

长江中华鲟超声波遥测技术

危起伟 杨德国 柯福恩

(中国水产科学研究院长江水产研究所, 荆州 434000)

Boyd Kynard, Micah Kieffer

(美国地质局洄游性鱼类研究中心)

摘 要 利用美国 Sonotronics 公司的超声波发射器、接收仪和水下听筒装配的一套超声波遥测定位系统, 在长江宜昌江段对中华鲟进行遥测试验, 方法可靠, 在葛州坝下江段其探测半径约达 1500 米。借助特制快艇和 GPS, 采用三角定位法, 可较准确地定位中华鲟行踪。超声波发射器的特定声波编码, 可将不同标志个体区别开。本试验 1995 和 1996 年标志了 15 尾即将参加自然繁殖的中华鲟。其中 1996 年标志 10 尾, 全部进行了定位追踪, 记录了各尾鲟在产前、产卵和产后的行踪, 各尾鱼持续定位 6~48 天, 平均 19.8 天, 总定位次数达 573 次。该方法也适用于其它的江河和其它鱼类和水生动物迁移规律、产卵场定位和产卵条件等研究。

关键词 中华鲟, 生物遥测, GPS, 超声波, 长江

生物遥测(Biotlemetry)是采用现代通讯手段对动物行踪进行监测的技术, 应用于陆生动物较多, 并较易实现。一般是采用无线电发射器拴在动物体上, 释放动物后用接收装置进行遥测追踪。水生动物的遥测追踪相对较困难, 这主要是电波在水中衰减影响接收距离, 并且还存在发射器电池寿命和水密封性能等技术难题。在美、英等发达国家, 后两个技术问题已得到了解决, 产品已商品化。目前, 在美国较清洁的河流中, 鱼类无线电遥测技术得到了较广泛的应用, 主要用于洄游性鱼类(如鲑、鲟和鳟)的洄游和分布、产卵场定位及过坝行为等研究 [Buckley 和 Kynard 1985, Kieffer 和 Kynard 1993, Stier 和 Kynard 1986]。追踪人员可在陆地、水上或空中进行遥测, 甚至可将接收装置与计算机连接, 进行无人值守的计算机监测。而对于海水和水体浑浊的河流, 无线电发射器效果欠佳。超声波对水的穿透能力较强, 因而 50 年代末期就用于鲑鳟鱼类的追踪 [Johnson 和 James 1960], 近年来应用日趋广泛 [Morressey 等 1993, O' Herron 等 1993, Moser 和 Ross 1995, Kieffer 和 Kynard 1993, 1996]。我国在该领域的研究刚刚起步。1993 年, 中、美科研人员在长江葛州坝下水域进行了初步试验, 发现无线电信号在长江的探测范围仅约 40 米, 而较简易超声波接收系统探测范围可达 150 米, 并用此系统定位了一处中华鲟产卵区, 证明了超声波遥测方法在长江使用是可行的 [Kynard 等 1995]。经过 1995 和 1996 年对设备和方法的改进, 探测范围达到了约 1500 米, 使该方法进入了实用阶段, 现报道如下。

1 试验设备和材料

基本设备主要包括超声波发射-接收系统、全球卫星定位系统(GPS)接收仪和追踪快艇等。

1.1 超声波发射-接收系统

包括超声波发射器(标志牌)、水下听筒和接收仪。

标志牌为 Sonotronics 高能超声波发射器,带磁性开关,持续发射时间 18 个月,发射 2 或 4 位数无重复代码,以标识不同个体。发射波频率分为 40kHz 和 78kHz 两种类型,规格 18mm×110mm,外部由高强度的韧性防水材料封装,且鱼体对标志牌无排斥反应,可外挂或体内埋置。

水下听筒为接收系统的关键部件。1993 年采用普通型水下听筒,1995 年以后系 Sonotronics 公司为长江特制,具高灵敏度,单向性较好,呈喇叭状,直径 15cm。

