

长江江豚迁地保护需要注意的几个问题

王康伟¹, 周开亚², 陈敏敏¹, 糜 励³, 于道平¹

(1. 安庆师范大学生命科学学院, 安徽 安庆 246133)

(2. 南京师范大学生命科学学院, 江苏 南京 210023)

(3. 铜陵淡水豚国家级自然保护区管理局, 安徽 铜陵 244001)

[摘要] 迁地保护是保护生物学的重要手段之一, 把小型鲸类从长江干流迁入故道, 是中国在世界上首创的保护措施。本文回顾了 30 年来长江江豚(*Neophocaena asiaeorientalis*)的迁地保护历史, 结合已有的研究成果和实践经验, 对半自然水域中的水文环境、食物资源和日常管理的共性问题进行讨论与分析。这些建议旨在引起管理部门的重视, 加强科学研究, 确保迁地保护更好的发展。

[关键词] 长江江豚, 迁地保护, 水动力, 渔业资源, 半自然水域

[中图分类号] Q958.8 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2024)02-0091-08

Beware of Several Problems in *Ex-situ* Protection of Yangtze Finless Porpoise

Wang Kangwei¹, Zhou Kaiya², Cheng Mingming¹, Mi Li³, Yu Daoping¹

(1. School of Life Sciences, Anqing Normal University, Anqing 246133, China)

(2. School of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(3. Tongling Freshwater Dolphin National Nature Reserve Administration, Tongling 244001, China)

Abstract: *Ex-situ* conservation is one of the most important measures in biological conservation. The *ex-situ* conservation measure of moving small cetacean from main stream of the Yangtze River to its oxbow was first explored by Chinese scientists and has been proved effective. This study reviewed the process of small cetacean over the past 30 years and analyzed the common problems, such as hydrodynamics environment, food resources and routine management. Recommendations were put forward according to the results. The study hope that these recommendations can be seriously considered by managers and scientific research can be strengthened to ensure sustainable development of small cetacean *ex-situ* conservation.

Key words: Yangtze Finless Porpoises, *Ex-situ* protection, hydrodynamics, fishery resources, semi-nature reserve

国际自然保护联盟(IUCN)把为保护野生动物物种而在原生群落以外地区建立并能够维持稳定种群的保护措施称之为迁地(易地)保护^[1]。利用迁地保护饲养、繁殖的陆生动物个体重建或增援野外种群的成功案例不少, 包括中国麋鹿(*Elaphurus davidianus*)和扬子鳄(*Alligator sinensis*)。在我国, 水生生物的迁地保护主要开始于白鱀豚(*Lipotes vexillifer*)。周开亚于 1986 年首次提出对极度濒危的白鱀豚进行迁地保护设想^[2], 并在 1986 年武汉淡水豚国际学术会议被国际同行确认为白鱀豚保护三大措施之一, 而且是一项十分紧迫的工作。在以后的历次会议, 如 1993 年南京白鱀豚保护评估国际学术会议^[3]、1995 年中国香港和 1997 年孟加拉国首都达卡亚洲淡水豚国际学术会议、2003 年华盛顿白鱀豚保护非正式会议、农业部 2001 年上海中国鲸类保护学术会议、2004 年武汉长江豚类保护国际会议以及第一、第二届海峡两岸鲸类保护学术会议都反复呼吁迁地保护的重要性。

1985 年, 原国家城乡建设环境保护部在安徽铜陵大通镇, 利用两洲之间狭窄的长江故道迁地保护白

收稿日期: 2023-09-09.

基金项目: 安徽省教育厅水生生物保护创新团队专项基金项目(070-185003).

通讯作者: 于道平, 教授, 研究方向: 鲸类保护生物学. E-mail: ahyudp@126.com

鬲豚(以下称铜陵夹江). 故道长 1.6 km,最大宽约 350 m,进出口两端用铁栅建成防逃设施,每年至少有半年时间与长江干流连通,所以又称这种专用水域为半自然水域(Semi-nature reserve). 试运行期间,发现故道淤积严重,不得已拆除铁栅,将进出口两端改为堤坝加涵闸. 2001 年引入 5 头长江江豚,目前有 11 头长江江豚(*Neophocaena asiaeorientalis*)生活在这里^[4]. 上世纪 90 年代初,为探索白鬲豚迁地保护经验,湖北石首天鹅洲故道引入 5 头长江江豚. 1997 年天鹅洲故道筑堤后,将长江与天鹅洲故道完全隔断,仅在下口修建了一个涵闸,每年丰水期与长江交换部分水体. 经过数次引入和种群自然繁殖,2021 年天鹅洲种群数量增加到 100 头以上^[5].

