯将记录仪吸附在动物身上；或者使用尼龙栓、钛合金栓等将记录仪固定在动物的背鳍上[4,7,12,17—20]。这些固定方法需要捕捉动物才能完成。在移动较慢的大型水生哺乳动物身上固定记录仪，通常可以直接借助弩、长杆或气枪等将记录仪及其相连的附着器（吸杯、叉或矛等）固定在动物的体表或插入动物皮下[4]，而不必捕捉动物。与记录仪附着器相连的通常有一个释放器，它能在预定的时间发挥作用，使记录仪与附着器脱开，以便回收记录仪[7]。回收记录仪的方法主要有超声定位、无线电信号定位、全球卫星定位或者偶然拣拾等。

2 信标跟踪记录技术应用的研究进展

目前，信标跟踪记录技术已较多地应用于水生哺乳动物行为学，其次是生理学研究和辅助性海洋测量。

最广泛的应用是研究水生哺乳动物的潜水行为，以获得动物的潜水深度、游泳速度、日巡游距离以及水底停留时间等潜水参数[21—23]。鲸类和鳍脚类的潜水可分为“V”型和“U”型。“V”型潜水水下停留时间短，下潜浅，可能是巡游过程中的潜水。“U”型潜水水下停留时间长，下潜深，可能是捕食潜水[7,24]。鲸类一次长潜水之后，通常会出现多次连续浅潜水，这可能是为了更彻底地排出二氧化碳和补充氧储存[25]。较多研究者认为，鲸类和鳍脚类在下潜起始阶段就预定了该次下潜深度。Otani等发现，鲸类深潜时，它们都采用较大的下行角度和较快的下行起始速度，以便快速深潜，而浅潜时，潜水起始动作较少有此特征[7,23]。对澳洲海狮（*Neophoca cinerea*）的潜水研究也表明，如果这些动物在潜水之前就知道猎物所在深度，它们会以一种优化的速度潜水，即先快速下潜至接近猎物所在深度，然后慢速下潜接近猎物，并且前鳍和尾的摆动很协调，否则，澳洲海狮不但潜水速度不稳定，而且前鳍和尾的摆动也不协调[26]。在潜水过程中，动物的游泳速度有时会急剧下降，然后又急剧上升。一般认为，游泳速度的这种急剧变化可能是动物在捕食[21,27]。

实际上，就水生哺乳动物而言，捕食行为和潜水行为有时是密不可分的，使用信标跟踪记录仪研究潜水行为的同时也可以研究捕食行为。Georges和Guinet根据亚南极毛皮海狮（*Arcotocephalus tropicalis*）所携带记录仪测定的水温和水深数据，结合卫星遥测的海域海水表面温度（Sea surface temperature，SST）数据，估算出哺乳期雌性亚南极毛皮海狮的捕食范围可远离其繁殖岛屿达530km[28]。Crolla等使用TDR记录了7头蓝鲸（*Balaenoptera musculus*）和15头长须鲸（*Balaenoptera physalus*）的潜水行为，发现它们的潜水行为很相似，均可分为捕食潜水和巡游潜水[29]。捕食潜水较深，在水下停留时间长，期间有一系列纵向的短距离冲刺行为，这些短距冲刺行为被认为是捕食。露脊鲸（*Eubalaena glacialis*）白天深潜水，夜间浅潜水的潜水模式可能与其食物——浮游动物白天分布于深水层，夜间迁移至浅水层有关[25]。Minamikawa等发现条纹原海豚（*Stenella coeruleoalba*）也有明显的潜水昼夜节律，但是白天浅潜，深度22.6m左右，夜间深潜，深度126.7m左右，并且夜间下潜速度快，这种潜水模式表明条纹原海豚可能夜间捕食[30]。Mori和Boyd使用信标跟踪记录仪研究了南极毛皮海狮的捕食策略。他们发现，该种海狮能根据食物分布和丰度的变化，调整捕食活动的时间分配，以期获得最高的能量摄入率[31]。

更直观的行为和生态学观察是使用照相和录像跟踪记录仪。Watanabe等在8头威德尔海豹身上安装了数码静态图片跟踪记录仪（Digital Still picture Logger，DSL），记录了几千张水下照片[9]。这些照片基本上是这些海豹的视觉再现。照片经图像处理软件处理后，被转换成256级灰度照片，照片上那些可能是海豹猎物的对象被辨识和计数。基于辨识和计数结果，计算出每张照片的猎物指数（Prey index），然后根据海豹的纵向潜水路径和水深变化，通过比较那些照片的

