

DOI: 10.3724/SP.J.1035.2012.00246

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

董首悦^{1,2} 董黎君^{1,2} 李松海¹ 木村里子³ 赤松友成⁴
王克雄¹ 王 丁¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 日本京都大学信息学研究生院, 京都 606-8510; 4. 日本国立水产工学研究所, 茨城 314-0421)

摘要: 江西鄱阳湖是长江江豚(*Neophocaena phocaenoides*)的重要栖息地, 湖中栖息着约 400 头江豚。多年的观察表明, 船舶交通是鄱阳湖中江豚面临的重要威胁之一。为了评估船舶通行对长江江豚发声行为的影响, 尤其是了解船舶通行期间及其前后江豚的发声和行为特征, 作者于 2007 年 6 月 27 日—7 月 1 日在江西鄱阳湖湖口水域采用固定被动声学系统, 即安装在监测点(29°42'38" N, 116°11'11" E)的一套水下声学数据记录系统, 对周边通行船舶的水下噪声及江豚声纳信号脉冲事件进行了定点监测和记录, 并对所记录的数据进行了定量和统计分析。在整个监测的 109h 中, 声学记录仪共记录到船舶 494 艘, 江豚声纳脉冲串信号 13413 个。船舶出现与江豚出现存在弱的负相关关系($r = -0.029$, $N = 6550$, $P < 0.05$); 船舶出现与江豚相邻脉冲串的时间差为(49.1±62.8)s, 并且小于 60s 的占 72.9%, 同时, 船舶经过之前和之后, 该时间差未有显著性差异($Z = -0.370$, $P > 0.05$); 当有船舶经过时, 江豚的发声频次显著降低($Z = -10.050$, $P < 0.05$), 但脉冲串持续时间、脉冲间间隔变化不显著($Z = -0.275$, $P > 0.05$; $Z = -0.119$, $P > 0.05$); 船舶通行之前和之后, 江豚的发声频次、脉冲串持续时间、脉冲间间隔的差异性均不显著($\chi^2 = 5.255$, $P > 0.05$; $\chi^2 = 3.511$, $P > 0.05$; $\chi^2 = 5.155$, $P > 0.05$); 在船舶经过时, 江豚对游动方向没有明显的选择性($\chi^2 = 0.861$, $P > 0.05$)。基于分析结果推测, 在狭窄水域中江豚躲避船舶干扰通常采取“临时性”策略, 而非长距离逃避。由于鄱阳湖湖口水域水道相对狭窄, 尽管研究的结果表明江豚对船舶有一定的敏感反应, 但是在相对狭窄的水域中, 江豚躲避船舶的行为难以充分表现。另外, 江豚对该水域中高密度航行船舶的噪声可能存在一定的“适应性”, 导致当遭遇船舶时, 江豚的声行为反应不十分强烈。因此, 建议有必要在不同尺度的水体中采用声学数据记录仪继续开展类似的观察, 以进一步了解江豚对船舶的行为响应, 尤其是观察江豚躲避船舶的行为及发声特征。

关键词: 长江江豚; 船舶通行; 发声行为; 固定声学系统; 鄱阳湖湖口

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2012)02-0246-09

江豚(*Neophocaena phocaenoides*)备受人们关注, 不仅在于它是鼠海豚科中研究较少的代表种之一 [IUCN 受胁物种红皮书将江豚定级为了解不够 (1994), 数据缺乏 (1996), 易危级 (2008)], 还因其同时具有海洋和淡水两种群体 (生活在不同环境的群体, 其声纳的作用可能不同)^[1]。作为唯一的淡水江豚亚种, 长江江豚(*N. p. asiaeorientalis*)仅分布于长江中下游流域及其通江湖泊 (洞庭湖、鄱阳湖)。在

过去的几十年内, 由于对渔业资源的滥捕造成鱼类种群衰减、水体污染、水上交通以及水利工程建设等人为活动的干扰, 长江江豚栖息地正逐渐恶化和丧失, 种群数量也正持续且快速地减少^[2, 3]。2006 年的大型科学考察评估该群体数仅剩 1800 头, 不及 1984—1991 年群体数估计值的一半^[4]。早期的调查表明, 鄱阳湖中长江江豚的数量相对稳定 (约 400 头)^[5, 6], 并且在鄱阳湖与长江相通的湖口水域江豚

收稿日期: 2010-12-02; 修订日期: 2011-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(30730018)资助

作者简介: 董首悦(1983—), 男, 北京人; 学士; 主要从事鲸类声学研究。E-mail: shouyuedong@163.com

通讯作者: 王丁(1958—), 男, 湖北崇阳人; 博士; 主要从事鲸类保护生物学研究。E-mail: wangd@ihb.ac.cn

通常能自由进入长江或鄱阳湖^[7]。

噪声污染被认为是对海洋哺乳动物的潜在威胁^[8]。早在 1911 年, 隆巴德(Lombard)就注意到: 当周围环境噪声升高, 人在接收来其自身发出的声音时, 发觉感知到的声音强度下降了, 此时说话人的发声强度会作出相应的提高, 借此将信号/噪声比维持在有利于通信的状态^[9]。在鸣禽和灵长目动物中也发现了这种隆巴德发声反应(Lombard vocal response), 而在海洋哺乳动物中最早发现于白鲸^[8](*Delphinapterus leucas*)。长江江豚是依赖回声定位系统生存的动物^[10], 对船舶水下噪声敏感, 并且在行为上有所表现^[11]。在野外工作中, 由于江豚出水呼吸时间短促, 水下行为无法观察, 因此, 观察船舶对江豚行为的影响相对困难, 但是江豚行为的改变通常与其发出的声信号相关联^[12, 13], 因此, 关注船舶通行对江豚发声的影响将有助于更全面分析江豚对船舶噪声的反应。此外, 大型船舶航行通常是昼夜连续航行的, 在夜间无法观察江豚的行为, 相反, 白昼和黑夜连续记录江豚的声音, 并借此分析其行为是可行的。