1993 年采用 Smith-Root TA60 型超声波接收仪[Kynard 等 1995]。1995 年更新为 Sonotronics USR-5W 型,接收频率 28-88kHz 无级调节,具有耳机、外置扬声器和脉冲输出。工作时一般采用高灵敏度可调耳机作为输出设备。

此外,水下听筒安装在船翼,深入水中 1 米左右,并自制一桨叶固定在听筒尾部,以使听筒前方与行船方向保持一致,利于追踪搜寻。

1.2 全球卫星定位系统(GPS)接收仪

GPS 可较为准确地显示行船地理坐标(经纬度),并可设定目标,具有导航功能,特别是长距离追踪必不可少。一般市售的民用 GPS 接收仪,由于美国的 SA 码政策,定位精度仅为 100 米,可满足一般目的的研究。我们采用的 GPS 接收仪(Meridian GPS)为美国内政部提供,定位精度 15 米。目前,国际市场出现了定位精度 25 米的民用 GPS 接收仪,价格也较为适宜。

1.3 追踪快艇

具备一艘性能优良的快艇,是追踪成败的关键。目前国产的柴油发动机噪声较大,不适于追踪船用。为保证运行的灵活性,船体不宜过大。我们采用的是特制玻璃钢快艇,艇长 6.3m,装配 YAMAHA 63.4kW 船外机一台。

此外,为测量水深和行船安全,宜配备一台测深仪或探鱼仪。我们配备了一台 HUMMINBIRD LCR400 型探鱼仪。

2 工作方法

2.1 遥测有效距离测试

1995 年 10 月,在葛州坝下中华鲟产卵场江段,选择一开阔江面,将 78kHz 和 40kHz 两种类型的标志牌各 2 枚系在绳端,抛锚固定于江底(水深约 15 米),记录 GPS 坐标,追踪艇逐渐远离标志牌,同时监听声波信号的强弱,记录探测点坐标。由此得出该系统的最大有效探测距离约为 1500 米,并得知,40kHz 发射器效果更佳。

2.2 鱼类的捕捉和标志放流

捕捞最好选用柔和渔具,以免鱼体受伤,造成行为不正常。起捕后不宜拴绑,应小心而迅速进行标志和放流。一般采用体外标志,将标志牌牢固拴在不易脱落处。我们在标志中华鲟时,用微型手持电钻在背骨板钻孔固定。标志前开启标志牌磁性开关,并检测其发射工作是否

正常。

2.3 追踪定位

刚标志放流的鱼, 一般先作降河移动, 根据鱼体的健康和体力状况, 一段时间后可恢复行为正常。追踪一般从上游开始, 作低速降河搜索。江面较宽处作“Z”字形搜索, 较窄处在江心搜索即可。搜索到信号时, 仔细辨别声波代码, 用三角定位法确定鱼的位置并记录 GPS 坐标、水深等情况, 必要时需测定表层和江底流速和其它有关水文因子。多次定位的结果即为鱼的迁移路线或分布区。追踪频次因研究目的而异, 对产卵活动研究, 一般每 2~ 4 小时定位一次, 而对于一般洄游规律和栖息场所的研究, 可 5~ 10 天定位一次。

3 应用

本研究的试验对象为中华鲟产卵群体。

3.1 标志和追踪的江段和时间

根据葛州坝截流后连续 14 年对中华鲟的自然繁殖调查证实, 葛州坝下宜昌江段(电厂泄水闸至胭脂坝) 为中华鲟自然产卵场[Wei 等 1997, 余志堂等 1986]。故而, 本试验主要在葛州坝电厂泄水闸至宜都市约 50 公里的长江江段范围内进行(见图 1)。此江段江面宽度约在 500~ 2000 米之间, 调查期间水最深处约 70 米, 主河道一般水深 10~ 15 米, 上游流速较大, 一般表层流速在 1~ 1.5 米/秒左右, 最大流速可超过 3 米/秒, 平均含沙量 0.85 千克/米³。在胭脂坝以上为宜昌港, 来往船只频繁, 造成了波浪迭起和较大的水下噪声。