虽然白鬲豚种群下降速度快,迁地保护未来得及充分开展,就已经功能性灭绝. 然而,这些迁地保护设施建设之初就直接用于长江江豚的保护. 由于长江沿岸及通江湖泊的水利建设、水运发展、沿江城镇的人口聚增,必然给已建的 8 个豚类自然保护区带来巨大的压力与挑战,如今部分江段的长江江豚已消失,出现空白区^[6]. 气候极端干旱的年份,迁地保护区能发挥收容救助作用. 例如 2022 年长江流域干旱是气象记录以来最为严重的自然灾害,2023 年 1 月长江下游马当河段左汊就有 2 头江豚受困,并得到安庆西江迁地保护区及时救助. 长江大保护启动后,农业农村部非常重视迁地保护区建设,分别在安庆西江和湖北何王庙新建 2 个迁地保护区并引入长江江豚,并于 2023 年将湖北石首天鹅洲故道长江江豚部分个体迁入湖北何王庙和安徽安庆西江,既可防止极端干旱对湖北石首天鹅洲故道江豚危害,又能促进迁地保护区基因交流. 目前我国 4 处迁地保护区,约有 160 头江豚(表 1).

表 1 长江江豚迁地保护区现状
Table 1 Status of Ex-situ protection for the Yangtze Finless Porpoises in abandoned channel

内容	湖北石首天鹅洲	安徽铜陵大通	安徽安庆西江	湖北何王庙
建区时间	1 990	1 985	2 012	2 014
长/km	21	1.6	9.2	33
宽/m	400~1 500	100~350	300~800	700~1 250
最大水深*/m	12	8	14	13
最小面积*/ha	1 333.3	10.5	231	1 430
故道形状	Q 字型	E 字型	D 字型	字 U 字型
航运状况	无	无	无	无
渔业生产	无	无	无	无
江豚迁入时间	1990	2001	2014	2015
现存量	73	11	28	46
长江连通方式	涵闸	涵闸	涵闸	拦网
捕食方式	自然捕食	冬季投喂	冬季投喂	自然捕食
主管部门	林草	林草	农业	林草

* 指枯水期的数据.

目前 4 个迁地保护区均是利用废弃的长江故道,但是环境有所差异. 安徽铜陵大通和安庆西江水域面积较小,实施封闭管理,人类活动受到限制. 由于通过涵闸在夏季与长江短暂交换部分水体,因此小型鱼类资源少,冬季需要人工投喂. 湖北石首天鹅洲和湖北何王庙故道水域面积较大,自然环境较好,小型鱼类资源相对丰富,不需要人工投喂,均为自然捕食. 然而,湖北石首天鹅洲和何王庙故道涉及当地农业灌溉、饮用水及防洪等经济社会发展的压力,最终都筑堤建闸,与长江完全隔离.

通过 30 多年迁地保护实践活动,4 个迁地保护区均成功地饲养并繁殖江豚. 本文基于长江江豚食性、栖息地水环境及运动力学,探讨了小型鲸类迁地保护实践过程中的一些共性问题,希望对其他水域正在实施的小型鲸类迁地保护提供借鉴.

1 水文环境

1.1 水文节律消失

三峡枢纽工程建成后,库区蓄水及蒸发量增加,长江中下游的洪水期和 9—11 月份的流量明显下降,特别是 6—7 月份水位降低和水文节律有所改变^[7]. 大坝运行初期,湖北石首天鹅洲故道水体交换至少缩短 5 d^[8],而安徽安庆西江缩短了约 8 d. 所有的迁地保护区均为长江衰退的河道,都是在长江高水位时,通过闸口进行部分水体交流. 洪水期与长江水体交换时间缩短,会加剧进出口水动力的不足,泥沙持续淤

积,同时带来以下一些问题:①长江洪水期水位降低,灌江纳苗缩短或消失,导致迁地保护区小型鱼数量减少,江豚可食用鱼类的数量下降,幼年豚由哺乳向索食行为转换十分困难;②长江水位降低,导致故道的水生植被由沼泽地向旱生植被过渡,而造成粘性卵鱼类增殖减少和水体自净能力的下降。

1.2 河道简化

江豚迁地保护的水域发育于河漫滩,是长江废弃的弯曲故道。这些水域的岸形,依然保留着弧形滩地、凹形倒坎和适度的坡岸,形成复杂地貌与水文环境,营造着多样的水生生物群落。湖北石首天鹅洲和何王庙故道长且宽,依然保留深潭、浅滩、沟坎等复杂的地貌环境。在缓水浅滩生长着大面积芦苇,为鱼类提供索饵、产卵的理想生境,也是长江江豚栖息活动的水域,不足1年龄的江豚主要跟随母豚在天鹅洲故道内深槽与水草茂盛边滩结合部水域活动^[9]。