近年来, 鄱阳湖采沙活动频繁, 大量运沙船频繁进出鄱阳湖。由于鄱阳湖湖口是江豚进出鄱阳湖的唯一通道, 评价该水域船舶通行对江豚的影响有助于推进江豚的保护工作, 尤其是制订切实可行的控制船舶航行速度、航行路线等的保护对策。本研究采用固定声学系统, 记录航行船舶的噪声, 同时记录江豚的发声事件, 并探讨船舶通行对江豚的影响, 在此基础上提出了相应的针对鄱阳湖湖口特殊环境的江豚保护对策。

1 材料与方法

1.1 研究地点

本实验于 2007 年 6 月 27 日—7 月 1 日在鄱阳湖湖口的公路桥、铁路桥之间水域开展。监测点(29°42'38" N, 116°11'11" E)距离南岸约 380 m(2007 年 11 月), 位于铁路桥下游约 2000 m, 公路桥上游约 1000 m(图 1)。

1.2 水下声学监测仪器

本研究中所使用的水下声学记录仪(Acoustical data logger, Marine Micro Technology, Japan)直径 2.2 cm, 长 12.2 cm, 重 77.0 g。声学记录仪上安装有两个相距 170 mm 的水听器, 用于接收声信号并

根据声信号到达两个水听器的时间差确定声源方向和估计方位角。两个水听器的方向与纵轴垂直, 水听器灵敏度均为 $-201 \text{ dB re } 1 \text{ V}/\mu\text{Pa} @ 120 \text{ kHz}$ (100—160 kHz, 5 dB 带宽)。记录仪内部有 1 个用于过滤背景噪声的带通滤波器(70—300 kHz), 1 个 A/D 转换器, 1 块 256 M 内存, 1 个用于控制和数据处理的 CPU(PIC18F6620, Microchip, USA), 以及 1 个微型高频脉冲事件记录器。整个内部集成电路板放置在一个耐压铝管内。该声学记录仪使用 2 节 UM-1 碱性电池供电, 在正常使用条件下可以连续工作 30d。

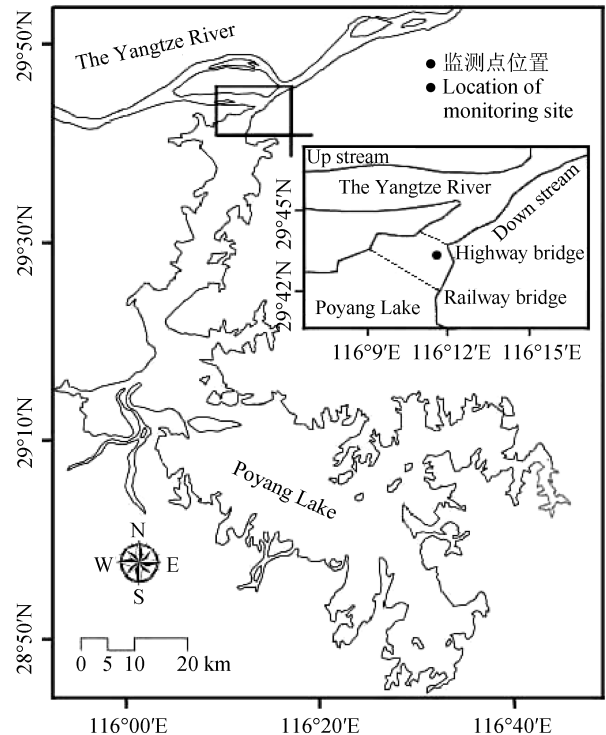


图 1 鄱阳湖湖口水域

Fig. 1 The confluence of Poyang Lake and the Yangtze River

声学数据记录仪是一台声学事件记录仪器, 它不记录声音信号本身(波形), 只以 2 kHz 的采样率记录声压和两个水听器接收到信号的时间差。江豚声纳信号的声源级约为 $197 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa p-p} @ 1 \text{ m}$ ^[14], 记录仪可以接收并记录附近约 300 m 范围内的江豚发出的回声定位信号^[15]。一旦两个水听器中的一个被超过预设的 $137.6 \text{ dB(re } 1 \mu\text{Pa)}$ 的声信号触发, 其将以 0.5 ms 为间隔(2 kHz)连续记录信号的声压和时间。如果信号的声压低于 137.6 dB, 声学记录仪将不做任何记录, 以节省内存贮器的存

贮空间。同时,一旦两个水听器中的一个被触发,记录仪的“时间差”检测和记数功能即启动(检测声音到达两个水听器的时间差),其检测间隔为 271 ns(3.7 MHz)。当另一个水听器被超过预设的 137.6 dB 的声信号触发,“时间差”检测和记数即停止。声学记录仪被固定在一根铁棒上,将该铁棒绑有记录仪的一端放入水中,另一端固定在航标船上,记录仪上的水听器距水面约 1 m。航标船前后两端均有锚固定,在一定程度上能保持记录仪的方向不变,并与水流的方向平行。

1.3 数据分析方法

所采集的水下声学数据下载到电脑后,使用自编的程序(基于 Igor 软件, WaveMetrics, Lake Oswego, OR, USA)进行分析。在江豚发出的高频脉冲串信号中,声压、脉冲间间隔呈有规律变化,典

型的脉冲间间隔为 10—80 ms^[15, 16],图 2A 展示了典型的江豚声纳信号的声压(SP)、两个水听器接收到信号的时间差(Td)和脉冲间间隔(ICI),而水下噪声的声压和脉冲间间隔的变化是没有规律的(图 2B)。基于这些差异特征,我们可较容易地从背景噪声中提取出江豚的声纳信号。又因为江豚声纳信号的脉冲串持续时间一般小于 130 ms^[16],所以本研究定义持续时间小于 130 ms 的至少 6 个脉冲信号为一个脉冲串。