猎物指数, 估计海豹猎物在水体中的垂直分布。他们发现, 威德尔海豹的潜水深度受猎物的垂直分布影响。威德尔海豹经常潜水超过 250m 深, 而在该水层所获照片的猎物指数高、猎物分布范围广, 说明猎物通常聚集在该水层。Hooker 和 Boyd 曾在南极皮毛海狮身上固定数码录像跟踪记录仪, 记录了潜水海豹前方的猎物场(Prey field)[32]。尽管记录到的猎物场因携带信标的个体不同和季节不同有显著差异, 但是南极皮毛海狮的主要食物——南极磷虾(*Euphausia superba*)在这些记录画面中出现的最高比例达到了 28%。这些记录画面根据图像辨识的可信性和磷虾生物量的估计值被分类, 每一次潜水过程中记录到的含有磷虾图像的照片的比例被作为猎物遭遇率(Prey encounter rate)的代表值进行分析。在有些情况下, 还可以看出, 随着潜水时间延长, 猎物遭遇率降低。

使用信标跟踪记录仪还开展了捕食行为以外的一些研究。Iwasaki 研究了瓶鼻海豚(*Tursiops truncatus*)在水面活动的时间支出, 并尝试藉此研究海豚的群体大小[33]。他将跟踪记录仪固定在海豚背鳍上, 并将记录仪露出水面超过 300ms 的行为定义为"出水(Surfacing)"。在 10d 观察时间内, 2 头海豚的出水时间比率(即累计出水时间和全部记录时间之比)分别为 4.8%(♀)和 5.4%(♂)。Iwasaki 认为, 如果海豚个体独自出水呼吸, 那么其出水时间比率(大约 5%)应该和群体中出水呼吸海豚数的比率(即出水呼吸的海豚数量与群体全部海豚数量之比)有某种对应关系, 并且可以据此估算实际群体大小。实际上, 仅仅统计出水时间还不足以估计实际群体大小, 至少还应该统计出水间隔时间, 后者的变化相对来说可能更重要些。目前, 这种估计实际群体大小的方法还停留在讨论阶段, 离实际应用尚有距离。Coltman 等研究了港海豹(*Phoca vitulina*)平衡捕食和生殖的策略[34]。他们发现, 繁殖季节到来前港海豹会频繁深潜捕食, 交配季节期间它们通常浅潜。浅潜期间, 雄海豹遭遇发情雌海豹的机会更多。有时, 雄海豹甚至停止捕食远游, 只在家域范围内游走和在浅水水域炫耀, 以此吸引哺乳后期的雌海豹。

鲸类动物在水下频繁发声, 发声是它们寻找和捕捉猎物、探测环境和维持生存的重要手段。使用信标跟踪记录仪同样可以记录它们的声信号。Akamatsu 等在使用 TDR 的同时, 还使用了声学跟踪记录仪记录了 2 头长江江豚的发声事件[12]。

利用信标跟踪记录仪开展水生哺乳动物生理学方面的研究目前较少, 主要工作集中于动物的体重变化, 并据此研究其能量代谢。Biuw 等根据一头南象海豹仔首次远游期间身体被动垂直上浮速率(Passive vertical drift rate)的变化, 建立了一个估计其身体脂肪含量的模型[35]。该模型表明, 经过一段时间的远游, 象海豹体脂含量会从远游之初的 34%—42%下降到 19%—29%。Bradshaw 等也用相似的方法估算了 25 头雌性南象海豹体脂变化, 并据此估算出南象海豹在不同水域的捕食情况, 继而建立了一个简单的能量模型[36]。利用这些模型可以估计水生哺乳动物的能量代谢率。