地质条件由亚粘土和砂土粉沙层组成,一般表层为亚粘土和淤泥层18~35 cm,中层粉细沙厚度为4~26 cm,下层的中粗砂含砾及砂卵石,厚度5~13 cm。长江泥沙颗粒尺度较小,颗粒表面及颗粒之间均存在微生物代谢活动所产生的有机物质生物膜(主体成分为胞外聚合物),成为泥沙生物絮凝的物理桥连机制,并对泥沙结构特征、密度、孔隙率、沉降速度和表面积有影响,从而改变了泥沙的动力特性^[10]。长江洪水期的泥沙含量高,进入迁地保护区随流速降低而下沉,长年累月会填塞深潭、沟坎,河道多样性逐渐降低或消失,栖息地质量和生物多样性也随之降低。

1.3 运动能耗高

海豚、鲨鱼和鱼类等水生生物利用自然水流产生的涡量与自身尾鳍生成涡量合成最佳动力条件,当水流与鳍等倾斜成一定角度时,生成的水涡在鳍表面两侧之间形成压力差进而产生升力^[11-12],同时通过尾鳍的上下摆动,在腹部产生一对反向旋转的卡门涡^[13],实现高效、有力的推进力^[14-15]。然而,涡量并不是越大对水生生物越有利,较强的涡量不仅会对生物游泳能力有明显抑制作用,甚至还会带来一定的伤害,例如消耗大量体能,迷失方向,加大寻找上溯路径的难度^[16],如果超过生物耐受范围,则会对生物造成损伤,降低其平衡力^[17]。

相比其他鲸类,长江江豚缺少背鳍,维持平衡和运动的能力相对较弱^[18],但是合适涡量水域中可能更有利于长江江豚调节身体姿态和控制尾部涡量的释放,快速获得浮力及推力,并降低自身运动能量的消耗^[19]。

由于迁地保护区大部分时间与长江隔离,因此是一个相对静止状态的水体,河道内的流速几乎为0,不能形成不同斑块状的涡流和环流,与长江干流在水动力方面存在极大差异。朱瑶等认为天鹅洲故道闸口不开启情况下,河道内有风生涡流存在^[20]。近期报道枯水期皖河口汇流水域中长江江豚偏爱的涡量值为 $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,大部分分布在汇流角附近^[21],与Chen等报道的江豚活动水域较为一致^[22]。考虑到湖北石首天鹅洲和何王庙水面较大,产生风生流场更加容易,可以为长江江豚提供可利用的涡流。而安徽铜陵大通和安庆西江面积小,水体静态,产生的涡流相对较弱。

2 食物资源

2.1 鱼类群落及年龄结构改变

江豚对食物体型大小有明显的限制。成年江豚食道直径约3.5 cm^[23],根据等周长圆与椭圆换算,建立鱼胸围长轴半径(y)与短轴半径(x)的经验公式,即: $y = 4.1815 - 1.7519x$ 。据此,将体宽1.3 cm、体高6 cm左右的饲料鱼,作为成年江豚食道通过的阈值。2001—2004年,每年冬天铜陵夹江投放1年龄家鱼苗,平均体长10 cm(7~14 cm),体高2.5 cm(2~4 cm),体重约30 g(17~36 g)期间,用定置网逐月取样分析,半年后,这些人工投放鱼苗体长可达20 cm,体高超过6 cm,体重超过200 g,江豚可食用鱼比例明显降低(图1)。如果年复一年地投放大量的家鱼苗,体高超过6 cm以上的鲢鱼和草鱼在夹江里占据优势,而江豚可食用的小型鱼类在渔获物中越来越少,因此入冬前需要人工投喂。

湖北石首天鹅洲故道在1998年建闸前,尚有大量滩涂湿地,每年洪水期从长江吸纳大量鱼苗,经测算天鹅洲故道能提供的渔业生产力达 $8.8 \times 10^5 \text{ kg}$,足以供养100头左右江豚^[24]。然而,筑堤建闸后,天鹅洲故道实施人工投放鱼苗,渔业产量虽有上升,但江豚可适用的小型鱼数量明显下降,如此下去,天鹅洲实际承载的江豚饲养数量可能低于原先预测的结果,因此,2023年1月,通过捕捞对天鹅洲故道鱼群结构进行

调整,并迁出 31 头长江江豚运往其他迁地保护区,其中迁入安庆西江的 4 头江豚,明显偏瘦.