被标志中华鲟的捕捞, 均在电厂泄水闸下至西坝庙嘴约 3 公里的江段进行, 在庙嘴沙滩进行标志。中华鲟的产卵季节在 10 月 10 日~ 11 月 15 日[Wei 等 1997]。我们在中华鲟产卵前夕, 在该江段可捕到中华鲟时开始捕捞, 进行择优标志。

3.2 中华鲟标志和追踪

1995~ 1996 年在上述江段, 共标志放流中华鲟 15 尾, 数据如表 1。根据研究目的需要, 除 1996 年 339 号鲟为雄性外, 其余 14 尾全为雌性, 且所标志个体全为当年参加繁殖的亲体, 即性腺发育均达到 IV 期末。

在标志放流结束后, 一般立即进行追踪, 以确认超声波发射器是否工作正常, 以后每天进行 4 次搜索。长江云池以下江段基本为沙质河床, 没有发现中华鲟产卵迹象。故我们搜索的最下限在宜都市江段, 如果在此期间被标志的中华鲟退到了此江段以下, 我们认为它们将不大可能回到宜昌产卵场参加当年的自然繁殖[Wei 等 1997, 余志堂等 1986]。根据经验, 标志后

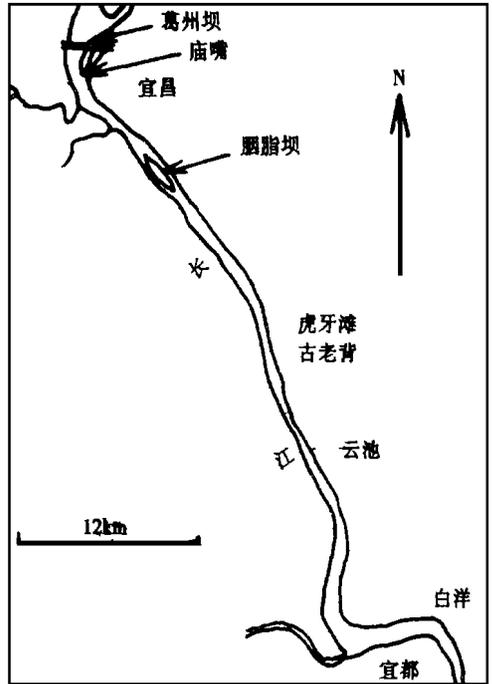


图 1 长江宜昌江段示意图

Fig. 1 The Yichang reach of Yangtze River

的中华鲟,因在捕捞操作过程中的体力消耗或受惊而顺流作短暂的降河漂移,之后行为恢复正常,作溯河迁移。如果受伤较严重,或捆绑时间过长,鱼体则不能恢复正常行为。

表 1 长江葛州坝下宜昌江段超声波标志和遥测中华鲟基本数据

Tab. 1 The basic data of ultra-sonic tagging and telemetry for *Acipenser sinensis* below Gezhouba Dam in the Yichang reach of the Yangtze River

标志日期	标志牌编号/ 超声波发射代码	全长 (cm)	起捕至放流 间隔时间(分)	回捕情况	最后定位 日期	定位次数
95- 10- 18	339	300	352	否	96- 10- 18	1
95- 10- 18	357	330	78	否	96- 11- 07	61
95- 10- 19	87	290	50	1 次	96- 10- 19	1
95- 10- 19	267	315	50	否	96- 10- 19	1
95- 10- 19	374	290	150	否	96- 10- 19	1
96- 10- 10	999	280	40	否	96- 11- 26	121
96- 10- 11	239	342	10	否	96- 10- 27	34
96- 10- 11	248	310	17	否	96- 10- 28	67
96- 10- 12	338	320	9	否	96- 11- 26	108
96- 10- 12	347	342	10	1 次	96- 10- 26	31
96- 10- 12	285	330	5	否	96- 10- 28	65
96- 10- 12	294	320	9	否	96- 10- 27	48
96- 10- 13	357	304	11	1 次	96- 10- 21	21
96- 10- 13	257	295	15	否	96- 10- 19	11
96- 10- 15	339	246	185	否	96- 11- 01	67