信标跟踪记录仪除了研究动物本身的活动外, 还可研究动物和环境之间的关系, 甚至可用于辅助性的海洋学测量。Field 等借助信标跟踪记录仪研究了南象海豹仔的空间使用情况[37]。他们跟踪了 52 头南象海豹仔, 共获得超过 82 头/次海豹仔个体的入海路线数据。使用这些数据, 他们创建了每一头象海豹仔的入海路线图和全部象海豹仔在水下的空间分布图, 描述了象海豹仔的空间使用情况及其与年龄和海洋环境条件的关系。该研究的目的是使用这些数据研究何种原因导致幼龄南象海豹死亡率增加, 因为幼龄海豹死亡率增加已经导致该种海豹种群数量下降。Boyd 等将 TDR 固定在南极毛皮海狮身上, 藉此测量南极南乔治岛(South Georgia)附近海水温度变化[38]。为了对照, 他们还使用了一台波浪式海洋记录仪(Undulating Oceanographic Recorder, UOR)测量水温, 同时还利用卫星传感图像获得海水表面温度(Sea Surface Temperature, SST)数据。TDR 和 UOR 的测量结果相关性很好, 而表层 5m 的 TDR 水温测量结果和 SST 却没有明显相关性(可能的解释是 SST 是基于水的表面反射, 而 TDR 测量的是 5m 以下的水温)。Boyd 等利用 TDR 和 UOR 的水温测量结果, 较详细描述了该水域水温的季节变化和区域变化, 并认为通过鳍脚类等海洋哺乳动物携带记录仪的方法能获得较大空间和较长时间的实时海洋测量数据[38]。Hooker 和 Boyd 及 Lydersen 等分别在白鲸(*Delphinapterus leucas*)和南极毛皮海狮身上固定电导—温度—深度(Conductivity-temperature-depth, CTD)记录仪, 测量海水的盐度[39, 43]。尽管测量精度不是非常理想, 但是这一应用的前景还是很广阔的。

3　有关长江江豚的信标跟踪记录研究

长江江豚是我国特有的珍稀物种, 仅生活于长江中、下游干流和鄱阳湖、洞庭湖及其主要支流[40, 41]。为了详细研究自然状态下长江江豚的活动规律, 从 1996 年开始, 作者先后使用无线电信标、行为信标、声学信标和卫星信标, 跟踪记录了长江江豚的呼吸、潜水、发声和迁移数据[12, 20, 21]。以下简述这些跟踪研究的方法和所获结果。

长江江豚不但个体小, 而且没有背鳍, 因此固定这些信标非常困难, 曾尝试过多种固定方法, 最后选择了背心固定方法和橡皮吸杯固定方法[12, 20, 21]。固定无线电信标的背心是棉质的, 由多条固定带和中央信标基座组成。固定卫星信标的背心有一些改进(张先锋等, 未发表资料), 比如: 制作材料是一种类似于尼龙的松紧织物, 能较好地贴紧动物身体, 减少游泳阻力, 延长固定时间; 信标固定在一块多孔铜板上, 铜板与背心之间的连接层是一块在水中较容易腐烂的羊皮。采用橡皮吸杯固定比较简单, 吸杯直径 8cm, 信标及其浮性基座通过螺栓和树脂固定在吸杯的基座上, 吸杯的开口端吸附于江豚体侧表面。这些固定方法在跟踪实验前都在人工饲养的江豚身上作过较长时间的测试, 因此, 实际应用时都可以维持或长或短的固定时间。但是, 如果信标较重, 在水中阻力较大, 或现场操作不当, 均会导致信标固定时间大大缩短。无线电信标跟踪了 3 头江豚, 跟踪时间分别为 60.6h,

263.3h和351.5h。1998年开展的行为信标和声学信标跟踪实验跟踪了2头江豚，最长记录时间分别为1,236 min和53.4 min。2003年开展的类似实验，信标的设计有较大的改进，行为信标增加了加速度记录功能，能记录江豚尾鳍摆动情况，声学信标增加了双通道水听器，能定位声源。该次跟踪实验共跟踪了9头江豚，最长记录时间达到了36h。卫星信标跟踪了1头江豚，跟踪时间为20.9h。

无线电信标跟踪是在湖北石首天鹅洲故道进行的，主要记录被跟踪江豚的出水呼吸时间和大致的活动方位。根据所获得的11,994次呼吸间隔时间进行分析，江豚最常见的呼吸模式为，每2—6次短的呼吸间隔之后，会出现1次长的呼吸间隔。短呼吸间隔时间一般不超过20s，长呼吸间隔时间一般不短于40s。偶尔也有连续10次左右的中等长度的呼吸间隔，其时间通常介于短、长呼吸间隔之间。江豚短呼吸间隔次数在22:00—06:00期间多于1d中其他时段，中等长度呼吸间隔在02:00—06:00期间出现最多，而长呼吸间隔全天无明显差异，但是较长的长呼吸间隔通常出现在白天。张先锋等根据江豚短呼吸间隔和中等长度呼吸间隔主要发生在夜间的观察结果，初步认为半自然环境中江豚的休息行为可能多发生在夜间[20]。

