

doi: 10.7541/2023.2023.0064

首例长江江豚的野化及行为适应性研究

邱建松^{1,2} 孙晓冬^{1,2} 王 丁^{1,3} 郝玉江^{1,3} 郑劲松^{1,3} 李威伦³ 范 飞^{1,3}
邓晓君^{1,3} 毛峻峰⁴ 曾 强⁴ 江华炎⁴ 邓在贵⁴ 龚 成⁵
徐春永⁵ 王克雄^{1,3*} 梅志刚^{1,3*}

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 10049; 3. 武汉白鱀豚保护基金会, 武汉 430074;
4. 湖北长江新螺段白鱀豚国家级自然保护区管理处, 洪湖 433200; 5. 湖北长江天鹅洲白鱀豚国家级
自然保护区管理处, 石首 434400)

摘要: 长江江豚的迁地保护目前已取得初步成功, 野化放归是迁地保护的最后一环, 也是实现迁地保护目标的必然要求。在此背景下, 于2021年4月将来自天鹅洲故道迁地保护区的2头雄性长江江豚转移至与长江干流环境相似的老湾故道, 尝试开展野化训练, 探究其行为和发声的适应过程, 评估其巡游、捕食和发声等行为能否适应较恶劣的环境, 为将来规模化的野化, 甚至放归自然栖息地提供技术支撑。经过为期1年的野化训练和持续监测, 结果表明, 老湾故道鱼类密度显著低于天鹅洲故道, 丰水期鱼体密度分布不均, 上游较中下游高。江豚在上游的每日平均停留时间显著高于中下游, Spearman相关性分析表明与鱼群的密度分布有显著相关性。在进入故道的前2月, 江豚顺流巡游所需时间逐渐增加达到峰值, 随后降低并趋于稳定。在船舶噪声适应性训练中, 江豚的平均呼吸间隔在存在船只干扰时显著降低, 随着干扰次数的增加, 逐渐恢复至无干扰时的水平。由此认为, 2头江豚对老湾故道的低鱼类资源密度、季节性变化的流速环境及人工施加的船只噪声干扰有良好的适应性, 具备放归长江的条件。这是首次实施完全自然环境中江豚的野化训练, 将为规模化的野化放归提供技术支撑, 促进江豚自然种群的恢复。

关键词: 长江; 长江江豚; 野化训练; 适应性; 放归; 迁地保护

中图分类号: Q178.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2023)10-1709-10



过去两个世纪, 由于工业化普及、人口数量不断增长、直接利用等各种人类活动的影响, 物种灭绝速率不断上升, 大量物种面临生存危机^[1,2], 其中大型脊椎动物受到的影响尤甚^[3,4]。据IUCN(2022)统计, 我国有80种哺乳动物处于受胁状态(极危、濒危、易危), 其中90%以上物种的数量目前仍处于下降趋势^[5]。

迁地保护是濒危动物保护的重要手段之一, 其最终目标是保留物种的有生力量, 待迁地种群数量增加后, 将其释放至野外以补充野生种群的数量和遗传多样性^[6]。截至目前, 世界各地已有许多陆生

和水生动物野放的成功案例, 如朱鹮(*Nipponia nippon*)^[7]、麋鹿(*Elaphurus davidianus*)^[8]、大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)^[9]、黑足雪貂(*Mustela nigripes*)^[10]、扬子鳄(*Alligator sinensis*)^[11]、斑海豹(*Phoca largha*)^[12]和强壮红点鲑(*Salvelinus confluentus*)^[13]等。然而, 迁地保护的种群长期处于人类设置的优良环境中, 部分生活习性发生改变, 未经适当的野化训练直接进入野外环境, 可能因行为、捕食能力等方面不适应而导致死亡^[14,15]。因此, 合理的野化训练是沟通迁地种群与野外种群的桥梁^[16,17]。

20世纪90年代, 我国开展长江江豚(*Neopho-*

收稿日期: 2023-02-24; **修订日期:** 2023-03-30

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF1301604); 长江老湾故道江豚野化放归技术咨询服务项目(Y990010901)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2022YFF1301604); Technical Consultation Service Program for Reintroduction of Yangtze Finless Porpoise in Laowan Branch (Y990010901)]

作者简介: 邱建松(1997—), 男, 硕士研究生; 主要从事鲸类行为生态学和保护生物学研究。E-mail: qiujs@ihb.ac.cn

通信作者: 王克雄(1963—), 男, 博士, 研究员; 主要从事鲸豚生物声学和行为生态学研究。E-mail: wangk@ihb.ac.cn 梅志刚(1986—), 男, 博士, 副研究员; 主要从事鲸类生态学和保护生物学研究。E-mail: meizhigang@ihb.ac.cn *为共同通信作者

caena asiaeorientalis asiaeorientalis; 以下简称江豚)的迁地保护, 目前已取得初步成功, 多个迁地保护区的江豚种群数量已经稳定增长^[18–20], 且对外迁出了近50头个体。而野外种群的数量目前还处于较低水平, 分布区斑块化严重^[21]。在部分江豚迁地保护区中, 环境容纳量有限、近交衰退风险、缺乏与自然种群的基因交流、迁地保护区栖息地质量下降等因素逐渐制约着迁地种群的发展^[22–24], 将迁地种群部分迁出已迫在眉睫。适逢长江大保护、十年禁渔的开展及相关法律法规的出台, 近年来长江水域生态环境质量逐渐提升, 鱼类密度逐渐恢复^[25, 26], 一些以往江豚未曾分布的区域近期报道了江豚的出现^[27], 显示江豚的野外栖息地质量得到了一定程度的恢复。在此背景下, 有必要尝试将江豚迁地种群的部分个体通过野化训练后释放至干流及两湖恢复较好的区域, 促进野外种群的恢复。

在鲸类动物中, 野放的成功案例并不多, 且均是针对人工环境下生活的动物^[28–30], 对迁地保护种群的野化目前仍是一项挑战。2011年, 中国科学院水生生物研究所将1头在白鱔豚馆生活了近8年的江豚经野化训练, 成功软释放至天鹅洲故道迁地保护区^[31]。需要注意的是, 天鹅洲故道仍然是受控水体, 完全管控了人类活动, 没有航运, 其水体常年保持静水状态, 因此, 实际上并未实现将江豚野化放归至完全自然的栖息地中。但这次实践证明江豚的野化放归是可能实现的, 也为本项研究积累了重

要的经验。迁地保护区与长江干流在食物资源、水文环境及人类活动等方面存在较大差异, 因此在将迁地保护的江豚在成功放归至长江干流之前, 首先需要在近似长江干流的环境中进行野化训练。