为了在众多噪声中筛选出江豚的声纳信号,通过自编程序首先剔除小于 134.9 dB p-p 的信号。对于那些连续脉冲间间隔呈不规则变化的脉冲(即后一个脉冲间间隔小于前一个脉冲间间隔的 1/2 或更小,或者后一个脉冲间间隔大于前一个脉冲间间隔的 2 倍或更大),被作为噪声剔除^[17-19]。

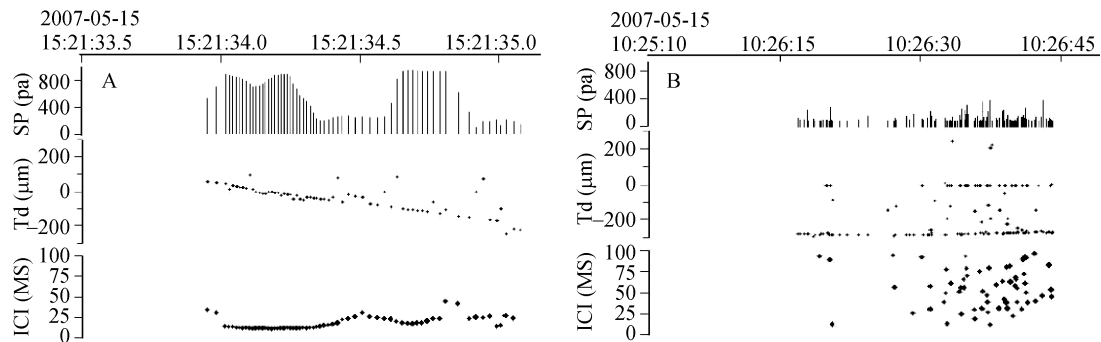


图 2 长江江豚声纳信号 A 和船舶噪声 B 特性

Fig. 2 Characteristic of sonar signal of the Yangtze finless porpoise A and underwater noise of a boat B

江豚的出现时间定义为在 1min 内记录仪检测到至少 1 个江豚声纳信号的时间。只有当两个水听器接收到的江豚声纳信号的时间差(Td)由“正值”变到“负值”或是由“负值”变到“正值”,也就是越过了“零点”时,才定义江豚的游动方向为从上游到下游或者从下游到上游。当动物没有越过“零点”时,则记录为在上游或者在下游活动。而当不止 1 头江豚在该水域活动时,因很难确切分辨出每头动物的游动方向,所以只能通过计数动物穿越“零点”的次数来判断它们的游动方向,并定义如下:如果这些江豚下行次数大于上行次数,那么动物是向下游移动,反之则向上游移动。动物来回穿越“零点”和始终在记录仪上游或下游活动的行为,则被定义为“徘徊”行为。根据声学记录仪探测江豚回声定位信号的范围约 300 m,而江豚游泳速度约为 4.3 km/h^[18],

因此,当动物径直经过声学记录仪时,应在 4 min 内被探测发现。

由于本研究没有另设人工对照组(如通过人为控制船的行驶时间、路线等),而是以前、后 30 min 内都没有船舶出现时,这段时间监测到的江豚的回声定位信号为对照组。

船舶出现时间定义为船舶位于声学记录仪两个水听器中垂线上的时刻。这时,两个水听器接收到同一个声信号的时间差为零。由于本研究主要探讨船舶出现对江豚短时间内的影响,因此我们保留船舶经过前、后各 5 min 内的数据,并根据以上定义,统计了船舶与江豚相邻脉冲串之间的时间差,用 Mann-Whitney U Test 检测船舶经过前、后的差异性。我们以 1 min 为单位,通过 Pearson χ^2 来检验船舶与动物的出现关系。为了研究江豚在船舶经过前、后

回声定位信号的改变, 我们还设置了 6 个时间段 (-3—-2, -2—-1, -1—0, 0—1, 1—2, 2—3, 0 为船舶经过的时刻), 并用 Mann-Whitney U Test 检测江豚发声频度、脉冲串持续时间和脉冲间间隔与对照组的差异性。6 个时间段之间的数据用 Kruskal-Wallis Test 检验。在探讨江豚和船舶移动方向时, 只保留船舶经过前、后各 5min 内江豚游动方向的数据, 并使用 Pearson χ^2 进行检验。Pearson Correlation 检验船舶出现时间、江豚出现时间的相关关系。基于江豚游泳速度(4.3 km/h)和记录仪可检测范围(300 m)估计, 当动物径直经过声学记录仪时, 应在 4min 内被探测到。此外, 过去类似的工作还基于 SP、ICI、Td 的变化曲线估算江豚的数量^[19]。鉴于此, 本研究对动物数量判定采用以下规则: 两个脉冲串之间时间间隔在 4min 以内, 视为同一头江豚发声; 两个脉冲串之间时间间隔超过 4min 小于 8min, 且位于“零点”的同一侧时, 视为同一头江豚发声; 两个脉冲串之间时间间隔超过 4min 小于 8min, 但位于“零点”的两侧时, 视为不同的江豚发声; 两个脉冲串之间时间间隔超过 8min, 视为不同的江豚发声; 在同时发现两头或以上江豚时, 作出保守的数量估计: SP 和/或 ICI 呈现两个或多个不同水平, 而 Td 只呈现出一条曲线时, 视为两头或两头以上江豚发声(每头江豚声信号的 SP 和/或 ICI 存在一定差异); SP 和/或 ICI 呈现一个水平时, 但 Td 呈现出不同的几条曲线时, 则视为同一

动物发声(动物在移动过程中, 动物方位角的变化会导致声信号到达两个水听器的时间差呈现变化)。此外, 由于本研究并非估计江豚种群数量, 而是关注江豚个体的声行为, 因此, 本研究数据处理过程中接受对同一头或同一群江豚的重复计数。