行为信标和声学信标跟踪也是在湖北石首天鹅洲故道进行的。每头被跟踪江豚的身体两侧各固定一台行为信标和声学信标，前者主要记录江豚的潜水和游泳数据，后者主要记录江豚发出的声脉冲信号。两台信标的系统时间是一致的。行为信标能记录江豚潜水深度(分辨率0.05m)，游泳速度(分辨率0.05m/s)和水温(分辨率0.02℃)。对行为信标所获得的8,222次潜水记录分析表明，幼年江豚和成年江豚日巡游路程分别为94.4km和90.3km。江豚潜水行为可分为浅潜水(<2.7m)和深潜水(≥2.7m)，前者约占全部潜水次数的63.8%，后者仅占36.2%。江豚深潜水时，游泳速度比浅潜水时稍快。江豚个体平均游泳速度为1.25—1.29m/s，最大游泳速度可以超过3m/s。江豚深潜水期间，有时游泳速度会突然下降至小于0.25m/s，并且较快地又恢复到1m/s左右。这种行为可能是江豚在水下突然改变游动方向，并且是在捕食[21]。声学信标对声音非常敏感，它由水听器、前级放大器、10kHz高通滤波器、峰值保持电路和数码录音芯片组成。江豚活动期间，声学信标能完整地记录江豚发出的脉冲信号。分析记录数据表明，江豚在水下总是频繁地发出脉冲信号阵列。在较浅的水中，声学信标能清晰记录到江豚脉冲信号的水面回声，水面回声的延迟时间与声音在水面与动物所处水层之间的双向传输时间一致。这表明，江豚浅潜水时，频繁发声的原因之一可能是它们通过检测水面回声确定自己所处深度[21]。对信标记录的江豚行为数据和发声数据进一步分析还表明，江豚在巡游、出水呼吸和接近水下目标时可能还有其他特殊的发声策略。

卫星信标跟踪是在长江石首江段进行的，跟踪了1头成年雌性江豚(张先锋等，未发表资料)。在20.9h的跟踪期间，Argos卫星地面系统共接收到5次有效信号，其中1次是位置数据，4次是潜水数据。根据所获得的位置信息推算，江豚在18.1h内至少能巡游40km，即最小的顺流游速为3.3km/h。根据潜水数据推算，江豚潜水通常在0—10m水深，不过有时也会深潜至30—40m(张先锋等，未发表资料)。

由于各种类型跟踪信标的设计精度不同，加之实验水域不同和判断江豚是否出水的标准有差异，所以，有关江豚潜水时间、呼吸间隔和游泳速度等结果在不同跟踪试验中有些差异(也许这些差异的确存在)。尽管如此，信标跟踪研究江豚的潜水，迁移和发声等行为的实验，仍然是非常值得继续开展的。

4 有关信标跟踪记录技术和应用的几点讨论

信标跟踪记录技术发展快，应用范围广，但是其不足之处也是显而易见的。

信标跟踪记录设备对动物的行为和发声的影响，可能导致所获得的数据并非动物的真实情况，但是，目前绝大部分信标跟踪记录应用研究都将所获得的数据看成是动物的正常情况。Schneider等研究了瓶鼻海豚对TDR的反应[42]。他们使用弩或2.5m的长杆往海豚身上固定带橡皮吸杯的TDR。他们观察了固定记录仪前后海豚的行为以及同群其他海豚的行为。结果表明，TDR所获得的数据的真实性是值得怀疑的，不能代表动物的正常情况。尽管Schneider等只观察了较短的时间，并不能代表TDR对动物的长期影响，但是，信标跟踪记录仪对动物的影响及其所获数据的真实性确实需要进一步研究。相对来讲，下述几种情况信标跟踪记录仪的影响可能会小些。记录仪的体积和重量足够小，甚至可以植入动物皮下；被跟踪的动物足够大，其行为较少受到记录仪的影响；固定方法不会造成动物长期疼痛感，动物可能不太在意记录仪的存在；跟踪时间足够长，被跟踪动物已经习惯了记录仪的存在且群体中其他个体并不对记录仪有极大的兴趣，很少在意记录仪的存在。