基于此目的, 中国科学院水生生物研究所联合湖北长江新螺段白鱔豚国家级自然保护区管理处, 于2021年4月在长江洪湖段老湾故道正式启动长江江豚野化适应性训练计划。本研究持续监测野化过程中江豚的捕食行为、活动规律、对人类活动的响应等。在此基础上, 分析其对野外环境的适应能力以及是否满足放归自然水域的要求, 为后续规模化开展江豚的野化放归工作提供理论和技术支撑, 同时本研究的结果也可以作为其他濒危野生动物野化放归的参考。

1 研究方法

1.1 研究区域及对象

老湾故道位于湖北长江新螺段白鱔豚国家级自然保护区的核心区(113.68—113.72 E, 29.94—29.97 N), 是一片弓形通江水道(图 1)。2013年经农业农村部(原农业部)批准, 建设长江江豚野化放归基地。目前, 在老湾故道上游与下游各修建了1道潜坝, 上下坝间距离约6.5 km, 主要是为了在冬季维持最低水位, 为江豚提供生存空间。在上下游潜坝内侧各修建了1道栏栅, 以防止在丰水期江豚逃逸到干流水域。栏栅的间距为30 cm, 可以实现鱼

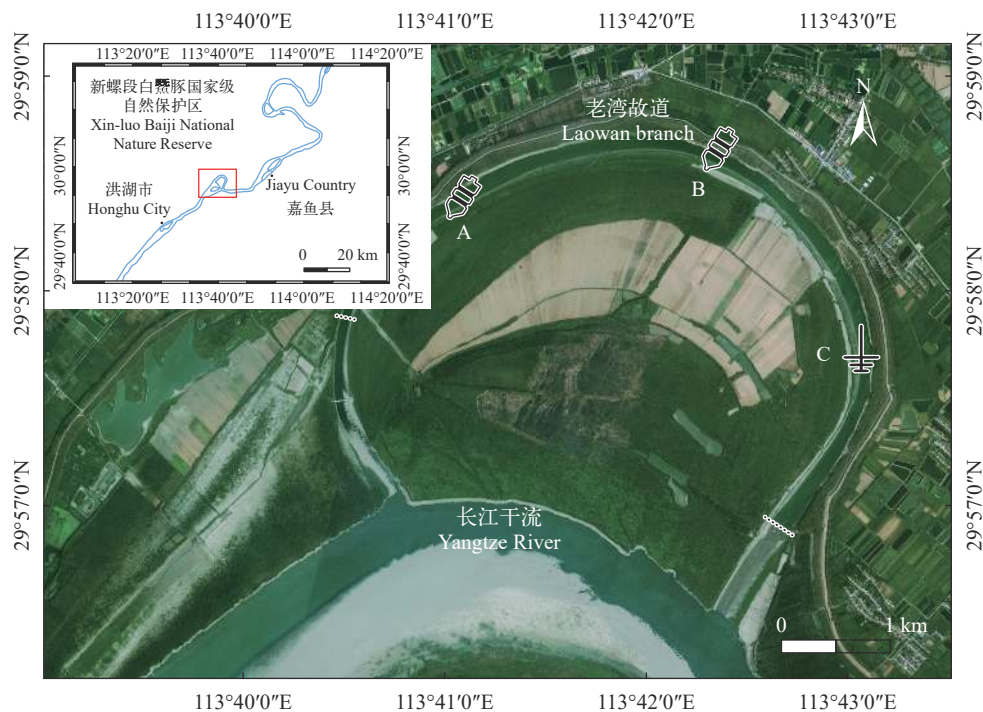


图 1 野化地点老湾故道内的三个声学监测位点A、B、C(黑色虚线代表两处栏栅)

Fig. 1 The Laowan branch and acoustic monitoring sites A, B and C(Black dash lines indicate the upstream and downstream fences)

类和水体的自然交换。2021年4月28日, 在天鹅洲故道江豚普查后, 选取了出生于天鹅洲故道的雄性江豚成体T21M42(135.0 cm, 42.4 kg)和亚成体T21M02(127.0 cm, 33.2 kg)各1头, 通过水箱陆路运输至老湾故道, 江豚经舒缓池中恢复状态后, 转入老湾故道2道栏栅之间的水域进行野化适应性训练。

整体上来说, 老湾故道的环境特征与长江干流相似, 而与天鹅洲故道的环境不同。差别主要体现在三个方面: 鱼类资源密度、水流速度和人类活动干扰的强度(表1)。第一方面, 天鹅洲故道由于人工投放鱼苗, 鱼类资源较为丰富, 2018年5月在天鹅洲故道开展的水声学调查结果显示故道内鱼体平均密度为 (940 ± 810) 尾/1000 m³, 同期干流中鱼体平均密度为 (400 ± 380) 尾/1000 m³[32]。2021年8月在老湾故道开展的水声学调查结果显示故道内鱼体平均密度为 (106 ± 55) 尾/1000 m³。相比起天鹅洲故道, 老湾故道内的鱼体密度较长江干流更低。第二方面, 由于天鹅洲故道的上口与长江隔断, 下口建有节制闸, 导致故道缺少与长江干流的水交换, 即使在长江丰水期也没有较高流速, 为准静水环境[33]。而老湾故道上下游均与长江相通, 丰水期时流速与同期干流流速相近, 2017年丰水期调查显示老湾故道的平均水流速0.462 m/s。第三方面, 天鹅洲故道内渔业捕捞已经完全停止, 且未通航, 人类活动少。因此, 为模拟长江干流的噪声环境, 本研究驯化的内容之一是在老湾故道内人工施加船只噪声压力。

以上天鹅洲与老湾故道环境的差异, 以及老湾故道与干流环境的相似性, 可以说明江豚若能适应老湾故道的环境, 且行为、节律、捕食活动能表现出与自然种群相似的特征, 即满足适应干流环境的能力。

1.2 数据收集

老湾故道鱼类资源调查及水文参数采集 2021年8月30日—9月2日、2021年11月29日—12月3日期间, 同期采用水声学调查及渔获物调查两种方法, 先后老湾故道开展了夏秋季和冬季的鱼类资源

调查。水声学调查通过巡逻快艇搭载BioSonics DT-X分裂波束回声探测仪(换能器型号: 分裂波束式, 工作频率: 199 kHz, 半功率角: 6.9°), 对故道水域进行“Z”形走航式探测。渔获物调查使用定置张网(网目1—2 cm, 网长100 m, 网高2—5 m)、地笼(网目0.5 cm, 长×宽×高为20 m×50 cm×40 cm)、定置刺网(网目3—4 cm, 长×高为60 m×1.2 m)。在调查期内, 每天在渔获物监测点设2网定置张网、8网地笼、2网定置刺网, 12h后收网进行统计测量, 逐一记录鱼体长、全长和体重等信息。故道流速和水温数据通过固定在故道内一处趸船上的红外温度传感器(型号: T10S-B-HW)和雷达流量计(型号: HZ-SVR-24Q-PL)收集, 干流流量数据来自老湾上游50 km处的螺港监测点(湖北省水利厅, <https://slt.hubei.gov.cn/sjfb/>)。

