

中国小型鲸类保护声学研究历程和新思考

王克雄¹ 李松海^{1,2} 郑劲松¹ 郝玉江¹ 梅志刚¹ 王 丁¹

(1. 中国科学院水生生物研究所水生哺乳动物创新研究中心, 武汉 430072; 2. 中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000)

摘要: 保护声学(Conservation acoustics)是基于物种及生态环境保护需求而发展出的声学分支, 重点研究与保护相关的声学理论、技术及应用, 涉及保护生物学、生物声学和生态声学等关联学科。研究小型鲸类发声和受声及栖息地声学特征, 有助于了解种群生存状况, 制订和实施基于声学的保护对策, 促进物种和生态环境保护。我国小型鲸类保护声学源起于20世纪80年代白暨豚(*Lipotes vexillifer*)的保护需求, 1990年代后期和2000年代中后期逐渐转向到长江江豚(*Neophocena asiaeorientalis a.*)和中华白海豚(*Sousa chinensis*), 近10多年来覆盖了从南海到黄渤海海域多种小型鲸类, 在国际上占有较高的地位。40多年来, 随着声学技术和仪器的发展, 以及淡水和海洋小型鲸类保护的迫切需求, 保护声学研究从人工环境中的个体转向到野外群体, 声信号的记录方式从单一水听器转向全自动水听器阵列, 研究内容从声信号和听觉特征扩展到广域长时被动声学监测, 以及水下声景和水下噪声影响及防范, 初步实现了基础研究和技术研发为小型鲸类保护提供支撑。可以预期, 在未来10多年我国小型鲸类保护声学理论、技术研发及保护应用, 将会随着大数据科学、人工智能技术和声学的发展与融合而呈现较明显的提升。

关键词: 小型鲸类; 生物声学; 保护声学; 白暨豚; 长江江豚; 中华白海豚

中图分类号: Q178 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)01-012508-10



虽然保护声学(Conservation acoustics)的定义尚有分歧^[1], 但是, 毫无疑问, 保护生物学(Conservation biology)、生物声学(Bioacoustics)和生态声学(Ecoacoustics)等学科是保护声学的基础, 而且保护声学与这些学科之间在内容上存在互补和交叉的关系。从目前国内外的研究重点看, 保护声学的主要研究趋势是自然生态环境和物种的变化及保护与恢复过程中的声学理论、技术及保护应用。小型鲸类终身生活在水中, 完全依赖声呐和声通信生存与繁衍。通过研究和控制水下噪声水平有助于改善小型鲸类栖息地质量, 通过研究它们的声信号和听觉能力有助于了解其生存状况。小型鲸类保护声学研究的重要内容之一是如何把声学技术应用于自然栖息地保护和物种种群的保护与恢复。

我国长江中下游是白暨豚(*Lipotes vexillifer*)和

长江江豚(*Neophocena asiaeorientalis a.*)栖息江段, 而东南沿海是中华白海豚(*Sousa chinensis*)的自然分布区。2007年白暨豚“极可能灭绝”^[2], 而长江江豚种群数量在2017年之前也在持续下降中^[3]。虽然2022年调查表明长江江豚种群止跌回升, 但仍未改变其“极度濒危”状况^[4]。全球中华白海豚最大种群在我国福建、广东、广西、海南、香港和台湾西岸均有分布^[5]。

虽然我国学者观察和研究小型鲸类的历史较久^[6-8], 但是受限于较低的社会经济发展水平, 早期的研究主要是捕鲸活动和渔业误捕样本的收集、解剖和分类, 以及野外零星考察等。20世纪70年代末, 我国开始了长江淡水豚系统观察和研究, 针对极度濒危的白暨豚^[7, 9]开展了生物学、生态学和养殖学等相关研究, 初步涉及生物声学, 并介绍国外

收稿日期: 2024-10-20; 修订日期: 2024-12-09

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1200304)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2021YFD1200304)]

作者简介: 王克雄(1963—), 男, 研究员; 研究方向为生物声学。E-mail: wangk@ihb.ac.cn

通信作者: 王丁(1958—), 男, 研究员; E-mail: wangd@ihb.ac.cn

的相关研究^[10]。在改革开放后,我国社会经济进入了快速发展阶段,长江水资源利用和对自然生态环境的扰动也随之增大,白暨豚濒危状况日趋严峻,其保护备受关注,生物声学研究了前所未有的重视。当时国内多家研究机构发挥学科互补的优势,共同开展了白暨豚额隆透声、声信号和听觉能力研究^[7, 11, 12]。但是,相关研究随着白暨豚种群快速衰退而逐渐减少,直至最终停止^[13]。20世纪末,长江江豚的濒危状况日渐凸显,保护需求促进了保护声学研究和技术研发,保护声学服务于物种保护的目更加明确。保护声学在人工饲养和迁地保护区环境中开展,研究领域不仅有个体声信号特征和听觉能力的分析,而且扩大到栖息地声环境和水下噪声影响^[14]及被动声学监测技术等内容^[15]。

中国经济快速发展不只是增加了长江淡水豚的生存压力,近海小型鲸类也同样如此,如在我国东南沿海分布的中华白海豚面临的主要生存压力之一就是日益繁忙的船舶水运带来的水下噪声。2000年代以后,港航交通建设对声学保护技术及应用的迫切需求,推动了中华白海豚生物声学和保护声学研究与技术发展^[16, 17]。研究地点基本覆盖了东南沿海中华白海豚主要分布水域和人工饲养环境;研究内容与长江江豚保护声学基本一致,唯一不同的是中华白海豚没有可供研究的迁地保护群体。

近10年来,随着长江大保护推进和海洋保护意识提升,以及国际间小型鲸类保护合作的加强,不仅长江江豚和中华白海豚的保护声学研究得以加强,而且东亚江豚(*Neophocaena asiaeorientalis sunameri*)、印太江豚(*Neophocaena phocaenoides*)和伊洛瓦底海豚(*Orcaella brevirostris*)等其他小型鲸类保护声学研究也有进展^[18-21]。

本文系统梳理了40多年来我国淡水和海洋小型鲸类保护声学的重要文献和重要事件,从时空、物种和研究内容等方面总结了本学科在我国的源起和发展历程,并与国际相应的研究状况进行了比较,对未来10多年主要发展方向和主要研究目标进行了思考和展望。本研究可为我国淡水和海洋小型鲸类及栖息地保护声学、技术研发和应用,以及自然栖息地和物种保护提供参考。