2 结果

实验期间声学记录仪正常工作 109h, 记录到江豚回声定位信号脉冲串 13413 个, 船舶 494 艘。江豚有 125 次下行, 145 次上行。结果显示, 船舶出现与江豚出现存在弱的负相关($r = -0.029$, $N = 6550$, $P < 0.05$)。船舶与江豚相邻脉冲串的时间差为(49.1 ± 62.8)s, 其中小于 60s 的占 72.9%(图 3), 而且船舶经过之前、之后没有显著性差异($Z = -0.370$, $P > 0.05$)。船舶经过声学仪之前、之后的 6 个时间段内, 动物发声频度没有显著性差异($\chi^2 = 5.255$, $P > 0.05$), 而对照组与所有的 6 个时间段之间均存在显著性差异($Z = -10.050$, $P < 0.05$)(图 4A)。6 个时间段内, 脉冲串持续时间、脉冲间间隔均没有显著性差异(脉冲串持续时间: $\chi^2 = 3.511$, $P > 0.05$; 脉冲间间隔: $\chi^2 = 5.155$, $P > 0.05$), 对照组与 6 个时间段之间同样没有显著性差异(脉冲串持续时间: $Z = -0.275$, $P > 0.05$; 脉冲间间隔: $Z = -0.119$, $P > 0.05$)(图 4B 和图 4C)。

78 艘船舶被用于研究船舶行驶方向与江豚游动方向的相关分析, 其中 61 艘向上行, 17 艘向下行。

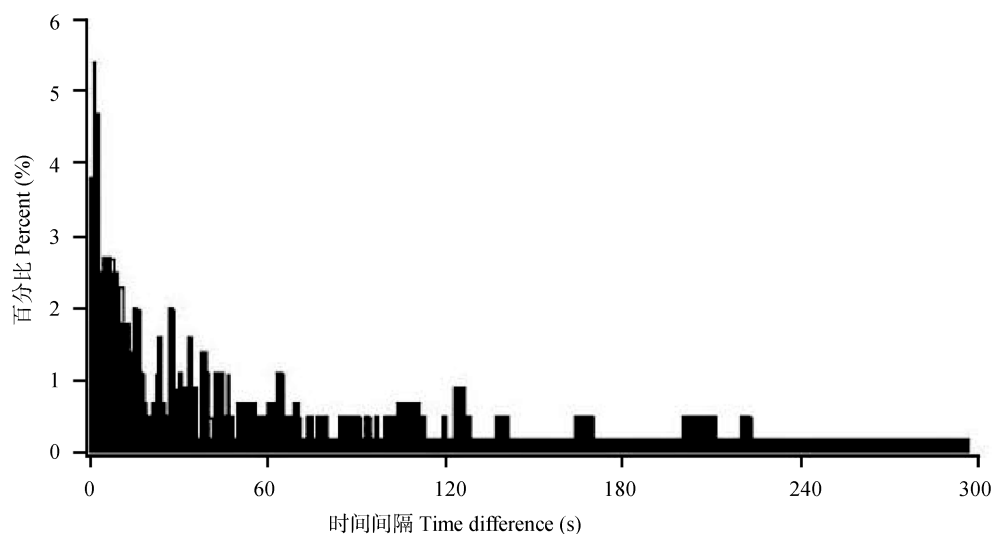


图 3 船舶与相邻脉冲串的时间差所占比例

Fig. 3 The proportion of time difference between ships and adjacent click trains of porpoises