江豚被动声学监测 故道引入江豚后约2周, 在故道上、中游的位点A和位点B分别布设了1台水下声记录仪Soundtrap 300HF(Ocean Instruments Ltd, New Zealand)以记录水下声音。参数设置为: 采样率576 kHz, 低增益, 关闭高通滤波, 不间断采样。水听器通过浮球、船锚和麻绳固定于距岸15 m、水下2 m处。每周取回设备导出数据、充电并重新安装。在下游位点C的趸船上安装了江豚实时预警系统(RPCD-II)[35]以报告、记录江豚声脉冲事件(见2.3数据分析)和出现的时间。将故道水域划分为3个等长约2 km的区域(图1), 各位点(A、B和C)位于各区域的中心。11月以后, 由于长江水位降低, 故道两端断流, 形成封闭水域, 江豚在故道内的活动区域限制在C区域附近长约3 km, 宽约70 m的江段。江豚的声信号由高频窄带的脉冲串组成, 峰值频率范围118—144 kHz[36], 通过监测声信号可以准确捕捉江豚在设备周边水域分布的信息[37, 38]。

船舶噪声适应性训练 老湾故道内环境安静, 为模拟长江航运和噪声, 了解船舶噪声干扰下江豚的捕食规律和发声节律的变化, 在2021年11—12月引入了机驳船和渡船进行人为干扰。在岸边每隔50 m插红旗以标示距离和指示江豚出现

表1 长江干流、老湾故道、天鹅洲故道的栖息地环境差异

Tab. 1 Differences on habitat environment between Yangtze River mainstream, Laowan branch and Tianezhou Oxbow

栖息地Habitat	食物资源Food resource	水流速度Water velocity	人类活动Disturbance
长江干流 Yangtze River mainstream	鱼体平均密度 (400±380) 尾/1000 m ³ [32]	丰水期老湾故道上下游干流平均流速 0.462 m/s (2017/7)	航运频繁, 新螺段水下噪声均方根 声压级142.5 dB re 1 μPa [34]
老湾故道 Laowan branch	鱼体平均密度(106±55) 尾/1000 m ³ (2021/8)	丰水期与干流相通, 平均流速0.600 m/s (2021/7); 枯水期为封闭静水水体	禁航, 人为添加船只噪声干扰模拟 长江环境
天鹅洲故道 Tian-eZhou Oxbow	鱼体平均密度(940±810) 尾/1000 m ³ (2018/5, 未发表数据), 人工补充鱼 苗, 江豚自主捕食	与长江隔断, 为准静水水体[33]	禁航, 人类活动少

的位置,岸上4位观察员每人负责200 m的江段,观察并记录江豚的呼吸间隔。在无干扰状态下记录了5d的H0(对照组)数据。实验组分为4组:无声船、仅声音、机驳船和渡船,前3组均采用挂机木船。具体方案如下:N(无声船)组,全程不开动发动机,使用人工摇橹划船,不发出声音;O(仅声音)组,划船停于江中心后,开启发动机空转,制造噪声,但船不运动;B(机驳船)组,机驳船开发动机正常行进,时速保持10 km/h;S(渡船)组,渡船正常行进,时速保持10 km/h。各组开船时朝向江豚连续行进,待江豚游至船后500 m以外,船舶掉头并重复以上过程,持续30min,停船(关发动机)1h,为1组实验。实验期间每日重复3—4组,过程中持续观察江豚行为和位置,保证江豚的安全。

1.3 数据分析

鱼探仪的声学数据通过Sonar-5 Pro(University of Oslo, Oslo)进行分析,在计算鱼类密度过程中,将每隔50 m的探测长度作为一个分析断面,通过Echo counting算法获得各个断面的平均鱼类密度。Soundtrap录制的声音文件通过Soundtrap Host 4.0下载解压,经Matlab (R2021b, Math Works, Natick, MA)自编程序筛选江豚脉冲串信号(80—120 kHz, 脉冲数量大于5,且脉冲间隔小于200ms^[39])及江豚buzz信号(脉冲间隔小于10ms的江豚脉冲信号,代表捕食行为^[40]),通过Raven Pro(The Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY)人工核查筛选程序的准确率。声学数据被分割成30min的时间段,若在某一30min时间段内检测到江豚信号,则称该时间段为1次江豚脉冲目击事件。夏秋季江豚在各位点的出现率定义为在研究期间各位点监测到江豚的小时数占比。江豚在A和C位点之间移动花费的时间定义为最后一次在A(或C)位点监测到脉冲目击事件到第一次在C(或A)位点监测到脉冲目击事件的时间间隔。江豚的一个呼吸周期通常由数个短呼吸(簇内呼吸间隔,ARI)和一个长呼吸(簇间呼吸间隔,ERI)组成^[31, 41]。ARI和ERI的界定(簇限)参考王士勇等^[31]的实验结果。检验实验进行不同天数时各组江豚的平均呼吸间隔的差异性。根据湖北地区5—10月的平均日出(05:48)和日落(19:07)时间,定义夏秋季6至19点为白天,19点至次日6点为夜晚;根据湖北地区12月的平均天亮(06:53)和天黑(17:58)时间,定义冬季7至18点为白天,18点至次日7点为夜晚。为减少江豚对水域的空间偏好带来的误差,尽量真实地反映其发声的昼夜节律,将3个位点的数据合并分析。数据的差异显著性分析使用IBM SPSS Statistics 26 (IBM, Armonk, NY)和Origin 2021

(OriginLab Corporation, Northampton, MA)软件完成。结果及讨论中图片涉及到时间的部分,均定义为从该时刻开始的1个小时,如“17”代表17:00—18:00。

2 结果

2.1 老湾故道的鱼类资源

2021年夏秋季渔获物调查中,共采集到鱼类25种,290尾,总计135.30 kg。其中以鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鲂(*Megalobrama skolkovii*)、翘嘴鲌(*Culter alburnus*)和鳊(*Aristichthys nobilis*)等中型鱼类为主,短颌鲚(*Coilia brachygnathus*)和飘鱼(*Pseudolaubuca sinensis*)等小型鱼类数量占比约20%。冬季调查采集到鱼类共26种,666尾,总计342.03 kg。其中鲢最多,占渔获物总数的56.31%,其次为短颌鲚,占渔获物总数的10.96%。

鱼探仪在夏秋季共探测到鱼类信号668个,平均体长约5.2 cm,最大体长约64.5 cm。98.05%的鱼体全长小于25.0 cm,95.21%的鱼体全长小于15.0 cm,鱼体平均密度为(106±55)尾/1000 m³,个体总数约为1.04×10⁶尾。A、B、C区域鱼体平均密度(173±32)尾/1000 m³显著高于B区域(89±26)尾/1000 m³和C区域[(68±21)尾/1000 m³; $P<0.001$, Kruskal-Wallis Test], B、C区域之间无显著性差异(图2)。冬季共探测到鱼类信号99个,平均体长约7.8 cm,最大体长约66.8 cm。80.81%的鱼体全长小于25.0 cm,66.67%的鱼体全长小于15.0 cm,鱼体平均密度为(434±163)尾/1000 m³,个体总数约为2.00×10⁶尾。