1 我国小型鲸类保护声学的源起

20世纪60—70年代中期,我国学者在国内期刊上零星介绍了国际上小型鲸类声呐研究方面的一些进展。70年代末期,我国改革开放后,长江中下游分布的特有物种白暨豚吸引了国际学者的关注。为了促进国际间合作,中国科学院组织实施了

白暨豚保护研究。

1980年1头被渔民误捕的白暨豚被成功救护,并饲养在中国科学院水生生物研究所的人工水池中。中国科学院水生生物研究所联合中国科学院声学研究所和华中科技大学机械学院(华中工学院机械系),启动了白暨豚生物声学联合研究。在人工水池中记录了白暨豚的声信号,运用行为学方法测量了白暨豚听觉能力,采用声音回放方式观察了白暨豚对声回放的行为响应等。重点研究了白暨豚声呐信号和通信信号特征^[12, 22, 23]、声呐波束特征^[24]和听觉阈值^[25]。首次报道了白暨豚声信号的时频、强度、方向性等研究结果。白暨豚声信号分为两大类,即短持续期信号(脉冲列或单脉冲)和长持续期信号(啸叫声);白暨豚在同一时刻能发出频率截然不同的声信号;脉冲的平均中心频率为77 kHz,平均带宽为78 kHz,持续时间为63 μ s;脉冲间隔均值长可达849.3ms,短不足10ms (9.9ms);“的答声”的声压级为156 dB (ref 1 μ P);听觉最敏感的频率范围为16—48 kHz(阈值为-38—-44 dB),听力频率上限超过200 kHz,下限低于1 kHz等。这些研究结果中的“短持续期信号”“脉冲列”为“声呐信号”或“探测信号”,而“长持续期信号”“啸叫声”为“哨叫声”或“通信信号”。相关研究结果为后来开展白暨豚与长江江豚声呐信号差异性比较、长江江豚和中华白海豚物种声学特征的识别,以及基于声信号分析它们的水下行为和评价水下噪声对它们听觉影响等研究提供了重要基础。

荆显英等^[12]根据声信号回放实验的结果,推测白暨豚能很好地感知到低于背景噪声28.7 dB,甚至更低的信号,据此认为被船舶螺旋桨击毙是白暨豚致死的重要因素之一。当时开展的白暨豚种群调查和保护研究已经较明确提出了水下爆破对白暨豚会造成伤害,航运业高速发展对白暨豚摄食、繁殖和抚幼有不利影响,并认为船舶水下噪声是有害因素^[26, 27]。针对水下爆破和航运交通对白暨豚的影响,还提出了声学保护的建^[27],比如在整治航道需要爆破时,应首先将爆破区附近的白暨豚驱走;船舶航行中遇到白暨豚群体时,应当减速。但是,这些声学保护建议在技术和政策上应如何实施,当时并未进一步研究。

1986年10月国际自然保护联盟(IUCN)物种生存委员会(SSC)在中国科学院水生生物研究所组织召开“淡水豚生物学与保护国际学术讨论会”(Workshop on Biology and Conservation of the Platanistoids Dolphins)。这次会议是白暨豚保护声学发展过程中的一次重要事件。我国多位学者在会上介

绍了白暨豚声学研究成果^[28], 并统计分析白暨豚死亡样本, 将水下爆破、航运交通(螺旋桨)和 underwater 噪声列为白暨豚生存影响因子; 预测在未来10年内长江下游船舶量会增加1倍, 提出通过船舶限速保护白暨豚的建议^[28]。我国学者在这次会议上提出的开展白暨豚声学研究和基于声学技术保护白暨豚的建议, 是白暨豚保护声学的重要内容之一, 在国际淡水豚保护生物学界产生了积极影响, 可以说白暨豚保护需求是我国小型鲸类保护声学的源起。

白暨豚声学更多的是基于人工饲养的个体, 而野外白暨豚数量极少, 观察到它们并记录到它们的水下声信号非常困难, 因此当时未针对野外白暨豚的发声和听力, 以及栖息地船舶航行水下噪声开展研究, 亦未开展噪声对白暨豚听觉影响实验研究。当时的保护声学处于起步阶段, 未形成完整的“保护声学”概念, 研究的内容主要是个体的生物声学 and 声行为特征^[23], 未开展生态声学相关研究。

2 我国小型鲸类保护声学的发展

1990年代后, 白暨豚种群数量更少, 并且急速下降, 因此其声学研究较少, 仅对人工饲养环境中的白暨豚和位于湖北石首天鹅洲迁地保护区的白暨豚做了一些声学研究^[29-31]。白暨豚哨叫声的最大和最小频率均值分别为5.8和5.0 kHz, 频率变化幅度一般小于1.0 kHz, 哨叫声平均持续时间为907ms; 大多数哨叫声的发声间隔短于460s, 平均间隔为205s。哨叫声的理论传播距离为6.6 km, 但在长江水下噪声背景下, 它可能会降低到几百米; 生活在不同大小水域环境中的白暨豚能适应性调整其声呐脉冲间隔, 在迁地保护区开放水域中声呐脉冲间隔为100—200ms, 而在狭小的人工饲养水池中脉冲间隔仅为4—28ms。这些研究结果作为白暨豚被动声学监测和物种声学识别的重要依据, 在中国科学院水生生物研究所等单位组织的“2006年长江淡水豚考察”中得以应用^[13]。随着迁地保护区中的白暨豚和人工饲养的白暨豚辞世, 白暨豚保护声学未能继续。

较系统的长江江豚声学研究起始于20世纪90年代中期, 随着长江江豚人工饲养的成功和迁地保护种群的建立, 研究工作有了较好的进展^[32-34]。这一时期的研究初步了解到长江江豚不仅发出高频声呐脉冲信号(脉冲串持续时间0.8—2.0s, 脉冲间隔均值48.6ms), 还会发出与脉冲信号显著不同的低频通信信号, 或称为“鸣叫声”^[34], 低频信号的持续时间均值为434.5ms, 峰值频率均值为1.7 kHz, 具10个左右谐波, 谐波间距离约500 Hz。虽然长江江

豚是否能发出低频通信信号, 目前尚有一些争议, 但是近期的研究结果也初步证实它们会发出低频信号^[35]。但是, 低频信号是否具有通信功能, 以及如何实现个体间通信, 尚有待进一步观察。