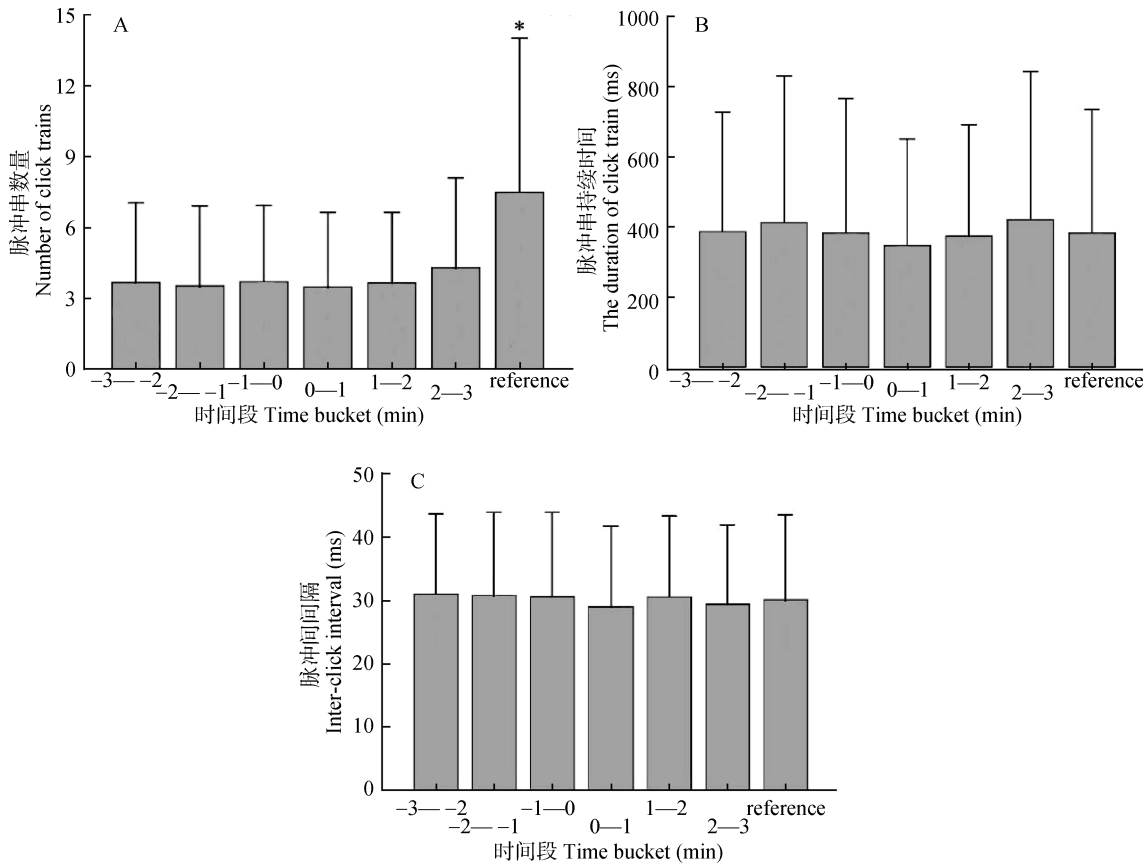


图 4 船舶经过声学仪之前、之后江豚的发声频度 A, 脉冲串持续时间 B 和脉冲串的脉冲间间隔 C(*示差异性显著, $P < 0.05$)

Fig. 4 Comparisons of click trains of porpoises between ships approaching and departure: phonation rate A, duration B and inter-click interval C of click trains (* significant difference)

表 1 船舶行驶方向和江豚游动方向
Tab. 1 The directions of ships and porpoises

船与监测点的位置关系 Relations of the vessel and monitor site	船舶航向 Shipping direction	江豚游向 Swimming direction of porpoise		总计 Total
		上游 Up stream	下游 Down stream	
靠近 Approach	上游 Up stream	21	15	36
	下游 Down stream	8	3	11
离开 Departure	上游 Up stream	20	16	36
	下游 Down stream	4	6	10
总计 Total		53	40	93

从船舶经过前、后江豚的游动方向来看(表 1), 在船舶经过时, 江豚游泳方向不存在显著性差异($\chi^2 = 0.861, P > 0.05$)。

3 讨论

每天经由湖口进出鄱阳湖的船舶数量多达百余艘。在本研究中的 109h 内就监测到 494 艘船舶。而在八里江江段, 2009 年 4 月 10 日 14:00 至 16:00 短短 2h 内就有 45 艘船经过, 这其中包括一般的小渔船、运砂船、集装箱船和运油船等, 它们小到几米

长, 大到数十米长。船舶航行是湖口水域主要人类活动。

有关船舶对长江江豚行为的影响, 有研究发现过往船只对江豚存在明显的干扰, 特别是船只变速行驶时, 江豚反应更为警觉。它们逃跑时一般先采取分散深潜方式, 快速潜逃, 深潜时间可达 3—5min。有时遇到紧急情况, 深潜躲避不及时就采用跳跃方式逃窜^[20, 21]。另外江豚对机动船发出的水下噪声常表现出紧张不安, 当噪声远而弱

时, 江豚会行深潜回避声源, 而当声源近而强时则立即深潜逃避^[11]。但是也有部分研究发现江豚对船舶不敏感: 由于江豚属近岸生活的豚类, 它们在江边游泳时, 对往来的船只或岸上的人类活动, 都不产生恐惧^[22]。在有关江豚春季对生境的选择的研究中, 发现江豚常常在上行航道及人类干扰最为强烈的采砂水域活动^[23]。另外, 江豚摄食, 特别是群体摄食时对干扰反应较迟钝^[11], 对船只的出现一般反应比较冷淡, 且对船只靠近的反应主要是逃避行为^[6]。

上述有关江豚避船行为的研究都是通过目视观察得到的结果。然而目视观察很难准确地探讨船舶对江豚的影响, 因为江豚长潜水和短潜水的平均时间分别为 70.9s 和 4.9s^[24], 在船舶经过时, 动物有可能通过长潜水进行躲避, 加之出水呼吸时间短暂^[24, 25], 目视观察发现动物的机会因此降低。而本实验采用的声学数据记录仪可以记录 300 m 范围内江豚的回声定位信号以及 150 m 范围内经过的船舶, 而湖口水域最常见的船舶是长约 50 m 的运砂船。最新研究发现本实验采用的记录仪的探测能力大约是目视观察的 7 倍^[19]。因此, 声学监测能更全面而准确地记录动物的行为, 尤其是用于监测和记录动物的水下发声行为。

本实验以 1min 为单位时间分析了江豚和船舶出现的相关关系, 发现江豚与船舶出现存在弱的负相关($r = -0.029$, $N = 6550$, $P < 0.05$)。这说明江豚对船舶出现有一定程度的敏感性, 或者说船舶出现会对江豚产生一定程度的干扰。因为相关关系比较弱, 所以, 本研究初步认为在湖口水域江豚对船舶干扰的反应并非十分强烈。这种非强烈的反应或许是江豚对湖口水域特殊环境的一种适应。湖口水域是鱼类出湖入湖的唯一通道, 鱼类资源较丰富, 江豚以鱼为食, 喜栖息在该水域, 但是湖口水道狭窄, 即使在丰水期, 大部分水面是浅水区, 江豚不敢进入。因此, 推测认为即使船舶对江豚有明显负影响, 但是因为江豚躲避船舶的范围极其有限, 所以江豚不可能表现出长距离逃避行为, 只能采取一种“临时性”的避船策略。基于船舶与相邻脉冲串的时间差的长短计算, 船舶通行时, 江豚发声频度大多低于正常条件下的发声频度, 比例达 83.6%, 说明船舶的出现在短时间内会改变江豚的发声行为。在分析船舶通行对白鲸的影响时发现, 其发声与噪声存在直接相关(相关系数为 0.795), 发声强度的改变中有