2.2 江豚的空间偏好及发声的昼夜节律

2021年5月14日—10月28日在位点A、B、C共记录了150 d,期间5月31日至6月7日发生设备遗失,7月24日至8月30日由于疫情原因未进行声学采样。在每个位点记录了约3336hr的声学数据,在位点A、B、C分别记录到1453、454和591起江豚脉冲目击事件。江豚在A区域的每日平均停留时间显著高于B、C区域($P<0.001$, Kruskal-Wallis Test), B、C区域之间无显著性差异(图3a)。同时,江豚在A区域活动的时间以白天为主,在B、C区域以夜间为主(图3b)。夏秋季江豚在各位点的平均停留时长与鱼群的密度分布有显著相关性($P<0.01$, Spearman相关性分析)。

江豚在6—9时发出的脉冲串数显著高于其他时段($P<0.01$, Kruskal-Wallis Test),4h内的脉冲串数占每日全天总脉冲串的近1/4(23%)。江豚在白天(57.8%)发出的平均脉冲串数显著高于夜间(42.2%; $P<0.01$, Kruskal-Wallis Test; 图4)。

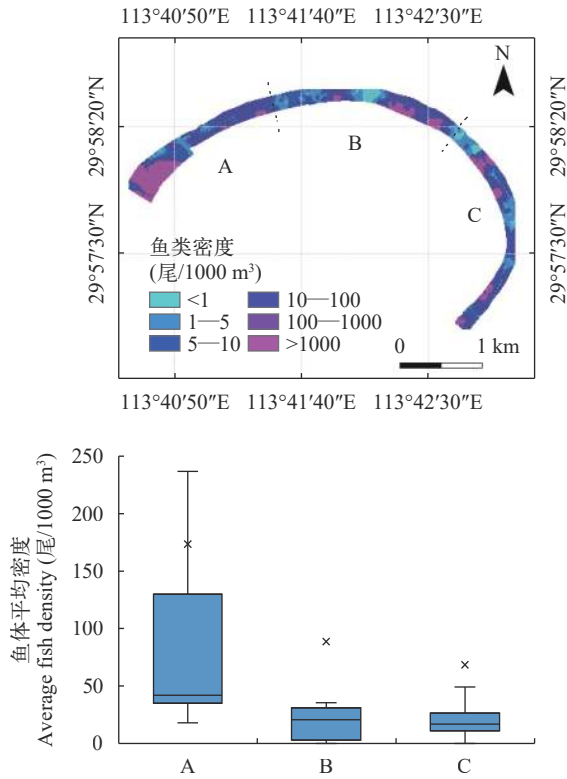


图2 夏秋季老湾故道鱼类资源密度分布(虚线代表不同区域边界)及各位点的平均鱼体密度

Fig. 2 Distribution of fish density (dashed lines indicate the boundary) and average fish density of area A, B and C during summer and autumn in Laowan branch

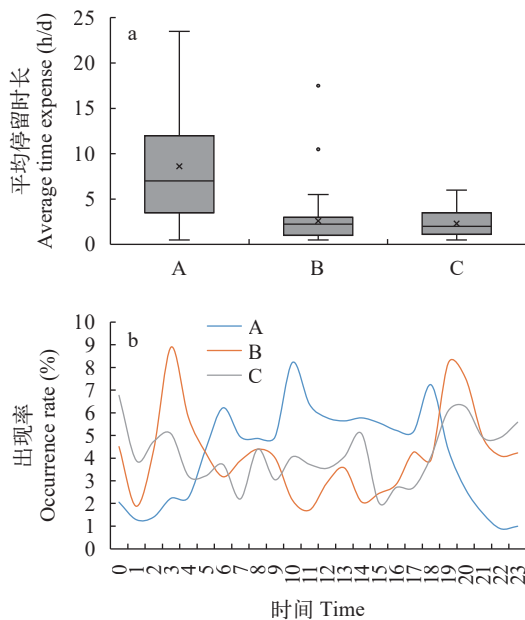


图3 夏秋季江豚在各位点停留的平均时长(a)及在各位点不同时段的出现率(b)

Fig. 3 Average time expense of Yangtze finless porpoise at each site (a), and average occurrence rate of Yangtze finless porpoises in site A, B and C at different time periods (b)

2.3 江豚在高流速环境下的活动规律

由于干流水位上升,老湾故道于2021年5月20日左右与干流连通。故道与干流连通后,江豚在上游(A区域)和下游(C区域)之间移动所需的时间逐步上升,在6月18—28日附近达到最大值,随后开始逐渐下降(图5);在7月中旬以后,其在上下游之间的移动时间趋于稳定,顺流移动时间(56.8 ± 18.4)min,逆流移动时间(65.0 ± 24.0)min。江豚的移动时间在连通后至7月中旬前显著高于连通前($P < 0.05$; Kruskal-Wallis Test),7月中旬后其移动时间与故道流速无显著相关性($P > 0.05$; Spearman相关性分析)。

2.4 江豚对船舶干扰的响应

实验期间,共记录到约84h的呼吸行为数据,包括5d无船舶干扰和9d有船舶干扰状态下的数据。

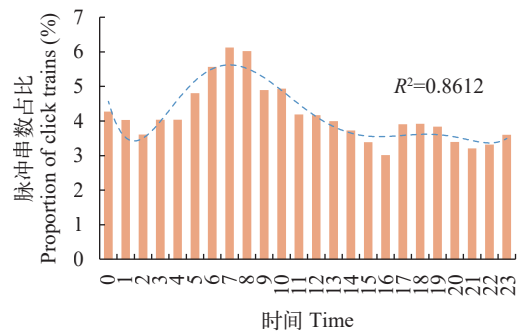


图4 江豚每小时发出脉冲串数占比的昼夜变化

Fig. 4 Diel variation of click trains emitted by finless porpoises

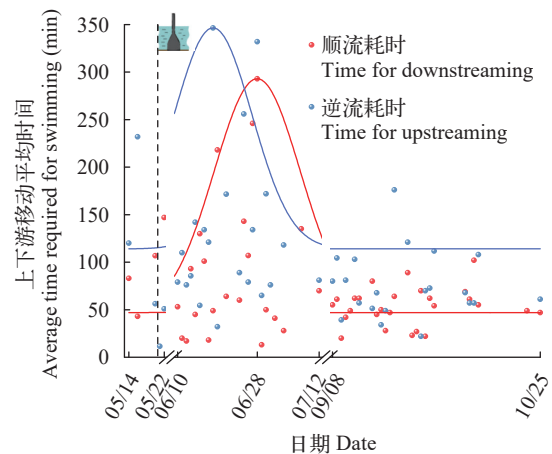


图5 江豚在A区域和C区域之间移动所需平均时间

Fig. 5 Average time expended of Yangtze finless porpoises to move between site A and site C