进入21世纪, 保护声学从声信号时频特征逐渐扩展到听觉能力^[36-39]。除了研究个体数量较多外, 这一时期的研究还得益于国际间的合作, 尤其是日本、俄罗斯、美国学者的参与, 有效地推动了长江江豚声信号特征和听觉电生理等研究。Li等^[37, 39]和Akamtsu等^[36]发现长江江豚能发出典型的高频窄带超声脉冲(频谱相对宽度 $Q=6.6\pm1.56$); 典型脉冲的峰值频率范围为87—145 kHz[平均为 (125 ± 6.92) kHz], 脉冲持续时间为30—122 μ s[平均为 (68 ± 14.12) μ s]; 相比于白暨豚, 长江江豚脉冲的峰值频率明显提高, 可能与后者偏好捕食更小的鱼类有关^[36, 37]。采用客观、快捷的听觉电生理方法对长江江豚的听觉能力进行测量, 测量方法不同于早期受条件限制, 采用误差较大且费时行为训练方法对白暨豚听觉进行测量。长江江豚在45—139 kHz的频率范围内听觉最灵敏, 而在54 kHz时听觉阈值最低(47.2 dB, ref 1 μ Pa); 在较低频率中, 听觉阈值以约14 dB/倍频的速率增加, 但在152 kHz时阈值急剧增加^[38]。这些基础性生物声学是长江江豚保护声学发展的基础, 更是后来被动声学监测和识别长江江豚物种, 以及评价水下噪声对其听觉能力影响的重要依据^[40-42]。

21世纪初, 两次重要的国际合作极大地推动了长江江豚基础声学研究成果向声学保护技术转化和应用。第1次是“2006年长江淡水豚考察”, 首次采用拖曳式被动声学监测, 其作为目视观察的补充, 比传统野外科考获得的数据更准确^[43]。拖曳式被动声学监测是根据长江江豚声呐信号的特征, 从水下声学仪器监测到的大量声信号中分离出长江江豚的声呐信号, 据此判断长江江豚出现的时空分布与数量^[26, 27]。被动声学仪器能在150 m有效距离内, 清晰地记录长江江豚超声信号事件, 正确率为77.6%, 虚警率为5.8%^[15]。野外目视观察长江江豚时, 会有大量单个个体被观察者遗漏, 而被动声学仪器可以减少这种现象。利用被动声学仪器所获得的数据, 计算出的长江江豚探测概率明显高于目视观察结果, 前者约为后者的2倍^[44]。该技术促进了保护声学的发展, 目前已广泛应用于长江江豚和中华白海豚等小型鲸类的种群调查^[3, 20, 45, 46]。第2次是2007年在中国科学院水生生物研究所召开的“中日生物跟踪科学交流会”(Japan-China Biologging Science Symposium), 两国学者重点交流如何推

广与应用长江江豚声学跟踪技术,支持长江江豚大尺度时空监测与保护,比如如何合理布置定点被动声学记录仪和移动被动声学记录仪等^[47]。后来,直至目前,被动声学跟踪技术的快速发展和在河流与海洋环境中的多场景应用,一方面得益于对长江江豚等小型鲸类声呐信号时频结构的深入了解,另一方面得益于在保护声学技术与应用方面的广泛国际合作与交流^[47]。

早期长江江豚被动声学监测主要在迁地保护区水域开展,包括在保护区水域设置“声门”(被动声学监测线性阵列)开展被动声学监测和目视观察的比较^[15];在长江江豚身上固定声学和行为记录仪,记录其发声和水下行为,研究其发声与呼吸、潜水、集群等行为的关系^[36, 48]。这些工作所获得的结果和积累的技术对在长江中下游干流和鄱阳湖等水域开展被动声学监测提供了重要参考,比如在鄱阳湖湖口水域开展长期的定点被动声学监测^[49],以了解长江江豚在长江干流与鄱阳湖之间的季节性移动情况;在长江干流宜昌和上海之间开展了大范围移动式被动声学监测^[50],以了解长江江豚在干流的分布型式等。

为了保护白暨豚,早在20世纪80年代我国学者就关注到船舶噪声的影响,同时也关注到这些噪声对长江江豚的影响,只是当时长江江豚的种群数量相对较多,没有涉及长江江豚保护声学技术的应用。2010年以后,为了定量评价水下噪声对长江江豚的影响,开展了在人为噪声影响条件下长江江豚听觉能力测量工作^[51]。研究发现,水下噪声对长江江豚听觉的影响较复杂,与噪声频率、强度和持续时间等有关系,最有效的疲劳噪声集中在低于测试频率0.5倍频程的位置;听觉临时阈值位移(TTS)取决于疲劳噪声和测试信号频率,频率越低,噪声影响越大;噪声效应的持续时间和噪声水平并非线性关系,噪声水平变化20 dB可导致TTS水平变化近20 dB,而噪声持续时间变化10倍仅导致TTS增加3.8—5.8 dB。实验结果提示在评价船舶噪声对长江江豚听觉影响时,应充分考虑水下噪声的特征,尤其是频率、强度和持续时间等特征。针对船舶噪声影响、减缓对策和限值的保护声学基础研究,在2010年后得到了较充分的发展,并在江西鄱阳湖开放水域测量了1群野外长江江豚听觉能力^[52—55]。同时,还对长江干流及主要航行船舶的水下噪声进行了测量,并根据长江江豚听觉能力定量分析了水下噪声对长江江豚的影响,提出了通过限制船舶航行数量来保护长江江豚的建议^[14, 40, 55—60]。在长江中下游的监测结果表明,88%的监测位点水下噪声

污染程度超过了能够对长江江豚造成行为干扰的强度,40%的监测位点超过了能够对长江江豚造成TTS损伤的强度,因此建议在长江江豚分布的核心区域开展限航和限速等必要的降噪措施,加强长江江豚栖息地保护^[57, 61]。随着水运经济的快速发展,长江航道整治日渐频繁,针对长江航道施工噪声对长江江豚的影响也开展了相关的研究^[62],提出了采用声学骚扰、声学驱赶等技术阻止长江江豚进入施工区,或将长江江豚驱离出施工区等声学保护建议。

从20世纪80年代的白暨豚保护声学研究开始,到21世纪长江江豚保护声学快速发展和近年来的保护声学技术的广泛应用,历经了40多年。期间,全球自然生态和物种保护兴起、国际间开放合作交流和多学科融合发展,以及我国自主研发生态声学仪器能力提升等,对我国淡水小型鲸类保护声学发展起到重要的推动作用。

3 保护声学从淡水豚向近海小型鲸类发展

小型鲸类栖息地与航运之间的冲突不仅限于大型河流,在近海也同样存在。我国东南沿海,尤其是广东珠江口水域,中华白海豚栖息地与航运存在着显著冲突^[63]。21世纪前,我国学者针对中华白海豚声学的研究非常少,虽然中华白海豚在我国分布范围广、种群数量多,并且受航运威胁大,但是2000年之后,在福建厦门和广东珠江口水域才启动相关研究。