数据存储格式不统一，缺少模型校正，数据分析方法滞后。目前生产跟踪记录仪的设备厂家比较多，使用的感受器种类也比较多，记录数据的存储格式也因厂家而异，尚未有一个共同遵守的协议，数据解码缺少通用软件。这些缺陷必然会影响研究人员之间的数据交换，同时也影响通用性强的记录设备和通讯接口面世。记录仪所获数据的真实性缺少检验模型。比如水温感受器，因为可能受动物体温的影响，其数据并不是真实的水温，需要校正。压力感受器可能受波浪的影响，并不能完全和动物出水行为相对应。其他类型的感受器也可能因动物的快速移动而形成特定的“场效应”，影响记录数据的真实性。记录仪固定的位置和方向也很重要，尤其是对速度、加速度等的影响更大。如果因为动物的移动，速度感受器叶轮的方向从指向正前方变成指向侧下方，其所获速度数据将完全不真实。同时，对记录数据的处理目前还缺少专门的软件，尤其是对三维数据的处理，更是困难。已经发表的论文，实际上只利用了极少量的数据，因为其他大量数据过于复杂，研究人员目前很难利用现有的方法构建

动物的真实行为模型。

目前的记录仪绝大部分定位于动物的个体活动和环境测量, 较少关注动物的群体活动和生理变化。尽管影像和声学跟踪记录仪可以一定程度上记录动物的群体活动和声通讯, 但是动物的集群、求偶、交配、抚幼等群体活动却很难被记录。最简单的方法是在跟踪记录仪上安装某种感应器, 这种感应器可以感应附近是否有其他跟踪记录仪存在及其相隔的距离。如果能实现, 就可以确定动物的集群情况。在动物身体的不同部位固定影像探头, 可以记录动物的交配和抚幼等活动, 其前提条件是这些探头必须足够小和便于固定。其他的群体行为可能需要使用不同的感受器才能记录。水生哺乳动物生理学数据的获得, 最简单的是心率, 其次是胃温。胃温是通过在胃中放置感受器而获得, 感受器是通过动物吞咽的方法置于胃中的。其他的与生理学有关的数据, 比如心电图、呼出气体的 O_2 和 CO_2 比例、粪便的成分、食物摄入量、体重变化等需要特定的感受器才能获得。相信在不久的将来这些感受器将会面世。

尽管信标跟踪记录仪及其在海洋哺乳动物研究中的应用目前还存在诸多不足, 但是其发展和应用前景还是令人看好的。随着技术科学的发展, 记录仪的集成度会大大提高, 芯片型跟踪记录仪将会面世。这种记录仪集数据采集、存储、分析、传送功能于一体, 能很容易植入动物皮下或置于特定器官中, 进行特定的生理学和生物化学测量, 并且能长期使用。另一类集成度较高的信标跟踪记录仪将可能具有双向通讯功能, 它除了被动地采集和存储数据外, 还能接受远程控制, 完成某些特定数据的采集, 甚至能接受远程控制随时随地从动物身体上脱落。这类记录仪的可操作性更强, 适合研究动物的栖息环境和社群关系。还有一个可能的发展是记录仪的多个感受器可以安置于动物身体的不同部位, 感受器之间具有相互通讯的功能, 这种记录仪记录的数据是三维的, 利用这些数据很容易重新构建动物的活动模型。此外, 记录仪的固定方式可能也会有更多的改进。目前的固定方式是一次性的, 动物被释放后, 无法再调整记录仪的固定位置, 也无法确认记录仪是否移动。新的智能型记录仪应该具有一定的自我调整姿势的能力, 能保证固定的位置和方向不至于出现大的改变, 以免所获数据不真实。除了记录仪本身的技术发展外, 用于处理和分析记录仪所采集数据的各类通用性强的软件也可能会很快面世。这些软件可以利用记录仪采集的数据, 重现动物的真实世界, 仿真动物机体的物理和生理运动过程。随着水生哺乳动物研究范围的扩大, 人们对各类跟踪记录仪的需求将是无止境的, 跟踪记录仪的应用也不仅仅限于行为学、生态学和生理学研究, 还可能会应用于水生哺乳动物的医学和遗传学等学科的研究。