红色和蓝色曲线分别代表顺流和逆流移动耗时的Gaussamp拟合曲线,黑色虚线代表故道与干流连通的时间

The red and blue curves represent Gaussamp fitting curves for time required to move downstream and upstream, respectively. The black dashed line represents the time when the Laowan branch connected with the Yangtze River

对照组(H0, $n=979$) 江豚ARI集中在3—10s, 占比70.93%; 无声船组(N, $n=387$)ARI占比58.66%; 仅声音组(O, $n=310$)ARI占比59.35%; 机驳船组(B, $n=302$)ARI占比54.97%; 渡船组(S, $n=445$)ARI占比50.11%。相比H0组, 在其他各实验组中, 江豚的ARI占比均出现不同程度的减少。H0组平均呼吸间隔(26.57 ± 2.81)s显著低于N组(42.83 ± 3.89)s、B组(40.43 ± 2.84)s和S组(38.69 ± 2.68)s ($P < 0.01$; Kruskal-Wallis Test; Bonferroni校正), H0与O组(31.67 ± 2.32)s无统计学差异。

各实验组在第1天的平均呼吸间隔相较于H0差异最大, 随着实验次数的增加, 第2天、第3天江豚的平均呼吸间隔有向H0恢复的趋势(图6)。成对比较发现, N、B、S组第1天江豚的平均呼吸间隔与H0有显著差异($P < 0.001$; Fisher LSD检验), 而第2天(N、S组)、第3天(N、B组)与H0无统计学差异。同时, 将各实验组组内不同天数进行比较, 发现N、B、S各组内第1天与第2天或第3天结果存在显著差异($P < 0.01$, Fisher LSD检验; 图7)。

3 讨论

3.1 野化江豚的捕食适应

江豚在各位点的活动具有明显的昼夜节律, 其出现在A区域的时间以白天为主, 且在 6: 00—11: 00和17: 00—19: 00(捕食高峰^[42]时段)更多地出现在

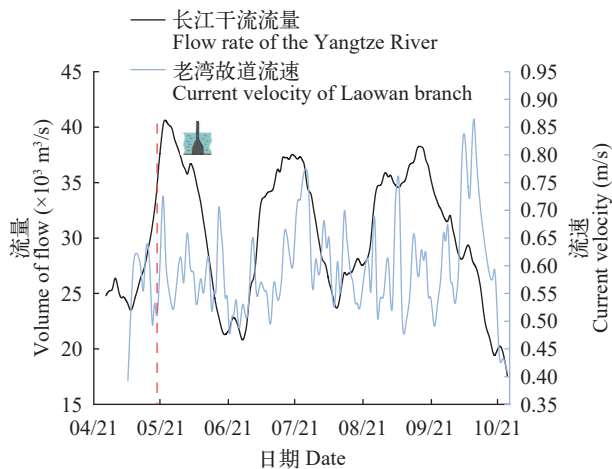


图6 螺山长江干流流量及老湾故道流速波动

Fig. 6 Variations in the flow rate of the main stream of the Yangtze River at Luoshan and the current velocity of the Laowan branch

黑色曲线代表长江干流, 蓝色曲线代表老湾故道, 红色虚线代表故道与干流连通的时间

The black curve represents the Yangtze River main stream, the blue curve represents the Laowan branch, and the red dashed line represents the time when the Laowan branch connected with the Yangtze River

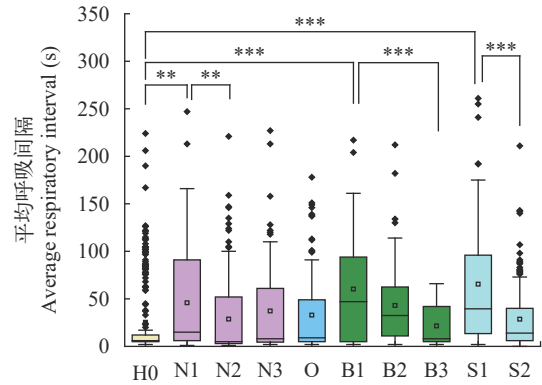


图7 各实验组与对照组平均呼吸间隔的比较, 以及各组内不同天数间的比较

Fig. 7 The comparison of the average respiratory interval between each experimental group and control, and the comparison between different days within each experimental group

H0. 对照组; N. 无声船; O. 仅声音; B. 机驳船; S. 渡船。数字代表各组实验天数, $*P \leq 0.05$, $**P \leq 0.01$, $***P \leq 0.001$, Fisher LSD 检验

H0. control; N. silent boat; O. only engine sound; B. boat; S. ship. Numbers represent the experimental days of each group, $*P \leq 0.05$, $**P \leq 0.01$, $***P \leq 0.001$, Fisher LSD Test

A区域(图3b), 而A区域存在密集的鱼群分布, 显示江豚的活跃区域受鱼群分布的影响。这个结果与长江干流和迁地保护区中江豚和鱼群的关系一致^[26, 43]。尽管调查显示老湾故道鱼类资源密度显著低于天鹅洲迁地保护区, 但是江豚在故道不同水域停留的时间与鱼类资源密度呈现显著的正相关, 这些说明, 迁入的江豚在捕食行为上表现出较好的适应性, 能在流水环境和较低密度的鱼类资源环境中, 主动探测和跟踪鱼群, 以获得足够的饵料。研究中还观察到, 在故道内的各个时期, 虽未经体长和体重测量, 江豚在捕食行为和外观上表现出健康的特征(两头江豚体态丰满, 经常合作捕食, 将鱼群驱逐至跃出水面。此外, 2022年3月对其中一头野化江豚开展了体检, 结果显示体长和体重均呈现显著增长), 据此可以推测, 江豚被放归到长江干流后, 也能较快适应鱼类资源的变化, 并能通过捕食获取所需的能量和营养。

3.2 野化江豚对高流速环境的适应

江豚在被释放进入老湾故道后, 其活动状态表现出一定的规律。经白天无间断观察, 第一天江豚在各区域之间快速游动, 可能是动物被捕获和释放后的应激反应所致, 在其他鲸类动物如港湾鼠海豚^[44]中也有类似行为反应。故道与干流连通后江豚逐渐花费更多的时间在上下游之间移动, 6月28日后巡游速度逐渐提高(巡游时间变短)并趋于稳定。推测由于故道与干流连通, 故道内流速增加, 使江豚

行为发生改变, 花费更多时间去适应新环境; 在一段时间适应期后(6月28日后), 高流速不再是影响江豚上下游移动的因素。这种逐步适应新环境的现象在其他动物中也有报道。在大熊猫放归后, 研究人员发现其活动范围逐渐扩大并趋于稳定^[9]; 双峰驼放归后仍表现出对原生存环境的依赖, 经4个月后才完全适应新环境^[45]。这显示江豚在被释放至老湾故道后, 经历了高流速环境适应期, 并形成了稳定的活动规律, 完全适应了新环境。