63%是由背景噪声引发的^[8]。

动物游动方向的改变可以反映船舶对其造成的影响。当动物感觉到威胁时, 它们会采取遭遇捕食者时同样的躲避策略, 如在垂直方向上躲避(深潜水), 或者在水平方向上躲避、远离干扰^[26]。本研究分析表明, 在船舶经过之前和之后, 江豚对游动方向没有选择性($\chi^2 = 0.861$, $P > 0.05$), 这可能是因为湖口水域环境狭窄, 江豚被迫采取的一种“临时性”躲避船舶干扰的策略。躲避干扰时游动方向是比较随机的。虎鲸(*Orcinus orca*)在有船舶靠近时也会出现躲避行为, 其游动路线比无干扰状态下难以预料^[27]。

齿鲸回声定位信号的持续时间和脉冲间间隔可以间接反映动物的行为状态。瓶鼻海豚(*Tursiops aduncus*)在船舶靠近和停留时回声定位信号的持续时间没有发生变化^[28]。而虎鲸回声定位信号持续时间会在船舶靠近和离去时明显延长^[29]。在本研究中, 无论是船舶通行之前、之后 6 个时间段之间, 还是其相比于对照组, 动物脉冲串持续时间、脉冲间间隔均没有显著性差异。此外鲸类在受到外界干扰时, 其发声频度变化不一: 抹香鲸(*Physeter catodon*)暴露在军用声纳干扰以及长鳍领航鲸(*Globicephala melaena*)和抹香鲸在受到低频声信号干扰时会暂时停止发声^[30, 31]; 虎鲸在船舶经过时发声频度没有显著性的改变^[28]; 瓶鼻海豚在船舶经过或靠近时, 其发声频度或没有显著性改变^[29], 或有所增加^[32]; 船舶通行时, 中华白海豚(*Sousa chinensis*)的答声以及爆裂脉冲声的发生频度没有变化, 然而当船舶距豚群 ≤ 1.5 km 时, 白海豚却能迅速提高其哨叫声的发声频度^[33]。本研究发现船舶通行能显著降低长江江豚的发声频度($Z = -10.050$, $P < 0.05$)。这说明长江江豚对船舶出现时产生的干扰采用的对策与抹香鲸和长鳍领航鲸类似, 都是降低发声频度, 而不是改变回声定位信号的持续时间和脉冲间间隔。在湖口水域中, 航行船舶是江豚遭遇到的最频繁的和最强烈的人类活动, 由于长期的适应, 江豚对船舶的回声特征可能比较熟悉, 当船舶通过时, 江豚不一定把船舶当成陌生的水下目标而进行长时间探测, 加之船舶发出的强噪声亦是一种强烈的警示声信号, 使得江豚在遭遇航行船舶时, 其发声的频度下降, 并且声信号的结构保持不变。这反映了长江江豚会主动回避干扰的生物学特性。本实验的结果并没有对长江江豚是否存在隆巴德发声反应作出直接的有力

证据,问题的解决还有待于进一步的研究。

尽管成年长江江豚声信号频率高达 125 kHz^[10],但是其幼豚亦能发出低频信号^[36],在中华白海豚中还发现船舶噪声对聚群产生影响,具有母幼对的群体受通行船舶的影响最严重^[33]。故由船舶引起的水下噪声对幼龄江豚有很严重的影响。因此控制船舶噪声是保护长江江豚工作中很重要的一部分。而船舶水下辐射噪声的声源种类繁多,但大致可归纳为推进器辐射噪声、主副机振动的辐射噪声以及流体动力噪声,即船体结构振动向水下辐射的噪声是主要的噪声源之一^[34],考虑到船舶噪声对江豚的影响,在船舶设计时应采取相关措施,如可以通过降低振动,敷设吸声材料,采用黏弹性阻尼材料和有源主动控制技术来尽量降低和控制水下辐射噪声^[35]。

4 结论

本研究发现船舶与江豚出现存在弱的负相关关系;船舶与相邻脉冲串的时间差为 $(49.1 \pm 62.8)\text{s}$,其中小于 60s 的占 72.9%,在船舶经过前、后未发现显著性差异;当有船舶经过时,江豚的发声频度显著降低,但脉冲串持续时间和脉冲间间隔变化不显著;船舶通行前、后,江豚的发声频度,脉冲串持续时间和脉冲间间隔的差异性都不显著;在船舶经过时,江豚对游动方向没有选择性,推测这是在狭窄水域中江豚躲避船舶干扰的一种“临时性”策略。有关江豚躲避船舶的行为反应,需要在不同尺度的水体中采用本实验所用的声学数据记录仪进行更多的观察,以了解当船舶出现时,江豚是否会表现出长距离逃避行为,以及是否会表现出更强烈的声反应。基于长江江豚幼豚可能依赖低频信号维持与母豚的联系^[36],我们认为船舶航行时所产生的水下噪声对幼龄江豚产生的影响更严重。此外,观测隆巴德发声反应,是揭示噪声条件下的发声规律以及听觉反馈与声通讯之间关系的至关重要的一步^[8]。长江江豚是否也具有隆巴德发声反应呢?若存在,那么诱发隆巴德发声反应的“基底水平”噪声以及隆巴德发声反应达到峰值时所能承受的“顶级水平”噪声水平又如何呢?而这些问题的揭示将为我们进一步评价环境噪声对江豚的影响,以及制定相关的保护措施提供有力的参考。

参考文献:

[1] Popov V V, Supin A Y, Wang D, *et al.* Evoked-potential audiogram of the Yangtze finless porpoise *Neophocaena*

phocaenoides asiaeorientalis [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, **117**(5): 2728—2731

[2] Wang D, Hao Y J, Wang K X, *et al.* The first Yangtze finless porpoise successfully born in captivity [J]. *Environment Science & Pollution Research*, 2005, **5**(12): 247—250

[3] Wang D. Population status, threats and conservation of the Yangtze finless porpoise [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**: 3473—3484