参考文献:

[1] Kooyman G L. Genesis and evolution of bio-logging devices: 1963—2002[J]. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 2004, **58**: 15—22

[2] Naito Y. New steps of the bio-logging science [J]. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 2004, **58**: 50—57

[3] Mate B. Identifying habitats and habits of endangered large whales with satellite-monitored radio tags[R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo. 2003, 12 (abstract)

[4] Heide-Jorgensen M P. Instrumentations of North Atlantic cetaceans: triumphs and disasters [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 13 (abstract)

[5] Wilson R P. Reconstructing the past using futuristic developments: trends and perspectives in logger technology for penguins [J]. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 2004, **58**: 34—49

[6] Hayashi T, Yokoyama K, Yokoyama S. Whale ecology observation satellite system by means of a dedicated satellite [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 32 (abstract)

[7] Otani S, Naito Y, Kawamura A, *et al*. Diving behavior and performance of harbor porpoises, *Phocoena phocoena*, in Funka Bay, Hokkaido, Japan [J]. *Marine Mammal Science*. 1998, **14**(2): 209—220

[8] Wang K, Wang D, Akamatsu T. Individual acoustical characteristics of the free-ranging and captive Yangtze finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 13 (abstract)

[9] Watanabe S, Izawa M, Kato, A, *et al*. Behavioral analysis of domestic cats *Felis catus* using a miniaturized two-channel acceleration data logger: preliminary reports [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, **49** (abstract)

[10] Davis R W, Hagey W H, Horning M. Monitoring the behavior and multi-dimensional movements of Weddell seals using an animal-borne video and data recorder [J]. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*. 2004, **58**: 148—154

[11] Mitani Y, Watanabe Y, Sato K, *et al*. Effects of ice location on foraging behavior: results from the reconstructed three-dimensional dive paths of free-ranging Weddell seals [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 17 (abstract)

[12] Akamatsu T, Wang D, Wang K, *et al*. A method for individual identification of echolocation signals in free-ranging finless porpoises carrying data loggers [J]. *Journal of Acoustical Society of America*, 2000, **108**(3): 1353—1356

[13] Akamatsu T. Sensory ethology of odontoetes [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, **31**(abstract)

[14] Liebsch N. Hall's contribution to monitoring animal movement or how magnets can tell when animals eat and swim [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 50 (abstract)

[15] Watanabe Y, Mitani Y, Sato K, *et al*. Dive depths of Weddell seals in relation to vertical prey distribution as estimated by image data [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 17 (abstract)

[16] Kojima T, Ikeda A, Fujii Y, *et al*. Continue records of heart rates and swimming behavior in free-ranging fish, red sea bream *Pagrus major*, measured with micro data-logger [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, 2003, National Institute

of Polar Research, Tokyo, **48** (abstract)

[17] Priede I G, Swift S M. Wildlife Telemetry: Remote Monitoring and Tracking of Animals [M]. Chichester: Ellis Horwood, 1992, 135—146

[18] Pryor K, Norris K S. Dolphin Societies: Discoveries and Puzzles [M]. London: University of California Press, 1991, 79—111

[19] Reeves R, Smith B, Kasuya T. Biology and Conservation of Freshwater Cetaceans in Asia [M], Occasional Paper of the IUCN/SSC, Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 2000, 116—120

[20] Zhang X, Wang D, Yang J, *et al*. Study on radio-tracking finless porpoise *Neophocaena phocaenoides*, at the Yangtze River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(5): 490—496 [张先锋, 王 丁, 杨 健 等. 长江江豚的无线电跟踪研究. 生态学报, 1996, **16**(5): 490—496]

[21] Akamatsu T, Wang D, Wang K, *et al*. Diving behaviour of freshwater finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides*) in an oxbow of the Yangtze River, China [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, **59**: 438—443

[22] Hooker S K, Baird R W. Diving and ranging behaviour of odontocetes: a methodological review and critique [J]. *Mammal Review*, 2001, **31**(1): 81—105

[23] Otani S, Naito Y, Kato A, *et al*. Diving behavior and swimming speed of a free-ranging harbor porpoise, *Phocoena phocoena* [J]. *Marine Mammal Science*, 2000, **16**(4): 811—814