3.3 野化江豚发声节律的适应

江豚在水下的发声与其导航、捕食及社交活动密切相关^[37]。老湾故道的江豚发出的脉冲串集中在06: 00—09: 00, 且表现出白天发声多于晚上的特点。以往对野外江豚的研究中, 大多认为江豚夜间比白天发声更频繁^[46—48], 也有数据支持天鹅洲故道的江豚白天发声更频繁(未发布的数据); 对于不同环境下的江豚, 如较小的室内水池环境中, 其白天和夜间的发声没有明显的差异性, 或者白天比夜间发声更频繁^[49]。老湾故道中江豚发声的昼夜间差异, 可能与相对安静的环境以及饵料鱼的活动规律有关, 故道中江豚的饵料鱼占比较高的为翘嘴鲇、短颌鲚和低龄鲢鳙等, 而这些鱼类的摄食、活动高峰期集中在白天(翘嘴鲇5: 00—8: 00和14: 00—17: 00^[50], 鲢鳙16: 00—19: 00^[51]), 这说明江豚在声行为上已经适应了新环境和鱼类活动节律。

3.4 野化江豚对船舶和噪声的适应

在有航行船舶干扰时(即使船只不发出声音), 江豚的短呼吸比例减少, 长呼吸比例增加, 意味着江豚减少出水呼吸的次数, 更多地采用潜游以远离干扰源。然而, 随着相同类型干扰的次数增多, 干扰时间延长, 江豚的平均呼吸间隔逐渐下降, 接近于未干扰时的状态, 表明江豚在行为上能逐渐习惯干扰源, 比如航行船舶和噪声。研究表明, 野外的江豚和虎鲸在船只和噪声长期存在的情况下, 动物会在行为上逐渐适应噪声的干扰^[52, 53]。研究过程中还观察到, 即使在频繁的船只运动和噪声干扰下, 两头江豚始终保持同游, 未出现分散逃避的现象。基于这种现象可以推测, 江豚被释放到干流后, 能够在呼吸和社会行为上适应航运复杂的环境。因为本研究中所使用的船舶为小型船只, 而非长江干流的千吨以上的货船, 所以即使江豚适应了老湾故道中船舶的影响, 但预期江豚被释放到干流后, 对千吨以上的货船及其产生的水系噪声仍需要一段时间的适应。这可能也是江豚放归后需要加强监测的重点。

4 结论

本研究结果显示, 2头迁地保护区出生的江豚, 在经过系列科学的野化训练后, 具有适应长江中下游干流水流速度及其变化的能力, 同时在相对较低的鱼类资源密度条件下能够逐步形成有效的捕食行为, 且对于人类活动如船舶通航、噪声干扰等具有较好的躲避能力和适应性, 具备放归长江干流的条件。因为老湾故道和长江干流的环境条件、鱼类资源和航运状况等尚不完全一致, 因此建议尽快对这两头江豚实施野化放归, 并在放归后通过无线电跟踪等技术, 加强对放归个体的持续监测, 以及时掌握放归个体在干流的生存和适应状况, 尤其是应持续监测江豚对高强度航运的躲避能力和适应情况。

长江江豚的自然野化是全球首例小型淡水鲸豚类的野化尝试, 其成功与否关系到下一步规模化的野化放归, 是干流野生种群恢复的关键辅助措施之一, 亦可以作为其他小型鲸豚类动物野化工作的参考。

致谢:

衷心感谢老湾故道野化基地的王立爱、潘红文、曾恒等协助参与江豚监测。感谢水生所金韬、杨依宁、周昊杰和长江所吴金明博士、李君轶博士、朱传亚、何虹荣、张辉、盖帅帅、许兰馨参与野化训练和资源调查。感谢武汉品度科技公司提供声学监测仪器支持。

参考文献:

- [1] Crist E, Mora C, Engelman R. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection [J]. *Science*, 2017, **356**(6335): 260-264.
- [2] Johnson C N, Balmford A, Brook B W, *et al.* Biodiversity losses and conservation responses in the Anthropocene [J]. *Science*, 2017, **356**(6335): 270-275.
- [3] Malhi Y, Doughty C E, Galetti M, *et al.* Megafauna and ecosystem function from the Pleistocene to the anthropocene [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(4): 838-846.
- [4] Ceballos G, Ehrlich P R. Mammal population losses and the extinction crisis [J]. *Science*, 2002, **296**(5569): 904-907.
- [5] IUCN 2022. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2022-1. <https://www.iucnredlist.org>. Accessed on [8-11-2022]
- [6] Jiang Z G, Ma K P. The Principles of Conservation Bio-