[4] Zhao X J, Barlow J, Taylor B L, *et al.* Abundance and conservation status of the Yangtze finless porpoise in the Yangtze River, China [J]. *Biological Conservation*, 2008, **141**: 3006—3018

[5] Xiao W, Zhang X F. A preliminary study on the population size of Yangtze finless porpoise in Poyang Lake, Jiangxi [J]. *Chinese Biodiversity*, 2000, **8**(1): 106—111 [肖文, 张先锋. 截线抽样法用于鄱阳湖江豚种群数量研究初报. 生物多样性, 2000, **8**(1): 106—111]

[6] Xiao W, Zhang X F. Distribution and population size of Yangtze finless porpoise in Poyang Lake and its branches [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2002, **22**(1): 7—14 [肖文, 张先锋. 鄱阳湖及其支流长江江豚种群数量及分布. 兽类学报, 2002, **22**(1): 7—14]

[7] Wei Z, Zhang X F, Wang K X, *et al.* Habitat use and preliminary evaluation of the habitat status of the Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) in the Bailijiang section of the Yangtze River, China [J]. *Acta Zoologica Sinica*, 2003, **49**(2): 163—170 [魏卓, 张先锋, 王克雄, 等. 长江江豚对八里江江段的利用及其栖息地现状的初步评价. 动物学报, 2003, **49**(2): 163—170]

[8] Scheifele P M, Andrew S, Cooper R A, *et al.* Indication of a Lombard vocal response in the St. Lawrence River beluga [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, **117**(3): 1486—1492

[9] Lane H, Tranel B. The Lombard sign and the role of hearing in speech [J]. *Journal of Speech and Hearing Research*, 1971, **14**: 677—709

[10] Li S H, Wang K X, Wang D, *et al.* Echolocation signals of the free-ranging Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, **117**(5): 3288—3296

[11] Wei Z, Wang D, Zhang X F, *et al.* Population size, behavior, movement pattern and protection of Yangtze finless porpoise at Bailijiang section of the Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, **11**(5): 427—432 [魏卓, 王丁, 张先锋, 等. 长江八里江江段江豚种群数量、行为及其活动规律与保护. 长江流域资源与环境, 2002, **11**(5): 427—432]

[12] Wang D. A preliminary study on sound and acoustic behavior of the Yangtze River finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1996, **20**(2): 127—133 [王丁. 长江江豚声信号及其声行为的初步研究. 水生生物学报, 1996, **20**(2): 127—133]

[13] Wang K X, Wang D. Characteristics and functions of sound

- of the Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides*) in captivity [J]. *Acoustic Technology*, 1999, **18**(A11): 9—12 [王克雄, 王丁. 豢养长江江豚声信号特征和功能. 声学技术, 1999, **18**(A11): 9—12]
- [14] Li S H, Akamatsu T, Wang D, *et al.* Localization and tracking of phonating finless porpoises using towed stereo acoustic data-loggers [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, **126**(1): 468—475
- [15] Akamatsu T, Matsuda A, Suzuki S, *et al.* New stereo acoustic data logger for free-ranging dolphins and porpoises [J]. *Marine Technology Society Journal*, 2005, **39**(2): 3—9
- [16] Akamatsu T, Teilmann J, Miller L A, *et al.* Comparison of echolocation behaviour between coastal and riverine porpoises [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, **54**(3-4): 290—297
- [17] Akamatsu T, Wang D, Nakamura K, *et al.* Echolocation range of captive and free-ranging baiji (*Lipotes vexillifer*), finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides*), and bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, **104**(4): 2511—2516
- [18] Akamatsu T, Wang D, Wang K X, *et al.* A method for individual identification of echolocation signals in free-ranging finless porpoises carrying data loggers [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, **108**(3): 1353—1356
- [19] Kimura S, Akamatsu T, Wang K X, *et al.* Comparison of stationary acoustic monitoring and visual observation of finless porpoises [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, **125**(1): 547—553
- [20] Zhou K Y, Pilleri G, Li Y M. Observation of the baiji (*Lipotes vexillifer*) and finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides*) between Nanjing and Taiyangzhou region of the down stream of Yangtze River, combined analyze the physiological adaptiveness of baiji to the environment [J]. *Science in China Series A: Mathematics*, 1980, **4**: 363—369 [周开亚, G 皮莱里, 李悦民. 长江下游南京至太阳洲江段白暨豚和江豚的观察, 兼论白暨豚对环境的某些生理适应. 中国科学(A 集), 1980, **4**: 363—369]
- [21] Chen P X, Yang J. Movement and behavior of finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides* Cuvier) at Swan Oxbow, Hubei province [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1996, **20**(1): 32—40 [陈佩薰, 杨建. 湖北天鹅洲故道江豚的活动与行为. 水生生物学报, 1996, **20**(1): 32—40]
- [22] Chen P X, Liu P, Liu R, *et al.* Distribution, ecology, behavior and conservation of dolphins of middle reaches of the Changjiang (Yangtze) River (Wuhan-Yueyang) [J]. *Investigation on Cetacea*, 1979, **10**: 87—104
- [23] Yu D P, Wang J, Yang G, *et al.* Primary analysis on habitat selection of Yangtze finless porpoise in spring in the section between Hukou and Digang [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2005, **25**: 302—306 [于道平, 王江, 杨光, 等. 长江湖口至荻港段江豚春季对生境选择的初步分析. 兽类学报, 2005, **25**: 302—306]
- [24] Akamatsu T, Wang D, Wang K X, *et al.* Diving behavior of freshwater finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides*) in an oxbow of the Yangtze River, China [J]. *Marine Mammal Science*, 2002, **59**: 483—443
- [25] Wei Z, Wang D, Kuang X A, *et al.* Observations on behavior and ecology of the Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) group at Tian-e-Zhou Oxbow of the Yangtze River [J]. *The Raffles Bulletin of Zoology Supplement*, 2002, **10**: 97—103
- [26] Lima S L, Dill L M. Behavioural decisions made under the risk of predation: a review and prospectus [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1990, **68**: 619—640
- [27] Williams R, Trites A W, Bain D E. Behavioural responses of killer whales (*Orcinus orca*) to whale-watching boats: opportunistic observations and experimental approaches [J]. *Journal of Zoology*, 2002, **256**: 255—270
- [28] Michelle L, Tim P, Douglas H, *et al.* Response of travelling bottlenose dolphins (*Tursiops aduncus*) to experimental approaches by a powerboat in Jervis Bay, New South Wales, Australia [J]. *Biological conservation*, 2006, **127**: 363—372
- [29] Foote A D, Osborne R W, Hoelzel A R. Environment: Whale-call response to masking boat noise [J]. *Nature*, 2004, **428**: 910
- [30] Watkins W A, Moore K E, Tyack P. Sperm whale acoustic behaviors in the southeast Caribbean [J]. *Cetology*, 1985, **49**: 1—5
- [31] Bowles A E, Smultea M, Wursig B, *et al.* Relative abundance and behavior of marine mammals exposed to transmissions from the Heard Island Feasibility Test [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1994, **96**: 2469—2484
- [32] Buckstaff K C. Effects of watercraft noise on the acoustic behavior of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in Sarasota Bay, Florida [J]. *Marine Mammal Science*, 2004, **20**(4): 709—725
- [33] Sofie M V P, Peter J C. Boat traffic affects the acoustic behaviour of Pacific humpback dolphins, *Sousa chinensis* [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 2001, **81**(3): 533—538
- [34] Sun X R, Zhu X. Summary and trend of the underwater structure noise of boat [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, **24**(1): 106—113 [孙雪荣, 朱锡. 船舶水下结构噪声的研究概况与趋势, 振动与冲击, 2005, **24**(1): 106—113]
- [35] Meng C X, Yang S E, Li G J. On near field distribution of warship radiated noise [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2008, **20**(1): 81—83 [孟春霞, 杨士莪, 李桂娟. 船舶近场声辐射特性初探, 海军工程大学学报, 2008, **20**(1): 81—83]
- [36] Li S H, Wang K X, Wang D, *et al.* Simultaneous production of low-and high-frequency sounds by neonatal finless porpoises [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, **124**(2): 716—718