2002年2月在厦门附近海滩上发现了1头死亡的中华白海豚,经王丁等^[64]解剖分析,该海豚可能是航道水下爆破致死。2004年3—8月,在厦门海域连续出现多起中华白海豚死亡事件,初步分析其中部分原因是由水下爆破冲击波所造成的^[65]。随后,针对水下爆破冲击波特征及其对中华白海豚影响和伤害等保护声学问题,中国科学水生生物研究所和厦门大学联合在厦门港航道水下爆破施工现场启动了水下噪声监测、评价和减缓研究。当时中华白海豚基础声学基础研究非常缺乏,国内外相关研究也滞后。在这种特殊且紧急的情形下,学者们基于保护优先的策略在水下爆破施工现场开始了气泡帷幕系统的设计和应用,希望通过建立水下气泡帷幕消减水下爆破冲击波的能量,避免冲击波对周边海域中华白海豚造成伤害。研究人员在实验现场构建了水下气泡帷幕,并在气泡帷幕外不同距离的位点测量了气泡帷幕对水下爆破冲击波能量的消减作用。实验表明,气泡帷幕对冲击波的低频组分有消减作用,但整体消减效率与气泡帷幕的完整性、水域深度和流态,以及爆破用药量等密切相关。

21世纪初,对中华白海豚保护声学研究和技術具有急迫需求的另一項重要工程是珠江口的港珠澳大桥工程。该工程的桥岛隧道直接穿行于珠江口中华白海豚的重要栖息地(广东珠江口中华白海豚国家级自然保护区),两岸三地对中华白海豚的保护非常关注。因此在大桥建设前后阶段,中国科学院水生生物研究所等单位开展了中华白海豚保护声学基础、技术研发及噪声监测等研究。

和长江江豚保护声学研究的途径相似,中华白海豚保护声学研究先后涉及到声呐信号和通信信号特征、个体听觉能力,以及水下噪声特征和减缓噪声影响措施等^[16, 17, 66—68]。这些研究首次较系统地揭示了中华白海豚生物声学特征。中华白海豚发出短持续时间、宽带超声脉冲信号,平均峰值频率为109.0 kHz, 3 dB带宽为50.3 kHz, 峰—峰源级为177.1—207.3 dB, 均值为187.7 dB (ref 1 μ Pa), 95%的能量持续时间为22 μ s。基于声谱特征把通信信号(哨叫声)分成6大类,单个信号持续时间为(370.19 $\pm$ 285.61)ms, 频率范围为0.52—33 kHz, 约2个谐波,谐波最大频率可达96 kHz。中华白海豚在11.2—128 kHz范围内大部分听觉阈值低于90 dB (ref 1 μ Pa), 最敏感频率是45 kHz (阈值为47 dB), 在低于高敏感性的频率区域, 阈值以11 dB/倍频的速率增加, 而在108 kHz以上的高频率范围, 阈值上升更快, 达到130 dB/倍频速率。这些生物声学参数是后续开展中华白海豚被动声学监测和物种识别, 以及评价水下噪声影响的重要基础。港珠澳大桥施工期间, 打桩用的液压施工锤(OCTA-KONG)是当时世界上最大的, 其工作振动频率为15—16 Hz, 导致水下低频噪声显著增加, 中华白海豚在距离3.5 km时就能感知到, 对中华白海豚具有听觉遮掩风险。为了减缓涉水施工噪声对中华白海豚的不利影响, 研究人员提出了多项声学保护对策, 包括水下气泡帷幕、声学骚扰、声学驱赶、施工机械软启动等^[69]。

在港珠澳大桥建成之后, 中华白海豚的被动声学监测和声学保护研究仍在继续。2022年中国科学院水生生物研究所联合广东珠江口中华白海豚国家级自然保护区管理局、南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)、武汉白鱔豚保护基金会和武汉品度科技公司等多家机构, 在港珠澳大桥北侧设置了实时被动声学监测线性阵列, 该阵列横跨珠江口东西水域^[46], 包括15套实时被动声学监测设备和1套陆上基站, 全天候自动监测、记录和识别中华白海豚声呐信号。中华白海豚保护声学研究除覆盖珠江口伶仃洋水域之外, 还包括江门、湛江、北海、钦州和海南等水域, 并开展了不同水域间水下

噪声及中华白海豚地理群体间发声差异等方面研究^[70, 71]。研究发现, 地理隔离(珠江口、湛江、钦州)可导致不同地理群体之间的哨叫声出现结构差异, 并且这些差异与地理群体所在水域的水下噪声水平有关联, 可能是中华白海豚对当地的水下噪声适应。在珠江口水域的风电场、海底隧道和航道等区域开展了水下噪声长期监测, 发现这些水域的水下噪声各有其节律特征, 与风机是否运行、隧道交通量和船舶交通量, 甚至空中低空飞行的飞机都有关联。人为活动的水下噪声对中华白海豚栖息地的自然声景构成了较严重影响, 继而影响中华白海豚的生态行为, 比如在水下噪声较强时, 监测到中华白海豚的声信号数量就下降, 意味着监测点及周边水域中华白海豚数量下降。针对中华白海豚在猎物的获得与回避水下噪声之间的平衡关系也开展了较多研究^[63, 72], 认为中华白海豚的行为主要受猎物分布驱动, 但是当水下噪声较强且超过一定阈值时, 即使可获得的猎物资源较多, 中华白海豚也不得不回避水下噪声而放弃捕食猎物。长江江豚也有中华白海豚类似行为, 在长江中下游为了在捕食与回避船舶水下噪声之间取得平衡, 长江江豚采取的声行为策略就是选择低噪声时段捕食, 而当捕食水域水下噪声增强时则离开捕食水域^[73, 74]。其他小型鲸类可能都具有这种行为, 表明控制人为活动引起水下噪声的范围和强度, 设置水下噪声上限值是保护淡水和海洋小型鲸类的重要途径和技术措施之一。

目前, 我国小型鲸类保护声学研究水域不仅从长江扩展到东南沿海, 还包括黄渤海、东海和南海部分水域, 甚至伊洛瓦底江和湄公河^[18, 19, 21, 75]。研究对象已经不限于长江江豚和中华白海豚, 还包括东亚江豚和印太江豚, 甚至伊洛瓦底海豚等。相对较成熟的被动声学监测技术, 包括定点和移动实时被动声学监测网与物种实时声学识别技术等的应用越来越广泛。

4 我国小型鲸类保护声学的学术地位和几点思考

4.1 我国小型鲸类保护声学研究的学术地位

全球大部分小型鲸类都面临着相似的人为活动威胁, 航运交通和涉水工程施工所产生的水下噪声是重要的威胁因子之一。基于“中国知网(www.cnki.net)”和“Web of science (www.webofscience.com)”对国内外小型鲸类保护声学相关的论文进行了检索, 分析和比较了我国保护声学研究现状及学术地位。