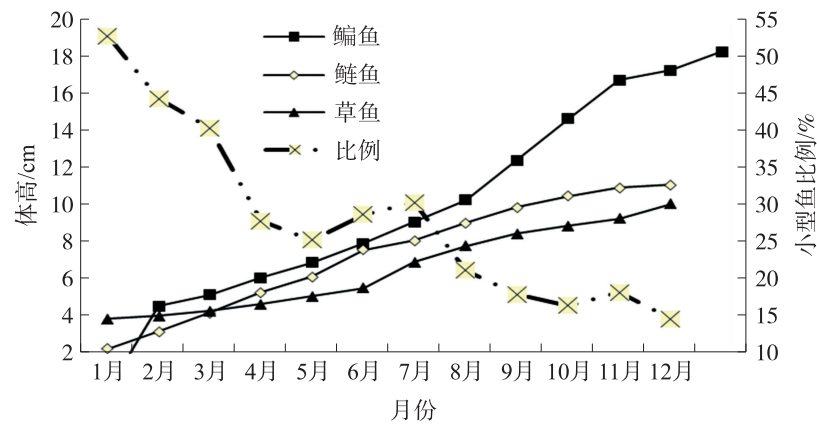


图 1 2001—2003 年铜陵自然保护区夹江每月鱼类体高和小型鱼类比例
Fig. 1 Proportion of edible fish in catch by month in Tongling semi-nature reserve between 2001 and 2003

2.2 捕食受到限制

长江江豚在流动水体与静态水体摄食行为肯定有差异,但是研究较少. 鱼类在长江中洄游活动受水温和流量影响,洄游线路与流态相关,比如洲尾或河口汇流水域就是鱼类聚集与扩散的节点^[25]. 在迁地保护区故道水体中,鱼类分布与活动更多地受水温影响^[26],水体溶解氧昼夜变化与水温也有联系^[27]. 根据铜陵保护区 2001—2003 年的江豚日常投喂量与水温相关性分析,每年 2 月—7 月,铜陵夹江的表层水温由 4℃左右上升至 35℃. 人工投喂量占体重百分比随着水温上升而降低,Perarson 相关系数为 0.866($n=194, P<0.01$). 然而,8 月至次年 1 月,水温开始下降. 人工投喂量随着水温下降而增加,Perarson 相关系数为 0.879($n=169, P<0.01$) (图 2). 夏季人工投喂的日食量占体重百分比几乎为 0,而冬季超过 10% (图 2). 全年均值为 6.3%,对照池内完全人工投喂日食量,长江江豚在夹江中捕食鱼类约为日食量的 1/3^[4]. 根据出水频次,推测铜陵夹江长江江豚夏季摄食在早晚、冬季在中午^[28]. 水温升降既影响鱼类生理机能,又能影响水体的溶氧,从而驱动鱼类集群游动,因此静态水体江豚摄食与鱼摄食节律一致.

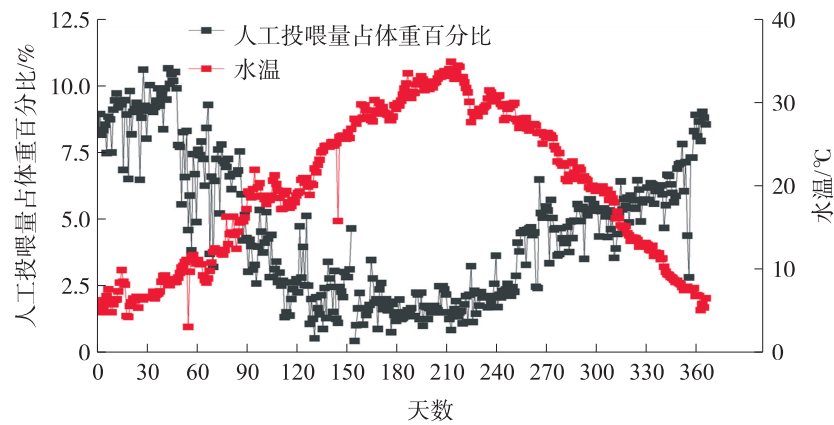


图 2 2001—2003 年铜陵夹江每天水温和人工投喂量变化
Fig. 2 Daily water temperature and feeding amount in Tongling semi-nature reserve between 2001 and 2003

2001 年 4 月引入安徽铜陵大通夹江的 5 头江豚,可能是初进入静态水体并处在应激状态下,即便在夏季,也靠人工投喂,而且体重下降 13.8%,至少 2 个月后才恢复^[4]. 次年,水温升高后,江豚完全不需要人工投喂. 但是,2003 年,不需要人工投喂的天数明显减少(图 3),而且 8 月后水温下降阶段的人工投食量同比增加. 这些摄食行为差异,既有摄食方式转换影响,也有小型鱼类匮乏所致.

小水体中迁入江豚,冬季里必须人工投喂,安庆西江在冬季也采取这种临时措施,但是由此带来了两个问题,值得注意:①人工投喂饵料鱼易患消化系统或传染性疾病,给日常管理提出更高要求;②小型鱼类严重不足,长期人工投喂,会导致江豚捕食能力退化.