- logy [M]. Beijing: Science Press, 2014: 445-598. [蒋志刚, 马克平. 保护生物学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 445-598.]
- [7] Wang C, Liu D P, Qing B P, *et al.* The Current population and distribution of wild crested *Ibis Nipponia nippon* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2014, **49**(5): 666-671. [王超, 刘冬平, 庆保平, 等. 野生朱鹮的种群数量和分布现状 [J]. 动物学杂志, 2014, **49**(5): 666-671.]
- [8] Ding Y H, Ren Y J, Wen H J, *et al.* Research on recovery and conservation of wild pere David's Deer population in China [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2014, **35**(2): 228-233. [丁玉华, 任义军, 温华军, 等. 中国野生麋鹿种群的恢复与保护研究 [J]. 野生动物学报, 2014, **35**(2): 228-233.]
- [9] Yang Z, Gu X, Nie Y, *et al.* Reintroduction of the giant panda into the wild: a good start suggests a bright future [J]. *Biological Conservation*, 2018(217): 181-186.
- [10] Miller B, Biggins D, Vargas A, *et al.* The Captive Environment and Reintroduction: the Black-footed Ferret as a Case Study with Comments on Other Taxa [M]. Second nature: Environmental Enrichment for Captive Animals, 1998: 97-112.
- [11] Wang H G, Wang R P. Summary on project reintroduction of *Alligator sinensis* [J]. *Anhui Forestry Science and Technology*, 2018, **44**(2): 28-32. [王宏根, 汪仁平. 扬子鳄再引入工程综述 [J]. 安徽林业科技, 2018, **44**(2): 28-32.]
- [12] Han J B, Lu Z C, Tian J S, *et al.* Release studies on spotted seals (*Phoca largha*) using satellite telemetry tracking technique [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2013, **33**(4): 300-307. [韩家波, 鹿志创, 田甲申, 等. 基于卫星信标跟踪的斑海豹放流效果研究 [J]. 兽类学报, 2013, **33**(4): 300-307.]
- [13] Hayes M F, Banish N P. Translocation and reintroduction of native fishes: a review of bull trout *Salvelinus confluentus* with applications for future reintroductions [J]. *Endangered Species Research*, 2017(34): 191-209.
- [14] Veysey J S, Babbitt K J, Cooper A. An experimental assessment of buffer width: implications for salamander migratory behavior [J]. *Biological Conservation*, 2009, **142**(10): 2227-2239.
- [15] Li X, Huo Z P, Yu X P. Cause of death of the crested *Ibis* of A reintroduced population in Ningshan, Shaanxi [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2013, **48**(5): 701-706. [李夏, 霍志萍, 于晓平. 陕西西峡朱鹮再引入种群个体死亡原因分析 [J]. 动物学杂志, 2013, **48**(5): 701-706.]
- [16] Wang K X, Mei Z G, Zheng J S, *et al.* Reintroduction of the Yangtze Finless Porpoise: Policy and Technical Requirements [C]. 2018 Proceedings of the Aquatic Wildlife Protection Sub Forum of the Yangtze River Biological Resources Protection Forum. 2018: 66-75. [王克雄, 梅志刚, 郑劲松, 等. 长江江豚野化放归: 政策和技术需求 [C]. 2018长江生物资源保护论坛水生野生动物保护分论坛论文集. 2018: 66-75.]
- [17] Huang Z X, Wang K, Cai D J, *et al.* Acclimation of captive crested *Ibis (Nipponia nippon)* before reintroduction in Dongzhai of Henan Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(11): 3017-3022. [黄治学, 王科, 蔡德靖, 等. 河南董寨朱鹮再引入释放前的野化训练 [J]. 生态学杂志, 2016, **35**(11): 3017-3022.]
- [18] Wang D. Progress achieved on natural *ex situ* conservation of the Yangtze finless porpoise. IUCN SSC Cetacean Specialist Group. 2015.
- [19] Jiang W H, Huang L X, Yu D P. Status and solution of the ex-situ conservation Yangtze finless porpoise in Tongling freshwater porpoise national nature reserve [J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, **31**(3): 109-112. [蒋文华, 黄立新, 于道平. 铜陵淡水豚自然保护区江豚迁地保护现状与对策 [J]. 水生态学杂志, 2010, **31**(3): 109-112.]
- [20] Tao F. Study on the distribution regularity and its influencing factors of the ex-site population of the Yangtze finless porpoise of the Xijiang River in Anqing City [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018: 9-10. [陶峰. 安庆市西长江江豚迁地种群分布规律及影响因素研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2018: 9-46.]
- [21] Huang J, Mei Z, Chen M, *et al.* Population survey showing hope for population recovery of the critically endangered Yangtze finless porpoise [J]. *Biological Conservation*, 2020(241): 108315.
- [22] Li Y T, Wang D. Estimation of the carrying capacity of Yangtze finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*) in Tian-e-zhou oxbow based on linear food network model [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, **18**(5): 6981-6994.
- [23] Chen M M, Zheng J S, Gong C, *et al.* Inbreeding evaluation on the ex situ conserved Yangtze finless porpoise population in Tian'ezhou National Natural Reserve [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2014, **49**(3): 305-316.
- [24] Nabi G, Hao Y J, Robeck T R, *et al.* Physiological consequences of biologic state and habitat dynamics on the critically endangered Yangtze finless porpoises (*Neophocaena asiaeorientalis ssp. asiaeorientalis*) dwelling in the wild and semi-natural environment [J]. *Conservation Physiology*, 2018, **6**(1): coy072.
- [25] Yang M, Sheng P, Zhang Y P, *et al.* Characteristics of fish assemblages of Poyang Lake at the initial stage of the fishing ban [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(10): 1569-1579. [阳敏, 盛漂, 张燕萍, 等. 禁捕初期鄱阳湖鱼类群落的结构特征 [J]. 水生生物学报, 2022, **46**(10): 1569-1579.]
- [26] Ma F J, Yang Y P, Fang D, *et al.* Characteristics of coilia nasus resources after fishing ban in the Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(10): 1580-1590. [马凤娇, 杨彦平, 方弟安, 等. 长江禁捕后长江口刀鲚资源特征 [J]. 水生生物学报, 2022, **46**(10): 1580-1590.]
- [27] Zheng X A. 'Smiling Angels' appear in Yangtze.

- Changjiang Weekly (2022); http://news.cjn.cn/bsy/sy_20086/202203/t3995016.htm.
- [28] Simon M, Hanson M B, Murrey L, *et al.* From captivity to the wild and back: An attempt to release Keiko the killer whale [J]. *Marine Mammal Science*, 2009, **25**(3): 693-705.
- [29] Wells R S, Bassos-Hull K, Norris K S. Experimental return to the wild of two bottlenose dolphins [J]. *Marine Mammal Science*, 1998, **14**(1): 51-71.
- [30] Antrim J. Logistics of maintenance, rehabilitation and return to the Pacific Ocean of a California gray whale calf [J]. *Aquatic Mammals*, 2001, **27**(3): 228-230.
- [31] Wang S Y. Soft release of captive Yangtze finless porpoises [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2012: 27-29. [王士勇. 人工饲养长江江豚的软释放 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2012: 27-29.]
- [32] Dong C Y, Li J Y, Zhang H, *et al.* Fish resource status in the white-flag dolphin national nature reserve of Tian-e-Zhou oxbow, Yangtze River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, **42**(3): 86-92. [董春燕, 李君轶, 张辉, 等. 长江天鹅洲白鱘豚国家级自然保护区鱼类资源现状 [J]. 水生生态学杂志, 2021, **42**(3): 86-92.]
- [33] Zhu Y, Liao W G, Feng S X. Study on the physical habitat characteristics of Yangtze finless porpoise in Tian-e-Zhou Oxbow of Yangtze River [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2012, **10**(3): 185-191. [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.]
- [34] Yang Y N. Study on underwater noise in Xinluo section of the Yangtze River and its influence on the Yangtze finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*) [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2022: 5-9. [杨依宁. 长江新螺段水下噪声及其对长江江豚影响研究 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2022: 5-9.]
- [35] Li W, Qiu J, Lei P, *et al.* A real-time passive acoustic monitoring system to detect Yangtze finless porpoise clicks in Ganjiang River, China [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022(9): 883774.
- [36] Fang L, Wang D, Li Y, *et al.* The source parameters of echolocation clicks from captive and free-ranging Yangtze finless porpoises (*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*) [J]. *PLoS One*, 2015, **10**(6): e0129143.
- [37] Wang K, Wang D, Akamatsu T, *et al.* A passive acoustic monitoring method applied to observation and group size estimation of finless porpoises [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, **118**(2): 1180-1185.
- [38] Akamatsu T, Wang D, Wang K, *et al.* Estimation of the detection probability for Yangtze finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) with a passive acoustic method [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, **123**(6): 4403-4411.
- [39] Akamatsu T, Wang D, Wang K, *et al.* Biosonar behaviour of free-ranging porpoises [J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2005, **272**(1565): 797-801.
- [40] Miller L A, Pristed J, Moshl B, *et al.* The click-sounds of narwhals (*Monodon monoceros*) in Inglefield Bay, north-west Greenland [J]. *Marine Mammal Science*, 1995, **11**(4): 491-502.
- [41] Xiao J, Wang D. Respiratory pattern of captive Yangtze finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) [J]. *Journal of Ethology*, 2006, **24**(3): 205-212.
- [42] Yu D, Jiang W, Mi L. Preliminary observations on feeding behavior of finless porpoises in a semi-nature reserve of Yangtze River [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2003(3): 198-202. [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观察 [J]. 兽类学报, 2003(3): 198-202.]
- [43] Zhang X, Yu D, Wang H, *et al.* Effects of fish community on occurrences of Yangtze finless porpoise in confluence of the Yangtze and Wanhe Rivers [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(12): 9524-9533.
- [44] Eskesen I G, Teilmann J, Geertsen B M, *et al.* Stress level in wild harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) during satellite tagging measured by respiration, heart rate and cortisol [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2009, **89**(5): 885-892.
- [45] Xue Y D, Li D Q, Sun Z C, *et al.* Using satellite tracking collars to monitor released captive-bred wild Bactrian camels [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2017, **37**(4): 336-343. [薛亚东, 李迪强, 孙志成, 等. 利用卫星追踪颈圈对圈养野生双峰驼野化放归的监测 [J]. 兽类学报, 2017, **37**(4): 336-343.]
- [46] Wang Z, Akamatsu T, Mei Z, *et al.* Frequent and prolonged nocturnal occupation of port areas by Yangtze finless porpoises (*Neophocaena asiaeorientalis*): forced choice for feeding [J]? *Integrative Zoology*, 2015, **10**(1): 122-132.
- [47] Chen M, Yu D, Wang K, *et al.* Seasonal and diel activities of the Yangtze finless porpoise in natural and highly disturbed habitats: implications for conservation planning of freshwater cetaceans [J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2022, **32**(4): 605-616.
- [48] Zhou L, Chen X, Duan P X, *et al.* Spatial-temporal variations in biosonar activity of Yangtze finless porpoise in the lower reaches of the Yangtze River and its correlation with underwater noise: are quieter non-shipping branches the remaining shelters [J]? *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2021, **31**(4): 964-978.
- [49] Wang K X. On the behavior and acoustic observation of the Yangtze finless porpoise [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005: 75-79. [王克雄. 长江江豚行为和声学观察研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2005: 75-79.]