在中国知网上用检索式“篇关摘=保护 AND 篇关摘=声 AND 篇关摘=豚”进行检索(1980—2023年), 经过逐条核实后, 共检索到53篇文献, 被引合计286次(篇均被引5.4次)。在53篇文献中, 期刊论文和学位论文的比例基本持平; 2007年之前发表论文极少, 大部分文献是在2007年以后发表的, 并且发表数量呈逐年递增态势。文献涉及的主要学科有生物学(64.2%)和物理学(26.4%)。主要关键词包括中华白海豚、声信号、海洋哺乳动物和 underwater noise 等, 但是“保护”一词的出现频率较低, 意味着大部分文献可能主要关注物种、声信号与噪声本身, 未将保护列为声学研究的重要目标。不过从年度文献发表的数量来看, 已经有越来越多的国内研究团队和研究人员将小型鲸类保护声学作为研究重点内容之一, 这可能与我国对长江和近海生态环境及物种多样性保护越来越重视有关。

在“Web of science”用检索式“AB=conservation AND AB=acoustic* AND (AB=dolphin* OR AB=porpoise*) AND PY=(1980—2003)”进行了检索, 经逐条核实后, 共检索到167篇文献, 非自引共计2281次, 单篇均引14.75次。未检索到2005年之前的文献, 2005年之后的文献逐年递增, 而中国知网检索的结果表明国内文献发表主要在2007年以后, 且逐年上升, 意味着国内外小型鲸类保护声学研究几乎是同步发展。期刊论文远多于学位论文, 前者127篇, 后者仅33篇, 这与国内文献类型的比例很不一样, 国内期刊论文和学位论文的比例相当, 这可能与国内学者更倾向于在国际期刊发表论文有关。涉及到生态学、动物学、生物多样性保护等学科领域的文献均超过50%, 涉及到声学、通讯等学科的论文均约占20%, 这意味着国际小型鲸类保护声学基础研究持续关注物种生物学和多样性保护问题。大部分文献的作者来自中国、美国、英国和日本, 说明我国学者在小型鲸类保护声学研究领域已经形成了较稳定的群体, 科研产出在国际上占有非常重要的地位。文献所涉及的主要概念与保护、野生动物管理、生态环境科学等有关, 据此可以进一步认为保护声学研究的要目的之一是自然生态环境和物种保护。

4.2 我国小型鲸类保护声学研究几点思考

小型鲸类社群结构复杂, 个体间的声交流目前尚未见统一的模式, 包括协同捕食交流、配偶选择交流和抚幼交流等, 而这些方面对种群的生存和延续至关重要, 并且容易受到人为噪声的影响。此外, 它们对水下环境空间的识别也完全依赖声探测, 但是目前尚未见小型鲸类处理环境空间回声信号的

模型, 而环境空间及其变化与人为活动密切相关。因此, 小型鲸类保护声学基础理论研究的不足与日渐增强的保护声学技术需求之间的矛盾亟待解决。几乎所有的小型鲸类都是受保护的动物, 即使是非伤害性实验也受到严格管制, 因此基于模型模拟、长期被动声学监测、行为训练等开展基础性研究是必要的, 也有助于缓解研究滞后与保护技术需求迫切的矛盾。

目前水下噪声对小型鲸类影响研究大部分是在人工条件下开展的, 只有少量是直接观察和基于水下仪器设备观察, 尚未在开放水域开展长期跟踪研究, 尤其是缺少水下噪声对小型鲸类行为、生理等影响和表观遗传特征研究。后续可在迁地保护区、暂养网箱等环境中, 运用多学科融合手段开展更加精细化的定量研究。这些工作的开展和所获得的定量数据, 将有助于提出科学精准的水下噪声限制阈值。

长江中下游和东南沿海航运发展导致水下噪声的增强, 是全域性的。针对水下噪声及小型鲸类的被动声学监测, 不应仅限于少数的位点和断面, 应基于目前建立的监测点线进行更大区域的覆盖, 尤其是应覆盖到小型鲸类分布重点区域。通过实时被动声学监测网获得大量实时数据, 结合数字模拟技术对整体或重要区域开展动态模拟, 建立长江中下游和近海水下噪声动态分布图, 提升小型鲸类被动声学监测、预警和保护效率。

水下声学数据的全方位采集、远距离传输和超容量存贮会随着数字技术的发展而越来越容易, 但是对包括小型鲸类声信号和水下噪声这些海量数据的深入分析却越来越需要其他学科的支持。然而, 生物声学和生态声学大数据处理理论作为保护声学的重要研究内容和学科发展重要方向, 应在未来受到重视。可以结合小型鲸类自然栖息地和物种本身的诸多特征和特点, 同时借鉴其他学科的优势, 研究出属于本学科的动物声信号和生态环境噪声大数据处理理论与技术, 促进学科进一步发展。(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Ritts M, Bakker K. Conservation acoustics: Animal sounds, audible natures, cheap nature [J]. *Geoforum*, 2021(124): 144-155.
- [2] Turvey S T, Pitman R L, Taylor B L, *et al.* First human-caused extinction of a cetacean species [J]? *Biology Letters*, 2007, 3(5): 537-540.
- [3] Huang J, Mei Z G, Chen M, *et al.* Population survey showing hope for population recovery of the critically