由表 1 知, 1995 年被标志鱼栓绑时间较长, 标志的 5 尾鱼, 仅 1 尾回到了产卵场, 我们每日对它进行定位。其余 4 尾, 均未回到产卵场。1995 年标志的 87 号鲟, 标志放流 2.5 小时后, 在距离放流点约 4 公里下游(胭脂坝)被渔民重捕, 3 小时后又放流, 此后未能返回产卵场。1996 年, 由于缩短了起捕至放流的时间, 并加强了被标志鱼的护理, 使标志的 10 尾中华鲟全部返回了产卵场。一般每日对各尾标志鲟均可进行定位, 由此较完整的记录了中华鲟在产前、产卵和产后的迁移轨迹或分布情况, 各尾鱼持续定位 6~48 天, 平均 19.8 天, 总定位次数达 573 次。其中 347 号和 357 号鲟分别在标志放流后的第 11 天和第 6 天重捕并再放流, 它们都在第二次放流后回到了产卵场, 追踪记录到了它们在产卵场活动的全过程。

一般认为, 中华鲟在产卵结束后即离开产卵场返回海洋[四川省长江水产资源调查组 1988], 这与我们追踪研究的结果是一致的。因而, 在中华鲟产卵结束、离开产卵场后, 我们未进行继续的追踪。

1996 年, 根据中华鲟产卵时的追踪定位结果, 现场在定位处江底采捞中华鲟卵获得成功, 再次证明了超声波遥测定位的精确性, 定位精度可在数米以内。有关江底采捞中华鲟卵和中华鲟追踪研究的详细结果, 将另文报道。

4 讨论

自从 Johnson 和 James[1960] 50 年代末期首次用超声波遥测技术进行水生动物追踪以来, 将近 40 年历史。他们当时采用较为原始的超声波发射-接收系统在哥伦比亚河 Bonneville 水坝上, 下河段对 3 种鲑鳟鱼类进行追踪试验, 系统的可探测距离仅为 25 米, 发生器

电池平均有效寿命仅 8 小时, 发射器无声波编码, 无法同时区分不同个体, 实用价值极其有限。稍后, Stasko 等[1973]用该手段研究了几种大麻哈鱼的近海岸洄游, 追踪时间在 3~50 个小时, 但发射器仍无声波编码。原苏联对伏尔加河的鲟鱼和鲑进行过超声波追踪[Poddubny 1971], 发射器依大小和工作频率分为 4 种类型(Signal-1~Signal-4), 持续发射寿命分 1200 小时(Signal-1)、250 小时(Signal-2)和 50 小时(Signal-3 和 Signal-4), 不同发射寿命的标志牌具有不同的重量(30~100 克), 并依信号持续长度和发射频率可将标志鱼分成组, 数量标志鱼数量少时可达个体识别。该工作动用了 4 艘船只, 2 艘船不分昼夜尾随标志鱼。在 1964~1969 年之间, 标志了 394 尾鲟鱼和 63 尾鲑, 以调查他们在伏尔加河水坝下的洄游路线和游泳速率, 但一般各尾鱼的追踪只可进行 1~2 天。在 80 年代中期以前, 可能是由于微型超声波发射器制造技术限制了它在水生动物追踪方面的应用, 直到 80 年代中、后期, 应用才逐渐增多。