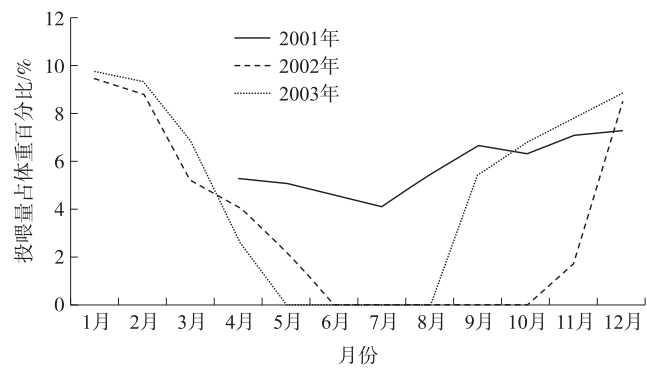


图 3 2001—2003 年铜陵夹江江豚投喂量年间差异

Fig. 3 Interannual varying feeding amount in Tongling semi-nature reserve between 2001 and 2003

3 饲养管理

3.1 水质

饲养环境的水体质量直接影响着长江江豚体质健康,是迁地保护的关键问题. 根据中国科学院水生生物研究所和安徽铜陵淡水豚国家级自然保护区的白鱔豚养护场池内江豚饲养的经验,氨基氮、硝基氮和大肠菌群三项指标用来指示水质是可靠的.

迁地保护区与长江干流进行水体交换时间短、流速低,易受藻类和细菌污染. 天鹅洲故道水质分析认为基本与长江水质相近^[29],其中大肠菌群明显地低于安徽铜陵大通夹江的半自然水域,且低于豚池饲养水质标准(表 2).

表 2 长江江豚生活水体的水质比较

Table 2 Comparison on water quality of the porpoise in setting

项目	单位	安徽铜陵大通夹江	长江铜陵段	湖北石首天鹅洲故道	养殖池
DO	mg/L	7.81	6.89	5.70~10.5	>5
NO ₂ -N	mg/L	0.18	0.57	—	—
NO ₃ -N	mg/L	0.01	0.03	—	<0.1
NH ₃ ³⁺ -N	mg/L	0.22	0.10	—	<0.3
COD ₅	mg/L	3.98	2.70	5.50~40.1	<6
BOD ₅	mg/L	2.00	1.00	—	—
大肠菌群	个/L	2 586	4 750	23~2 380	<4 500
参考文献		糜励等,2003	糜励等,2003	张先锋等,1995	陈佩董等,1997

铜陵夹江水域中的水质理化主要指标基本上符合地表水Ⅱ类标准,只是在进口端受轻度污染^[30],水体中总氮的含量在冬季最高,夏季最低,而总磷和大肠菌群却呈相反趋势(图 4). 铜陵夹江水质指标与长江水质变化较为一致,但 COD₅ 和 BOD₅ 的含量明显偏高,在一定程度上反映出水体受人类影响呈富营养化趋势^[31]. 此外,与中科院水生所池内饲养豚类水体相比,大肠菌群明显地超出,且有季节性变化^[32].

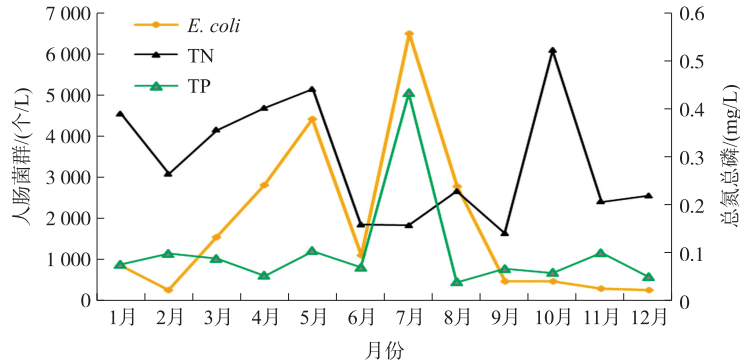


图 4 2001—2003 年铜陵夹江总氮总磷与大肠菌群年内变化

Fig. 4 Varying TN, TP and *E. coli* in Tongling semi-nature reserve within the year between 2001 and 2003

3.2 主要疾病

安徽铜陵大通夹江水域面积较小,水体易受人类活动干扰,因此江豚常患一些疾病,发病期主要集中在 1—2 月。在饲养初期发病率较高,以后则明显降低。腐皮病是长江江豚最常见疾病,也是人工饲养中最为棘手的一种疾病,主要发生在隆冬季节。患病初期食欲与呼吸间隔正常,但在皮肤末端会出现白斑。这些白斑先出现在尾鳍或胸鳍末端,渐渐发展到腹部。随着病情进一步发展,会引起全身性感染而导致败血症。由于长江江豚所患腐皮病主要在冬季,显然疾病的发生与大肠菌群数量无关,可能与水中总氮含量相关^[31]。根据患病江豚和食物鱼的病原菌分离鉴定结果来看,动物饲养环境的变迁、空间的压缩和水温的剧烈变化,都可能导致豚类机体免疫功能的下降,从而容易遭受淡水中普遍存在的弧菌科,如假单胞菌属(*Pseudomonas*)、嗜水气单胞菌属(*Aeromonas*)等条件致病菌的侵袭而患病^[33-34]。从池内和半自然水域中的粪便全通量基因检测也证实如此^[35],其中,嗜水气单胞菌属作为主要病原菌,对水生动物有巨大危害。据报道维罗氏气单胞菌(*Aeromonas veronii*)除了引起长江江豚腐皮病,还会导致内脏出血甚至死亡^[36]。从溃疡、腐烂的患病江豚表皮分离到一株杀鲑气单胞菌(*Aeromonas salmonicida*),系统进化显示其基因序列与银鲫源性杀鲑气单胞菌分离菌株高度同源^[37]。