- endangered Yangtze finless porpoise [J]. *Biological Conservation*, 2020(241): 108315.
- [4] Hao Y J, Tang B, Mei Z G, *et al.* Further suggestions on conservation of the Yangtze finless porpoise based on retrospective analysis of the current progress [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(6): 1065-1072. [郝玉江, 唐斌, 梅志刚, 等. 长江江豚保护进展的回顾性分析及进一步保护建议 [J]. 水生生物学报, 2024, **48**(6): 1065-1072.]
- [5] Liu M M, Lin M L, Li S H. Population distribution, connectivity and differentiation of Indo-Pacific humpback dolphins in Chinese waters: Key baselines for improving conservation management [J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2023, **33**(4): 409-422.
- [6] Zhou K Y. An outline of marine mammalogical research in China [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 1986, **6**(3): 219-232. [周开亚. 中国海兽学研究概况 [J]. 兽类学报, 1986, **6**(3): 219-232.]
- [7] Chen P X, Liu R J, Wang D, *et al.* Biology, Rearing and Conservation of the Baiji [M]. Beijing: Science Press, 1997. [陈佩薰, 刘仁俊, 王丁, 等. 白暨豚生物学及饲养与保护 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.]
- [8] Wang P L. Cetaceans in China [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012. [王丕烈. 中国鲸类 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.]
- [9] Zhou K Y, Qian W J, Li Y M. Recent advance in the study of the baiji, *Lipotes vexillifer* [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 1978: 8-13. [周开亚, 钱伟娟, 李悦民. 白暨豚研究的新进展 [J]. 南京师大学报(自然科学版), 1978: 8-13.]
- [10] Xu H S. Relation between absolute threshold and duration-of-tone pulses in the bottlenosed porpoise [J]. *Marine Scientific and Technological Information*, 1978(7): 64-70. [徐怀恕. 豚鼻海豚的绝对阈值与纯音脉冲持续时间关系 [J]. 海洋科技资料, 1978(7): 64-70.]
- [11] The Research Team of Underwater Acoustic Bionics of Nanjing Institute of Technology. Animal transmissive window-Acoustic measurement of the melon of *Lipotes vexillifer* [J]. *Journal of Nanjing Institute of Technology*, 1980, **10**(2): 121-127. [南京工学院无线电工程系水声仿生课题组. 生物透声窗—白暨豚额隆声学特性测量 [J]. 南京工学院学报, 1980, **10**(2): 121-127.]
- [12] Jing X Y, Xiao Y F, Jing R C. Sound and acoustic behavior of *Lipotes vexillifer* [J]. *Science China*, 1981, **11**(2): 233-239, 264. [荆显英, 肖友芙, 景荣才. 白暨豚(*Lipotes vexillifer*)的声信号及声行为 [J]. 中国科学, 1981, **11**(2): 233-239, 264.]
- [13] Wang K X, Wang D, Zhang X, *et al.* Range-wide Yangtze freshwater dolphin expedition: The last chance to see baiji [J]? *Environmental Science and Pollution Research*, 2006, **13**(6): 418-424.
- [14] Shi W J, Wang Z T, Fang L, *et al.* A preliminary study on impact of piling underwater noise on the Yangtze finless porpoise (*Neophocaena asiaorientalis asiaorientalis*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(2): 399-407. [时文静, 王志陶, 方亮, 等. 打桩水下噪声对长江江豚影响初探 [J]. 水生生物学报, 2015, **39**(2): 399-407.]
- [15] Wang K X, Wang D, Akamatsu T, *et al.* A passive acoustic monitoring method applied to observation and group size estimation of finless porpoises [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, **118**(2): 1180-1185.
- [16] Li S H, Wang D, Wang K X, *et al.* Evoked-potential audiogram of an Indo-Pacific humpback dolphin (*Sousa chinensis*) [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2012, **215**(17): 3055-3063.
- [17] Wang Z T, Fang L, Shi W J, *et al.* Whistle characteristics of free-ranging Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) in Sanniang Bay, China [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, **133**(4): 2479-2489.
- [18] Wang Z T, Duan P X, Akamatsu T, *et al.* Passive acoustic monitoring of the distribution patterns of Irrawaddy dolphins (*Orcaella brevirostris*) in the middle reaches of the Ayeyarwady River, Myanmar [J]. *Marine Mammal Science*, 2020, **36**(4): 1241-1253.
- [19] Cheng Z L, Li Y T, Pine M K, *et al.* Association between porpoise presence and fish choruses: implications for feeding strategies and ecosystem-based conservation of the East Asian finless porpoise [J]. *Integrative Zoology*, 2023, **18**(1): 169-182.
- [20] Liu M M, Lin W Z, Lin M L, *et al.* Species diversity and critical habitats of offshore and deep-diving cetaceans in the South China Sea [J]. *Biological Conservation*, 2024(299): 110808.
- [21] Dong L J, Lin W Z, Liu M M, *et al.* First visual sightings and echolocation signal recordings of Blainville's beaked whales (*Mesoplodon densirostris*) in the northern South China Sea [J]. *Marine Mammal Science*, 2024, e13152.
- [22] Jing X Y, Xiao Y F, Jing R C. Echolocation signal of *Lipotes vexillifer* [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1983, **5**(1): 11-18. [荆显英, 肖友芙, 景荣才. 白暨豚的回声定位信号 [J]. 海洋学报(中文版), 1983, **5**(1): 11-18.]
- [23] Wang D, Liu R J, Chen P X, *et al.* A preliminary study on the relationship between sound transmission and environmental adaptation by *Lipotes vexillifer* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1989, **13**(3): 210-217. [王丁, 刘仁俊, 陈佩薰, 等. 白暨豚的发声及其与环境适应的初步研究 [J]. 水生生物学报, 1989, **13**(3): 210-217.]
- [24] Jing X Y, Xiao Y F, Jing R C. The acoustic function of the melon of Chinese river dolphin (*Lipotes vexillifer*) [J]. *Acta Acustica*, 1982, **7**(1): 14-22. [荆显英, 肖友芙, 景荣才. 白暨豚(*Lipotes vexillifer*)额隆的声功能 [J]. 声学学报, 1982, **7**(1): 14-22.]
- [25] Wang D, Wang K X, Liu R J, *et al.* On auditory sensitivity of white-flag dolphin (*Lipotes vexillifer*) [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1988, **16**(3): 55-60. [王丁, 王克雄, 刘仁俊, 等. 白暨豚听觉灵敏度的研究 [J]. 华中理工大学学报, 1988, **16**(3): 55-60.]