近 20 年来的工作主要集中在北美及英国, 研究的对象主要包括鲑鳟鱼类[Priede 等 1988]、鲨鱼[Morressey 等 1993]和鲟鱼类[Kieffer 和 Kynard 1993, 1996]等。1987~1989 年间, Morressey 等[1993]在美国巴哈马群岛海岸, 采用 Sonotronic 公司微型超声波发射器(XTAL-87, 频率 68.1~78.1 kHz), 研究柠檬鲨的领域性(Home Range)。内置标志 38 尾幼鲨(体长 PCL46.8~100.6cm), 对每尾鲨定位 1~153 天, 总定位 2281 次。Kieffer 和 Kynard[1993, 1996]在美国东海岸的一条小河(Merrimack River), 同样采用 Sonotronic 公司超声波发射-接收系统, 研究了该河流中的濒危物种短吻鲟和大西洋鲟(*Acipenser oxyrinchus*)周年洄游和自然繁殖, 两种鲟各标志了 23 尾, 在 46 公里的河段范围内, 追踪时间最长达 41 个月。

但是, 上述的国外工作, 研究水体的水文和声学背景, 远不如长江葛州坝下的复杂。本文作者利用美国 Sonotronics 公司生产的超声波发射器、接收仪和水下听筒装配的一套超声波遥测定位系统, 在长江宜昌江段的探测范围(半径)约 1500 米, 方法稳定可靠。虽然起步较晚, 但是目前的技术水平与他们同步的。限于现有项目研究目的和设备数量的限制, 没有全天候对中华鲟进行追踪以及更长距离和时间的追踪定位, 但是就方法本身而言, 进行 3 年以内的全长江和近海的连续追踪是可能的。

具备一艘噪声小、性能良好的快艇, 是取得追踪成功的先决条件。1993 年, 我们曾使用 80 马力的柴油机动铁船, 操纵极其不便, 且柴油机的噪声极大地降低了超声波信号的接收效果。

对标志鱼小心捕捞和操作, 在起捕后迅速标志和放流, 以保证标志鱼的行为迅速恢复正常, 是遥测追踪取得成功的关键。

本研究的试验对象为中华鲟成体, 它是一种底层活动的健游鱼类, 且所采用的标志牌体积和质量都较小, 鱼体对标志牌无排斥反应。预期该方法也将适用于其它鱼类和水生动物。

由于宜昌江段自然和人为干扰, 如高含沙量、高流速、江底形态复杂、行船和水轮发电机噪声等, 造成了水环境复杂的声学背景的特性。预期本试验建立的方法, 将适用于除长江以外的我国大多数江河湖库鱼类和水生动物的遥测追踪研究。该方法的建立, 为研究我国大江大河鱼类和水生野生动物的自然繁殖、洄游和分布情况, 增添了一项新的研究手段, 使研究结果更为科学和精确。