3.3 抚育环境

豚馆内江豚在繁殖季节一些性行为有观察报道^[38],自 2005 年起,池内出生的江豚有妊娠期间血清激素和分娩过程的详细记录^[39-40]。澳大利亚的 Shark Bay,野生的鼻瓶海豚(*Tursiops truncatus*)初生幼豚死亡率第一年内达 29%^[41]。生后最初 2 周时间是十分关键,1977 至 1982 年全世界海洋馆出生的 89 头就有 40%在第一个月内死亡^[42]。

中国 4 个迁地保护区每年都能繁殖江豚,湖北石首天鹅洲故道引入江豚 2 年后就有幼豚出生^[43],安徽铜陵大通夹江也是引入 2 年后生育了小江豚^[44],安徽安庆西江引入江豚,次年 6 月份在围网中出生 1 头幼豚。然而,铜陵夹江 2 例夭折的幼豚就是发在 1 个月后至断奶期间,安庆西江 1 例幼豚半年后死去,体长不足 80 cm,体重不足 6 kg,营养极度不良。

刚出生的长江江豚发声频率很低,20 d 后才有高频率探测功能^[45]。因此,刚出生幼豚跟随母豚,呼吸频率与母豚较为一致^[46]。除了安全,跟随母豚,还能在游动过程中得到帮助。新生幼豚不能较好地控制浮力,窜出水面像公鸡^[47],幼豚通常在母豚侧后方,虽然不接触,但受益于母豚的“托力”^[48]。运用粒子图像测速系统(DPIV),证实齿鲸的附肢包括胸鳍和尾鳍能产生成对、反向的“卡门涡流”,为幼豚提供有效的“托力”^[49]。在静态水体中,母豚产生维持幼豚运动的涡流,比流动水体要困难些。因此,迁地保护区幼豚成长阶段,还有一个不容忽视的水动力环境问题需要考虑。长期生活在缺乏涡流的静态水体中,运动能耗大,动物偏瘦,脂肪少,偏离中性浮力^[50]。内分泌反馈机制,会调节动物的繁育能力^[51]。例如天鹅洲故道近年来出生的幼豚性别明显异常,雄性居多,种群扩张明显放缓^[52]。

4 结论

鲸类迁地保护在中国实践近 40 年,近年来,农业农村部对 4 个迁地保护区进行个体交换和长江江豚从人工饲养到流水环境软释放实验,取得一些进展。但是,迁地保护区水动力条件及渔业资源环境迫切需要改善,而且长江江豚从静态水体捕获食物,与流动水体索食行为有差异,是否会导致物种生存能力退化,也是一个值得思考的问题。

[参考文献]

- [1] 宋延龄,杨亲二,黄永青. 物种多样性研究与保护[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,1996.
- [2] ZHOU K Y. A project to translocate the baiji, *Lipotes vexillifer*, from the main-stream of the Yangtze River to Tongling baiji Semi-nature Reserve[J]. Aquatic mammal, 1986, 12(1): 21-24.
- [3] DONG M L, ZHANG X. To work hard for saving rare animal, baiji dolphin-Reports on ongoing progress of Tongling Baiji Semi-Nature Reserve[R]//ZHOU K Y, ELLIS S, LEATHERWOOD S, et al. Baiji(*Lipotes vexillifer*) population and habitat viability assessment report. Nanjing: Preliminary report species 20, 1993.
- [4] 于道平,蒋文华,糜励. 半自然水域中长江江豚食性与摄食行为的初步研究[J]. 兽类学报, 2003b, 23(3): 198-202.