- [26] Chen P X, Liu P L, Liu R J, *et al.* The distribution, ecology, behavior and protection of the dolphins in the middle reach of Chang Jiang River (Wuhan-Yueyang) [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1980, **11**(1): 73-84. [陈佩薰, 刘沛霖, 刘仁俊, 等. 长江中游(武汉—岳阳江段)豚类的分布、生态、行为和保护 [J]. 海洋与湖沼, 1980, **11**(1): 73-84.]
- [27] Lin K J, Chen P X, Hua Y Y. Population size and conservation of *Lipotes vexillifer* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1985, **5**(1): 77-85. [林克杰, 陈佩薰, 华元渝. 白暨豚种群数量及资源保护 [J]. 生态学报, 1985, **5**(1): 77-85.]
- [28] Perrin W F, Brownell Jr. R L, Zhou K Y, *et al* (Eds.). Biology and Conservation of the River Dolphins [C]. International Union for the Conservation of Nature, Cambridge, U. K., IUCN Species Survival Commission Occasional Paper No. 3. 1989: 173.
- [29] Wang D, Jing R C. Acoustic training of the Chinese River dolphin *Lipotes vexillifer* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1990, **14**(2): 138-144. [王丁, 景荣才. 白暨豚的声训练 [J]. 水生生物学报, 1990, **14**(2): 138-144.]
- [30] Wang D, Wang K X, Akamatsu T, *et al.* Study on whistling of the Chinese river dolphin (*Lipotes vexillifer*) [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, **30**(4): 349-354. [王丁, 王克雄, 赤松友成, 等. 白暨豚哨叫声的研究 [J]. 海洋与湖沼, 1999, **30**(4): 349-354.]
- [31] Wang K X, Wang D, Akamatsu T, *et al.* Estimated detection distance of a baiji's (Chinese river dolphin, *Lipotes vexillifer*) whistles using a passive acoustic survey method [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, **120**(3): 1361-1365.
- [32] 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 [J]. 水生生物学报, 1996, **20**(2): 127-133.]
- [33] Akamatsu T, Wang D, Nakamura K X, *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.
- [34] Wang K X, Wang D. Characteristics and Functions of Sound of the Yangtze Porpoise (*Neophocaena phocaenoides*) in Captivity [C]. Proceedings of CYCA'99 of Acoustical Society of China, 1999: 18-21. [王克雄, 王丁. 豢养长江江豚声信号特征和功能 [C]. 中国声学学会1999年青年学术会议[CYCA'99]论文集, 1999: 18-21.]
- [35] Yang Y N, Wang K X, Li S H, *et al.* Yangtze Finless Porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis*) Can Produce Not Only Narrowband High-frequency (NBHF) Signals, but Also Broadband Click Signals and Abundant Low-frequency Signals [C]. Abstract of the 25th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals, Perth, Australia, November, 2024: 11-15.
- [36] Akamatsu T, Wang D, Wang K X, *et al.* Biosonar behaviour of free-ranging porpoises [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, **272**(1565): 797-801.
- [37] Li S H, Wang K X, Wang D, *et al.* Echolocation signals of the free-ranging Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, **117**(5): 3288-3296.
- [38] Popov V V, Supin A Y, Wang D, *et al.* Evoked-potential audiogram of the Yangtze finless porpoise *Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis* (L) [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, **117**(5): 2728-2731.
- [39] Li S H, Wang D, Wang K X, *et al.* The ontogeny of echolocation in a Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, **122**(2): 715-718.
- [40] Zhang T C, Ju T, Li S H, *et al.* Navigation noise properties of large vessels in Hechangzhou region of the Yangtze River and their potential effects on the Yangtze finless porpoise [J]. *Acta Theriological Sinica*, 2018, **38**(6): 543-550. [张天赐, 居涛, 李松海, 等. 长江和畅洲江段大型船舶的噪声特征及其对长江江豚的潜在影响 [J]. 兽类学报, 2018, **38**(6): 543-550.]
- [41] Wang K X, Wang Z T, Mei Z G, *et al.* Ecological assessment indicator of the Yangtze River: Passive acoustic monitoring based population size of the Yangtze finless porpoise [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(6): 1390-1395. [王克雄, 王志陶, 梅志刚, 等. 长江生态考核指标: 基于被动声学监测的长江江豚数量 [J]. 水生生物学报, 2021, **45**(6): 1390-1395.]
- [42] Li W L, Qiu J S, Lei P Y, *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.
- [43] 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**(12): 3006-3018.
- [44] Akamatsu T, Wang D, Wang K X, *et al.* Estimation of the detection probability for Yangtze finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) with a passive acoustic method [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, **123**(6): 4403-4411.
- [45] Mei Z G, Zhang X Q, Huang S L, *et al.* The Yangtze finless porpoise: On an accelerating path to extinction [J]? *Biological Conservation*, 2014(172): 117-123.
- [46] Zhang C M, Gong C P, Wang K X. Application of passive acoustical technologies for monitoring the Chinese white dolphin in Pearl River Estuary [J]. *Ocean and Fisheries*, 2023(6): 90-91. [张朝明, 龚翠平, 王克雄. 被动声学监测技术在珠江口中华白海豚监测中的应用 [J]. 海洋与渔业, 2023(6): 90-91.]
- [47] Wang K X, Akamatsu T, Wang D. Recent advances in

- Bio-logging science and technology in Asia [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2008, **15**(3): 173-175.
- [48] Wang K X, Wang D, Akamatsu T. Bio-logging technology and its applications on aquatic mammals [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, **29**(1): 91-96. [王克雄, 王丁, 赤松友成. 水生哺乳动物信标跟踪记录技术及其应用 [J]. 水生生物学报, 2005, **29**(1): 91-96.]
- [49] 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.]
- [50] Dong L J, Wang D, Wang K X, *et al.* Passive acoustic survey of Yangtze finless porpoises using a cargo ship as a moving platform [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, **130**(4): 2285-2292.
- [51] Popov V V, Supin A Y, Wang D, *et al.* Noise-induced temporary threshold shift and recovery in Yangtze finless porpoises *Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis* [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, **130**(1): 574-584.
- [52] Mooney T A, Li S H, Ketten D R, *et al.* Auditory temporal resolution and evoked responses to pulsed sounds for the Yangtze finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*) [J]. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 2011, **197**(12): 1149-1158.
- [53] Mooney T A, Li S H, Ketten D R, *et al.* Hearing pathways in the Yangtze finless porpoise, *Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis* [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2014, **217**(3): 444-452.
- [54] Popov V V, Wang Z T, Nechaev D I, *et al.* Auditory adaptation time course in the Yangtze finless porpoises, *Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis* [J]. *Bioacoustics*, 2019, **30**(1): 1-11.
- [55] Wang Z T, Li J, Duan P X, *et al.* Evoked-potential audiogram variability in a group of wild Yangtze finless porpoises (*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*) [J]. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 2020, **206**(4): 527-541.
- [56] Wang Z T, Duan P X, Wang K X, *et al.* Noise pollution disrupts freshwater cetaceans [J]. *Science*, 2021, **374**(6573): 1332-1333.
- [57] Wang Z T, Duan P X, Akamatsu T, *et al.* Riverside underwater noise pollution threaten porpoises and fish along the middle and lower reaches of the Yangtze River, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021(226): 112860.
- [58] Mei Z G, Han Y, Turvey S T, *et al.* Mitigating the effect of shipping on freshwater cetaceans: The case study of the Yangtze finless porpoise [J]. *Biological Conservation*, 2021(257): 109132.
- [59] 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.
- [60] Wang Z T, Duan P X, Akamatsu T, *et al.* Increased Yangtze finless porpoise presence in urban Wuhan waters of the Yangtze River during fishing closures [J]. *Ecology and Evolution*, 2024, **14**(4): e11247.
- [61] Wang Z T, Akamatsu T, Duan P X, *et al.* Underwater noise pollution in China's Yangtze River critically endangers Yangtze finless porpoises (*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*) [J]. *Environmental Pollution*, 2020(262): 114310.
- [62] Ju T, Zhang T C, Wang Z T, *et al.* Characteristics of riprapping underwater noise and its possible impacts on the Yangtze finless porpoise [J]. *Technical Acoustics*, 2017, **36**(6): 580-588. [居涛, 张天赐, 王志陶, 等. 抛石噪声特性及其对长江江豚的可能影响 [J]. 声学技术, 2017, **36**(6): 580-588.]
- [63] An X, Duan P X, Li W L, *et al.* Biosonar activity of the Indo-Pacific humpback dolphin (*Sousa chinensis*) near the tunnel section of the world's longest cross-sea bridge—the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge—is negatively correlated with underwater noise [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023(10): 1171709.
- [64] Wang D, Liu R J, Zhao Q Z, *et al.* Pathological anatomy and analysis of death causes for a Chinese white dolphin [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2003, **23**(2): 183-184. [王丁, 刘仁俊, 赵庆中, 等. 一头中华白海豚的病理解剖及死因分析 [J]. 兽类学报, 2003, **23**(2): 183-184.]
- [65] Su X. Shockwave monitoring and transmission characteristics analysis of underwater explosion at Xiamen Harbor [D]. Xiamen: Xiamen University, 2007. [苏欣. 厦门海域水下爆破冲击波监测与传播特性分析 [D]. 厦门: 厦门大学, 2007.]
- [66] Li S H, Wang D, Wang K X, *et al.* Possible age-related hearing loss (presbycusis) and corresponding change in echolocation parameters in a stranded Indo-Pacific humpback dolphin [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2013, **216**(22): 4144-4153.
- [67] Wang Z T, Wu Y P, Duan G Q, *et al.* Assessing the underwater acoustics of the world's largest vibration hammer (OCTA-KONG) and its potential effects on the Indo-Pacific humpbacked dolphin (*Sousa chinensis*) [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(10): e110590.
- [68] Fang L, Li S H, Wang K X, *et al.* Echolocation signals of free-ranging Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) in Sanniang Bay, China [J]. *Journal of the*