根据最新消息, 新近研制的微型超声波发射器, 发射距离已翻番, 寿命更长, 这将使水生动物遥测研究迈上一个新台阶。

本研究系国家自然科学基金资助项目(编号:39570564)、三峡工程生态与环境资助项目、美-中自然保护计划等资助。

参 考 文 献

- 四川省长江水产资源调查组. 1988. 长江鲟鱼类生物学及人工繁殖研究. 成都: 四川科学出版社. 284.
- 余志堂, 许蕴旰, 邓中 等. 1986. 葛州坝水利枢纽下游中华鲟繁殖生态的研究. 北京: 科学出版社. 鱼类学论文集, (5): 1~13.
- Kynard, 危起伟, 柯福恩. 1995. 应用超声波遥测技术定位中华鲟产卵区. 科学通报, 40(2): 172~ 174.
- Buckley J, Kynard B. 1985. Habitat use and behavior of pre-spawning and spawning shortnose sturgeon, *Acipenser brevirostrum*, in the Connecticut. In: North American sturgeons: biology and management, (eds) Binkowski F P, Doroshov S I, W Junk Publ., Dordrecht, Netherlands. 111~ 117.
- Johnson, James H. 1960. Sonic tracking of adult salmon at Bonneville Dam, 1957. Fishery Bulletin of the Fish and Wildlife Service, Washington. 60: 471~ 485.
- Kieffer M, Kynard B. 1993. Annual movements of shortnose and Atlantic sturgeons in the Merrimack River, Massachusetts. Tran Am Fish Soc, 122: 1088~ 1103.
- Kieffer M, Kynard B. 1996. Spawning of the shortnose sturgeon in the Merrimack River, Massachusetts. Trans Am Fish Soc, 125(2): 179~ 186.
- Morressey, John F, Samuel H G. 1993. Home range of juvenile lemon shark, *Negaprion brevirostris*. Copeia, (2): 425~ 434.
- Moser M L, Ross S W. 1995. Habitat use and movements of shortnose and Atlantic sturgeons in the lower Cape Fear River, North Carolina. Tran Am Fish Soc, 124(2): 225~ 234.
- O' Herron J C, Able K W, Hastings R W. 1993. Movements of shortnose sturgeon (*Acipenser brevirostrum*) in the Delaware River. Estuaries, 16(2): 235~ 240.
- Poddubny A G. 1971. Ecological topography of fish populations in reservoirs, Nauka Publishers, Leningrad Section, Leningrad. 201~ 257.
- Priede I G, J F De L G Solbe, Nott J E, et al. 1988. Behaviour of adult Atlantic salmon, *Salmo salar* L., in the estuary of the River Ribble in relation to variations in dissolved oxygen and tidal flow. J Fish Biol, 33 (Supplement A): 133~ 139.
- Stasko A B, Hasler R M, Stasko D. 1973. Coastal movements of mature Fraser River pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) as revealed by ultrasonic tracking. J Fish Res Board Can, 30: 1309~ 1316.
- Stier D, Kynard B. 1986. Use of radio telemetry to determine the mortality of Atlantic salmon smolts passed through a 17 - MW Kaplan Turbine at a low-head hydroelectric dam. Tran Am Fish Soc, 115: 771~ 775.
- Wei Q W, Ke F E, Zhang J M, et al. 1997. Biology, fisheries and conservation of sturgeons and paddlefish in China. Environmental Biology of Fishes, 48: 241~ 255.

TECHNIQUE OF ULTRASONIC TELEMETRY FOR CHINESE STURGEON, *ACIPENSER SINENSIS*, IN YANGTZE RIVER

WEI Qi-Wei, YANG De-Guo, KE Fu-En

(*Changjiang Fisheries Research Institute, CAFS, Jingzhou 434000*)

Boyd Kynard, Micah Kieffer

(*S. C. Anadromous Fish Research Center, US Geological Service, MA 01376 USA*)

ABSTRACT The ultrasonic telemetry system consisted of a sonic receiver, a hydrophone and sonic transmitters (tags), all of which were made by Sonotronics, Inc., USA. Ultrasonic tags (two types: 78kHz and 40kHz) were tested in the Yichang reach below Gezhouba Dam and found that the sonic signal could be detected an estimated 1500m range. The receiver-hydrophone system was mounted on a glassfiber boat (6.3 meter long, 63.4 kW outboard motor), using triangulation, enabled accurate locating of fish with GPS assistance. Tagged individuals could be identified by the signals from the sonic-coded tags. 15 of final sexual mature sturgeon were tagged below Gezhouba Dam at the Yichang reach of Yangtze River in October 1995 and 1996. The scanned area was from the dam to the reach at Yidu City, covering about 50 km in length. All of 10 fish tagged were located in 1996, and monitored their movements of each fish during their pre-spawning, post-spawning and spawning. The reach was surveyed 4 times each day. 10 of the tagged fish were located totally 573 times. Each of them was successively located for 6~48 days respectively, averaging 19.8 days. The telemetry technique used in Yangtze River could be used to studies on migration, locating breeding sites and spawning requirements of other fishes or aquatic animals in the Yangtze and other rivers.

KEYWORDS *Acipenser sinensis*, Biotelemetry, GPS, Ultrasonar, Yangtze River