[24] Vincent C, Fedak M A, Lovell P, *et al*. Individual variability in grey seal (*Halichoerus grypus*) diving behaviour highlighted by the use of the Time Allocation at Depth Index (TAD) in satellite tracking [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 16 (abstract)

[25] Winn H E, Goodyear J D, Kenney R D, *et al*. Dive patterns of tagged right whales in the Great South Channel [J]. *Continental Shelf Research*, 1995, 15(4/5): 593—611

[26] Minamikawa S, Shaughnessy P, Gale N, *et al*. Foraging dives of Australian sea lions: theoretical prediction of swimming speed and predictability of target depth [J]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, 2003, Tokyo, 16 (abstract)

[27] Davis R W, Fuiman L A, Williams T M, *et al*. Hunting behavior of a marine mammal breath the Antarctic fast ice [J]. *Science*, 1999, **283**: 993—998

[28] Georges J Y, Guinet C. Foraging ecology in subantarctic fur seals in relation to environmental conditions: concurrent use of bio-logging and satellite oceanography [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 16 (abstract)

[29] Grolla D A, Acevedo-Gutierrez A, Tershy B R, *et al*. The diving behavior of blue and fin whales: is dive duration shorter than expected based on oxygen stores? [J] Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 2001, **129**: 797—809

[30] Minamikawa S, Iwasaki T, Tanaka Y, *et al*. Diurnal pattern of diving behavior in striped dolphins, *Stenella coeruleoalba* [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 33 (abstract)

[31] Mori Y, Boyd I L. The behavioural adjustments for variation in prey availability detected by using bio-logging data: the case of the Antarctic fur seals [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 14 (abstract)

[32] Hooker S K, Boyd I L. The environmental basis for fur seal ecology-using digital video cameras to establish prey encounter rate [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 18 (abstract)

[33] Iwasaki T. Surfacing time budget of the bottlenose dolphin [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 33—34 (abstract)

[34] Coltman D W, Bowen W D, Boness D J, *et al*. Balancing foraging and reproduction in the male harbour seal, an aquatically mating pinniped [J]. *Animal Behaviour*, 1997, **54**: 663—678

[35] Biuw M, Fedak M, McConnell B, *et al*. Blubber and buoyancy: estimating body condition from simple dive characteristics [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 15 (abstract)

[36] Bradshaw C J A, Hindell M A, Sumner M D, *et al*. Relating behavioural signals derived from dataloggers to foraging success models for southern elephant seals [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 15 (abstract)

[37] Field I, Hindell M, Bradshaw C, *et al*. Spatial use of the Southern Ocean by juvenile southern elephant seals from Macquarie Island [R]. International Symposium on Bio-logging Science, March 17—21, Tokyo, 2003, 16 (abstract)

[38] Boyd I L, Hawker E J, Brandon M A, *et al*. Measurement of ocean temperatures using instruments carried by Antarctic fur seals [J]. *Journal of Marine Systems*, 2001, **27**: 277—288

[39] Lydersen C, Anders N O, Lovell P, *et al*. Salinity and temperature structure of a freezing Arctic fjord-monitored by white whales (*Delphinapterus leucas*) [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**: 2119

[40] Wang D, Liu R, Zhang X, *et al*. Status and conservation of the Yangtze Finless porpoise [J]. *Occasional Papers of IUCN/SSC*, 2000, **23**: 81—85

[41] Yang J, Xiao W, Kuang X, *et al*. Studies on the distribution, population size and the active regularity of *Lipotes vexillifer* and *Neophocaena phocaenoides* in Dongtin Lake and Poyang Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2000, **9**(4): 445—450 [杨 健, 肖 文, 匡新安, 等. 洞庭湖、鄱阳湖白鳖豚和长江江豚的生态学研究. 长江流域资源与环境, 2000, **9**(4): 445—450]

[42] Schneider K, Baird R W, Dawson S, *et al*. Reactions of bottlenose dolphins to tagging attempts using a remotely-deployed suction-cup tag [J]. *Marine Mammal Science*, 1998 **14**(2): 316—324

[43] Hooker S K, Boyd I L. Salinity sensors on seals: use of marine predators to carry CTD data loggers [J]. *Deep-Sea Research I*, 2003, **50**: 927—939