- Acoustical Society of America*, 2015, **138**(3): 1346-1352.
- [69] Wang D, Wu Y P, Yu L, *et al.* Acoustical Conservation Techniques for the Chinese White Dolphin in Offshore Construction Waters [M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018. [王丁, 吴玉萍, 余烈, 等. 施工海域中华白海豚声学保护技术 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.]
- [70] Li S H, Wu H, Xu, Y, *et al.* Mid- to high-frequency noise from high-speed boats and its potential impacts on humpback dolphins [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, **138**(2): 942-952.
- [71] Yuan J, Wang Z T, Duan P X, *et al.* Whistle signal variations among three Indo-Pacific humpback dolphin populations in the South China Sea: a combined effect of the Qiongzhou Strait's geographical barrier function and local ambient noise [J]? *Integrative Zoology*, 2021, **16**(4): 499-511.
- [72] Pine M K, Wang K X, Wang D. Monitoring Rising Ambient Sound Levels from Vessels and Impacts on Indo-Pacific Humpback Dolphin (*Sousa chinensis*) Occurrences [C]. Proceedings of Meetings on Acoustics, 2016: 070003.
- [73] Wang Z T, Akamatsu T, Mei Z G, *et al.* Frequent and prolonged nocturnal occupation of port areas by Yangtze finless porpoises (*Neophocaena asiaeorientalis*): Forced choice for feeding [J]? *Integrative Zoology*, 2014, **10**(1): 122-132.
- [74] Wang Z T, Akamatsu T, Wang K, *et al.* The diel rhythms of biosonar behavior in the Yangtze finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*) in the port of the Yangtze River: The correlation between prey availability and boat traffic [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(5): e97907.
- [75] Cheng Z L, Yu G X, Li Y T, *et al.* Distribution pattern of the East Asian finless porpoise in the Huanghe River estuary and its adjacent waters in spring [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2022, **53**(2): 505-512. [程兆龙, 于国旭, 李永涛, 等. 黄河口及其邻近水域春季东亚江豚分布规律 [J]. 海洋与湖沼, 2022, **53**(2): 505-512.]

RESEARCH PROGRESS AND NEW CONSIDERATIONS ON CONSERVATION ACOUSTICS OF SMALL CETACEANS IN CHINA

WANG Ke-Xiong¹, LI Song-Hai^{1,2}, ZHENG Jing-Song¹, HAO Yu-Jiang¹, MEI Zhi-Gang¹ and WANG Ding¹

(1. Innovation Research Center for Aquatic Mammals, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. Institute of Deep Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China)

Abstract: As a branch of acoustics, conservation acoustics originated from the need to protect species and their ecological environment. It focusses on theory, technology, and application of acoustics related to conservation, and incorporates with related disciplines such as conservation biology, bioacoustics, and ecoacoustics. The study on bioacoustics of small cetaceans and soundscape of their habitats is helpful to understand the survival status of the population, formulate and implement acoustic-based conservation countermeasures, and promote the conservation of species and ecological environment. The conservation acoustics of small cetaceans in China originated in the 1980s to conserve the baiji (*Lipotes vexillifer*). In the late 1990s and mid to late 2000s, it gradually transferred to the Yangtze finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis a.*) and the Indo-Pacific humpback dolphin (*Sousa chinensis*) from the baiji. In the past 10 years, it has gradually covered several species of small cetaceans distributed in the South China Sea, the Yellow and Bohai Seas. Chinese research in conservation acoustics of small cetaceans has occupied a more prominent position in the international academic community. Over the past 40 years, with the development of acoustical technology and instruments, as well as the urgent need for small cetacean conservation in river and sea, conservation acoustics has transferred from individuals in captivity to wild groups, the recording method of acoustic signals has updated from a single hydrophone to a fully automatic hydrophone array, and the research content has expanded from acoustical signals and auditory characteristics to wide-range and long-term passive acoustic monitoring, as well as underwater soundscape and underwater noise impact and mitigation. Basic research and technology development of conservation acoustics have provided support for small cetacean conservation. In the coming more than ten years, China's small cetacean conservation acoustics will be expected to make more quick progress in basic theory, technology research and development, as well as conservation applications, with the development and integration of big data science, artificial intelligence technology and acoustics.

Key words: Small cetaceans; Bioacoustics; Conservation acoustics; Baiji; Yangtze finless porpoise; Indo-Pacific humpback dolphin