- [50] Hu W B. Study on Ontogenetic Development and Feeding in Hybrid between *Ancherythroculter nigrocauda* (♂) and *Culter alburnus* (♀) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012: 33-36. [胡文彪. 翘嘴鲌(♀)和黑尾近红鲌(♂)杂交F1代仔稚鱼发育和摄食特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012: 33-36.]
- [51] Chen S L, Hu C L, Zhang S Y. Feeding intensity of silver carp and bighead under natural condition (i) Feeding intensity of fingerlings of silver carp and bighead in summer [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1986, **10**(3): 277-285. [陈少莲, 胡传林, 张水元. 鲢、鳙在天然条件下的摄食强度 (I) 鲢、鳙鱼种在夏季的摄食强度 [J]. 水生生物学报, 1986, **10**(3): 277-285.]
- [52] Dong S Y, Dong L J, Li S H, *et al.* Effects of vessel traffic on the acoustic behavior of Yangtze finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) in the confluence of Poyang Lake and the Yangtze River: using fixed passive acoustic observation methods [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(2): 246-254. [董首悦, 董黎君, 李松海, 等. 江西鄱阳湖湖口水域船舶通行对长江江豚发声行为的影响 [J]. 水生生物学报, 2012, **36**(2): 246-254.]
- [53] Tixier P, Gasco N, Duhamel G, *et al.* Habituation to an acoustic harassment device (AHD) by killer whales depredating demersal longlines [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2015, **72**(5): 1673-1681.

THE FIRST CASE OF REINTRODUCTION AND BEHAVIORAL ADAPTABILITY OF YANGTZE FINLESS PORPOISE

QIU Jian-Song^{1,2}, SUN Xiao-Dong^{1,2}, WANG Ding^{1,3}, HAO Yu-Jiang^{1,3}, ZHENG Jing-Song^{1,3}, LI Wei-Lun³,
FAN Fei^{1,3}, DENG Xiao-Jun^{1,3}, MAO Jun-Feng⁴, ZENG Qiang⁴, JIANG Hua-Yan⁴, DENG Zai-Gui⁴,
GONG Cheng⁵, XU Chun-Yong⁵, WANG Ke-Xiong^{1,3} and MEI Zhi-Gang^{1,3}

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China; 3. Wuhan Baiji Conservation Foundation, Wuhan 430076, China; 4. Administrative Bureau of Hubei Changjiang Xinluo Baiji National Nature Reserve, Honghu 433200, China; 5. Administrative Bureau of Tian-e-Zhou Baiji National Natural Reserve, Shishou 434400, China)

Abstract: The *ex situ* conservation of the first-class protected animal in China, Yangtze finless porpoise (YFP), have gained preliminary success. As the last step in *ex situ* conservation, reintroduction is an inevitable requirement for achieving the goal. Under this circumstance, two male YFPs from the *ex-situ* group in Tian-e-Zhou Oxbow were translocated to Laowan branch in April 2021 for the very first acclimation training attempt to study the adaptive process of their behavior and vocalization, and to figure out whether they can adapt to the harsh environment in terms of feeding behavior and diel activities. The attempt is expected to accumulate experience for the large-scale reintroduction adaptation training of the porpoise into Yangtze River in the future. After one year of training and continuous monitoring, the results showed that the density of fish in Laowan branch is significantly lower compared to that of Tian-e-Zhou Oxbow. The shoal of fish is unevenly distributed during the wet season, and the density being higher in upstream than that in the middle and downstream. The average time expense of YFP in the upstream is significantly higher than that in the middle and downstream. Spearman correlation analysis shows that there is a significant correlation with the density distribution of fish. During the first two months of entering the branch, the time required for YFP to cruise downstream gradually increased to a peak, then decreased and stabilized. In the training of ship noise adaptability, the average breathing interval of porpoises decreased significantly in the presence of ship interference, and gradually recovered to the level of non-interference with the increase of interference times. Our study indicates that the two porpoises have kind adaptability to the high flow velocity, low fish resource density and artificial vessel noise interference in the branch and are feasible to release into the Yangtze River. This is the first time that the adaptation training of YFP in a completely natural environment has been implemented, which will provide technical support for large-scale release and promote the recovery of YFPs' natural population.

Key words: Yangtze River; *Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*; Acclimation; Adaptiveness; Release; *Ex situ* conservation