- [5] 陈炳耀,信誉,路方婷,等. 长江江豚监测现状及展望[J]. 中国环境监测,2023,39(2):1-10.
- [6] ZHAO X, WANG D, TURVEY S T, et al. Distribution patterns of Yangtze Finless Porpoises in the Yangtze River: implications for reserve management[J]. Animal conservation, 2014, 16(5): 509-518.
- [7] LAI X, JIANG J, YANG G, et al. Should the Three Gorges Dam be blamed for the extremely low water levels on the middle-lower Yangtze River[J]. Hydrological processes, 2014, 28: 150-160.
- [8] 殷瑞兰. 下荆江河道演变对天鹅洲自然保护区的影响及对策研究[J]. 长江科学院院报, 2006, 32(2): 5-12.
- [9] WEI Z, WANG D, KUANG X, et al. Observations on behavior and ecology of the Yangtze Finless Porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaorientalis*) group at Tian-e-Zhou Oxbow of the Yangtze River[J]. Raffles bulletin of zoology, 2002, 75: 97-103.
- [10] 赵慧明,汤立群,王崇浩,等. 生物絮凝泥沙的絮凝结构实验分析[J]. 泥沙研究, 2014(6): 12-18.
- [11] BUSHNELL D M, MOORE K J A. Drag reduction in nature[J]. Annual review of fluid mechanics, 1991, 23(1): 65-79.
- [12] HARVEY S T, MUHAWENIMANA V, MULLER S, et al. An inertial mechanism behind dynamic station holding by fish swinging in a vortex street[J]. Scientific reports, 2022, 12(1): 16181-16188.
- [13] ZHANG Z G, YUAN Y, DING Z Y, et al. Development of numerical model for dolphin fluke motion[J]. Academia journal of scientific research, 2016, 4(2): 37-46.
- [14] DABIRI J O J. Optimal vortex formation as a unifying principle in biological propulsion[J]. Annual review of fluid mechanics, 2009, 41: 17-33.
- [15] TAYLOR G K, NUDDS R L, THOMAS A. Flying and swimming animals cruise at a Strouhal number tuned for high power efficiency[J]. Nature, 2003, 425(6959): 707.
- [16] SILVA A T, KATOPODIS C, SANTOS J M, et al. Cyprinid swimming behavior in response to turbulent flow[J]. Ecological engineering, 2012, 44: 314-328.
- [17] TULLOS D, WALTER C. Fish use of turbulence around wood in winter: physical experiments on hydraulic variability and habitat selection by juvenile coho salmon, *Oncorhynchus kisutch* [J]. Environmental biology of fishes, 2015, 98: 1339-1353.
- [18] STANDEN E, LAUDER G V. Hydrodynamic function of dorsal and anal fins in brook trout (*Salvelinus fontinalis*) [J]. Journal of experimental biology, 2007, 210: 325-339.
- [19] WOLFGANG M, ANDERSON J, GROSENBAUGH M, et al. Near-body flow dynamics in swimming fish [J]. Journal of experimental biology, 1999, 202: 303-2327.
- [20] 朱瑶,廖文根,冯顺新. 长江江豚的天鹅洲故道栖息地特征研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(3): 185-191.
- [21] DING R, ZHANG X K, CHEN M M et al. Vorticity preference of the Yangtze finless porpoise (*Neophocaena asiaorientalis*) during the dry season at the Wanhe River estuary confluence[J]. Ecological modelling, 2023, 485: 110504.
- [22] CHEN M M, ZHANG X K, WANG K X, et al. Spatial and temporal distribution dynamics of the Yangtze Finless Porpoise at the confluence of the Yangtze and Wanhe Rivers: implication for conservation[J]. Pakistan journal of zoology, 2017, 49(6): 2263-2269.
- [23] 李悦民,钱伟娟,沈浩宁,等. 江豚 (*Neophocaena asiaorientalis*) 的消化器官 I. 舌、食管、胃[J]. 兽类学报, 1984, 4(4): 257-263.
- [24] 李学军,李思发,杨和荃. 长江天鹅洲故道和老河故道水生生物多样性的比较研究[J]. 生物多样性, 1996, 4(4): 211-216.
- [25] CZEGLÉ'DI I, SA'LY P, TAKA'CS P, et al. The scales of variability of stream fish assemblages at tributary confluences[J]. Aquatic sciences, 2015, 78: 641-654.
- [26] NUNN A, COWX I, FREAR P, et al. Is water temperature an adequate predictor of recruitment success in cyprinid fish populations in lowland rivers[J]. Freshwater biology, 2003, 48: 579-588.
- [27] CAISSIE D. The thermal regime of rivers: a review[J]. Freshwater biology, 2006, 51: 1389-1406.
- [28] 于道平,蒋文华,黄立新. 半自然水域中长江江豚活动区域及其季节性变化[J]. 水生生物学报, 2003a, 27(6): 657-659.
- [29] 张先锋,魏卓,王小强,等. 建立长江天鹅洲白鱀豚保护区的可行性研究[J]. 水生生物学报, 1995, 19(2): 110-123.
- [30] 糜励,于道平,蒋文华. 半自然水域中长江江豚饲养水体理化因子分析[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2003, 37(4): 98-102.
- [31] 糜励,于道平,周凤. 长江铜陵段水域与半自然水域中水质比较[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2004, 23(3): 203-206.
- [32] 陈佩薰,刘仁俊,王丁,等. 白鱀豚生物学及饲养与保护[M]. 北京:科学出版社,1997.

