

学校编码: 10384
学号: 31120100153583

密级_____

廈門大學

博 士 学 位 论 文

水下噪声对海豚行为的影响研究

Study on the effect of underwater noise on the behavior of
dolphins

牛富强

指导教师姓名: 许肖梅教授

专业名称: 海洋物理

论文提交日期: 2017年07月

论文答辩时间: 2017年09月

2017年07月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(许肖梅 教授)课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

本人声明该学位论文不存在剽窃、抄袭等学术不端行为,并愿意承担因学术不端行为所带来的一切后果和法律责任。

声明人 (签名):

指导教师(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

随着海洋经济的发展，民船航行、海洋资源勘探、港口建设、海洋科考等海上活动产生的水下噪声，给赖以声纳系统生存的海洋哺乳动物带来严重影响。这些影响已引起欧美发达国家的重视，并开展大量研究，美国于 2013 年颁布临时性标准，规定大多数海洋哺乳动物所可承受的脉冲型声压级应低于 190dB (re 1 μ Pa)。而我国在这方面研究起步较晚，尚缺少水下噪声对海洋哺乳动物影响的评估标准和有效技术手段。

中华白海豚 (*Sousa chinensis*) 作为我国特有的海洋哺乳动物，2008 年，国际自然保护联盟濒危物种红色名录中将其列为“接近濒危”的物种。与其他海洋哺乳动物相比，国内外对中华白海豚的研究均较少，因此，如何有效评估并减小水下噪声对其影响，从而保护中华白海豚等珍稀物种，是一项亟需解决的课题，具有重要意义。

水下噪声对海豚的影响主要包括行为、声掩蔽、听力损伤、器官损伤甚至死亡等几个方面。海豚行为是否受到水下噪声影响是控制水下噪声的最低要求。由于海豚生活于茫茫大海，要从不同角度开展行为响应实验目前仍存在不少困难。因此，需要探索新的方法来预测水下噪声对海豚行为的影响。2014 年，美国公开了海洋哺乳动物行为模拟模型，该模型可用于模拟外界声刺激下，海洋哺乳动物行为（运动）的变化情况。模型基于大量的海豚行为观测数据和发声听觉特性，利用动物发声、听觉、行为等信息，结合水声学模型，用于预测水下噪声对海洋哺乳动物行为的影响。当前大数据时代，可提供模型所需的信息，为利用此方法开展水下噪声对海豚行为影响研究提供了可能。

本论文在综合分析典型水下噪声源特性、声传播、类比海豚听觉特性以及行为响应的基础上，开展了水下噪声对中华白海豚、南宽吻海豚 (*Tursiops aduncus*) 行为的影响研究。研究方法上既采用了传统的实验观测方法，如利用厦门湾圈养的两只南宽吻海豚，开展了南宽吻海豚对声刺激信号的行为响应实验；也探索了新型的基于海洋哺乳动物行为模拟模型的方法来预测爆炸声源对南宽吻海豚行为的影响。通过这些研究，初步掌握了典型水下噪声源的特性，中华白海豚、南宽吻海豚的发声信号特征，南宽吻海豚的行为响应门限以及海豚对爆炸声源的行

为响应区域。

论文的主要内容包括以下几个方面：

1. 水下噪声监测及声学特性研究。首先综述了国内外水下噪声特性相关研究，然后系统分析了水下噪声的来源分类，最后利用近几年获得的大量近海及深海各类水下噪声实测数据，深入开展水下噪声源声学特性研究，包括噪声波形特征、强度和频谱分布等。

2. 海豚的发声特性研究。在综合分析国内外海豚发声和听觉相关研究的基础上，从理论分析、现场实验、数据分析三个方面开展研究，获取了中华白海豚、南宽吻海豚的发声数据，阐述了海豚发声信号的提取和处理方法，最后统计分析了海豚发声信号特征。

3. 水下噪声对南宽吻海豚行为影响的现场实验研究。通过行为学方法，在厦门五缘湾开展了商品化的发声设备、单频连续信号以及多脉冲复杂信号等不同外界声刺激对自然环境下圈养的南宽吻海豚行为的影响现场实验，给出了南宽吻海豚对中高频率脉冲信号行为响应的门限值。