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

DONG Shou-Yue^{1, 2}, DONG Li-Jun^{1, 2}, LI Song-Hai¹, Satoko Kimura³, Tomonari Akamatsu⁴,
WANG Ke-Xiong¹ and WANG Ding¹

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Graduate School of Informatics, Kyoto University, Kyoto 606-8510, Japan; 4. National Research Institute of Fisheries Engineering, Fisheries Research Agency, Ebikai, Hasaki, Kashima, Ibaraki 314-0421, Japan)

Abstract: The Poyang Lake in Jiangxi Province is an important habitat of the Yangtze finless porpoises. There are about 400 individuals of porpoise inhabiting in the lake. The surveys conducted in recent years indicated that one of the threats faced by the animals might be from the heavy boat traffic in the lake. For estimating the possible negative effects of the boat traffic on the animals in the lake, an acoustic observation with the aid of an underwater acoustic data logger was conducted in the confluence of Poyang Lake and the Yangtze River from 27 June to 1 July 2007. In this observation, the passive acoustic data logger was fixed at the monitor station (latitude: 29°42'38" N, longitude: 116°11'11" E) and was deployed to monitor and record continually periphery underwater noise of the boat traffic and pulse events of sonar signals of porpoises that presented within 300 m around the station. During the 109h of investigation, 494 vessels and 13,413 click trains were recorded by the logger. These data were analyzed by using a customized program developed on Igor Pro 5.01 (WaveMetrics, USA), and the results were used for investigating the effects of boat traffic on the acoustic behavior of finless porpoises in the waters. A weak negative correlation between the presence of porpoises and ships was observed ($r = -0.029$, $N = 6550$, $P < 0.05$). The time difference between ships and adjacent click trains was 49.1s (± 62.8 s) and 72.9% of which were within 60s, and no significant difference was observed among pre-, during, and post-boat encounters ($Z = -0.370$, $P > 0.05$). The phonation rate of click trains recorded by the acoustic data logger declined significantly during the vessel present (in-noise) situations ($Z = -10.050$, $P < 0.05$), whereas both the duration of click trains and inter-click intervals did not show significant differences ($Z = -0.275$, $P > 0.05$; $Z = -0.119$, $P > 0.05$). No significant differences were observed in the phonation rate of click trains, the duration of click trains, as well as the inter-click intervals of the porpoises among pre-, during, and post-boat encounters ($\chi^2 = 5.255$, $P > 0.05$; $\chi^2 = 3.511$, $P > 0.05$; $\chi^2 = 5.155$, $P > 0.05$). The porpoises did not have any preference for swimming direction during the encounters of ships ($\chi^2 = 0.861$, $P > 0.05$). Although the porpoises have certain sensitivity in behavioral responses to presence of boats, the animals did not show distinct avoiding behaviors when encountering boats in the waters with little width. The results of this study seem to indicate that the porpoises in the narrow channel usually take "temporary" strategy to response the disturbance from the boat traffic. Additionally, boat traffic is the most frequently encountering of the porpoises in the waters, and it might result in the porpoises have certain "acoustic adaptation" to its presence, and therefore the animals do not show intensive acoustic responses to the noise from the boat traffic. It will be needed to conduct more observations on the behavior responses of the porpoises to boat presence in different waters with different size by using the acoustic observation system, and make further estimation about the avoiding behavior and acoustic responses of the porpoises to boat traffic.

Key words: Yangtze finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*); Boat traffic; Acoustic behavior; Fixed passive acoustic observation system; Confluence of Poyang Lake and the Yangtze River