- [33] LIU Z G, LIU A Y, WANG Y P, et al. Comparative analysis of microbial community structure between healthy and *Aeromonas veronii*-infected Yangtze Finless Porpoise[J]. *Microbiology cell fact*, 2020, 19(1): 123–134.
- [34] 刘志刚, 郑爱芳, 陈敏敏, 等. 长江江豚细菌性疾病的诊治研究[J]. *水生生物学报*, 2018, 42(3): 584–592.
- [35] WAN X, RUAN R, MCLAUGHLIN R W, et al. Fecal bacterial composition of the endangered Yangtze Finless Porpoises living under captive and semi-natural conditions[J]. *Current microbiology*, 2015, 72(3): 306–314.
- [36] LIU Z G, ZHENG A F, CHEM M M, et al. Isolation and identification of pathogenic *Aeromonas veronii* from a dead Yangtze Finless Porpoise[J]. *Diseases of aquatic organisms*, 2018, 132(1): 13–22.
- [37] 刘志刚, 蒋胡艳, 张晓可, 等. 长江江豚杀鲑气单胞菌的分离鉴定及生物学特性分析[J]. *兽类学报*, 2018, 38(6): 562–571.
- [38] WU H P, HAO Y J, YU X Y, et al. Variation in sexual behaviors in a group of captive male Yangtze Finless Porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*): motivated by physiological changes? [J]. *Theriogenology*, 2010, 74: 1467–1475.
- [39] ZENG X Y, LI C Y, HAO Y J. Pregnancy diagnosis and fetal monitoring in Yangtze Finless Porpoises[J]. *Endangered species research*, 2022, 47: 291–296.
- [40] HAO Y J, CHEN D Q, ZHAO Q Z, et al. Serum concentrations of gonadotropins and steroid hormones of *Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis* in middle and lower regions of the Yangtze River[J]. *Theriogenology*, 2007, 67(4): 673–680.
- [41] MANN J, CONNOR R C, BARRE L M, et al. Female reproductive success in bottlenose dolphins (*Tursiops* sp.): life history, habitat, provisioning, and group-size effects[J]. *Behavioral ecology*, 1999, 11(2): 210–219.
- [42] COUVER R L, SCHROEDER J P. A status report on a survey of *Tursiops* breeding programs[C]//Programme and Summaries. Netherlands: Annual Sumpasium of the European Association for Aquatic Mammals, 1984.
- [43] WANG D, LIU R, ZHANG X, et al. Status and conservation of the Yangtze Finless Porpoise[C]//REEVES R R, SMITH B D, KASUYA T, et al. *Biology and Conservation of Freshwater Cetacean in Asia*. Switzerland: Vccasional Paper of the IUCN Species Survival Commission, 2000.
- [44] 束家宽, 蒋文华, 郑邦友, 等. 长江江豚哺乳期昼间行为和时间的分配[J]. *兽类学报*, 2008, 28(1): 20–27.
- [45] LI S H, WANG K X, WANG D. Simultaneous production of low- and high-frequency sounds by neonatal Finless Porpoises[J]. *Journal of the acoustical society of America*, 2008, 124(2): 716–718.
- [46] CREMER M J, HARDT F A, JUNIOR A J. Evidence of epimeletic behavior involving a *Pontoporia blainvillei* calf (Cetacea, Pontoporiidae) [J]. *Biotemas*, 2006, 19(2): 83–86.
- [47] EDWARDS E F. Behavioral contributions to separation and subsequent mortality of dolphin calves chased by tuna purse-seiners in the Eastern Tropical Pacific Ocean: LJ-02-28[R]. California: Southwest Fisheries Center Administrative, 2002.
- [48] WEIHS D. The hydrodynamics of dolphin drafting[J]. *Journal of biology*, 2004, 3(2): 8–24.
- [49] WEBER P W, HOWLE L E, MURRAY M M, et al. Lift and drag performance of odontocete cetacean flippers[J]. *Journal of experimental biology*, 2009, 212(14): 2149–2158.
- [50] FISH F E. Biomechanics and energetics in aquatic and semiaquatic mammals: Platypus to whale[J]. *Physiological and biochemical zoology*, 2000, 73(6): 683–698.
- [51] KEI-ICHIRO M, HIROKO T. The impact of stress on reproduction: are glucocorticoids inhibitory or protective to gonadotropin secretion? [J]. *Endocrinology*, 2006, 147(3): 1085–1086.
- [52] 龚成, 张振华, 高道斌, 等. 天鹅洲迁地保护江豚的种群现状与保护建议[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.

[责任编辑: 黄 敏]