4. 利用模型研究爆炸声源对海豚行为的影响。首先文献收集建立了南宽吻海豚行为的特征库，基于海豚的发声和听觉研究结果，优化现有的来自美国海军海洋哺乳动物行为模拟模型，使其可应用于水下噪声对海豚行为的影响模拟，主要行为包括水平和垂直方向的运动速度、水面距离、露出水面时间等。选定海豚栖息地厦门东海岸海域和声学调查活动频繁的南海北部大陆架海域，利用优化后的模型，开展了爆炸声源对南宽吻海豚行为的影响分析。结果表明，爆炸声源发声时，海豚会迅速远离声源，游泳和潜水速度明显加快，出水次数减少，但 1h 时间内累积出水时间明显增多。模型预测结果与现场实验结果较为一致，初步验证了模型的可靠性。

关键词：水下噪声；海豚；行为影响；生物声学；模型

Abstract

Increased anthropogenic underwater noise from a variety of sources, including commercial ship, marine resources exploration, construction, acoustic research, etc, has seriously affected marine environment. The developed countries in Europe and America have increasingly concerned about the problem and carried out many studies. America issued a provisional standard in 2013, which regulated sound pressure level of pulsed signal should below 190 dB re 1 μ Pa for most marine mammals. However, impact assessment criterias and effective technological means are still missing in our country because the research started rather late and is not systematic. Compared with other marine mammals, there are relatively few studies on Chinese white dolphins at home and abroad. The IUCN (International Union for Conservation of Nature) Red List of Threatened Species lists Chinese white dolphins as a Near-endangered in 2008. How to effectively evaluate and reduce the impact of underwater noise on the Chinese white dolphin is an urgent problem to be solved.

The effects of underwater noise on dolphins mainly include behavioral response, masking, hearing loss (temporary or permanent), organ damage and even death. Whether the dolphin behavior is affected is the minimum requirement to control underwater noise. Hence it is necessary to study the effects of underwater noise on dolphins' behavior. However, there are many difficulties to carry out experiments as dolphins live in the vast sea. So it is necessary to explore new ways to study the impact of underwater noise on dolphins' behavior. A new model sponsored by office of naval research has been published in 2014. The model provides a means to simulate marine mammal movement and behavior under acoustic exposures. The model predicts the effects of underwater noise on marine mammals based on numerous records of dolphins' behavior, sound source, acoustic propagation and animal information. The current database can provide all the information needed in the model. So it is possible to use the model to study effects of underwater noise on dolphins' behavior.

In this paper, the effects of underwater noise on the behavior of Chinese white dolphins and bottlenose dolphins are studied based on comprehensive analysis of typical underwater noise source, acoustic propagation, analogy dolphin hearing and behavioral responses. The traditional experimental method is used in this study where the behavioral responses of captive bottlenose dolphins in Xiamen bay are carried out using an acoustic stimulus. Moreover, the paper explores new simulation method to predict effects of blasting sources on dolphins' behavior. The characteristics of typical underwater noise, sound signals and behavior response threshold of bottlenose dolphins are obtained through the study in this paper.

The main contents of the paper include the following parts:

(1) Underwater noise is measured and analyzed. Firstly, based on knowledge of a review of research on underwater noise at home and abroad, the source classification of underwater noise is systematically analyzed. Then, using a large number of noise data obtained at coastal and deep sea in recent years, we study the acoustic characteristics of underwater noise sources including waveform, intensity and spectrum distribution.

(2) Vocalization characteristics of dolphins are studied in the paper. Sound signals of dolphins are researched based on theoretical analysis, experiments and data analysis. Firstly, acoustic data are obtained. Then, the method of extracting and processing dolphins' vocalization is described. Finally, sound signal characteristics of dolphins are given.

(3) Field experiments are carried out to study effects of underwater noise on bottlenose dolphins. The effects of commercial sound equipment, pure and multi-pulse complex signal on the behavior of captive bottlenose dolphins in a floating pen are studied using behavioral methods. The threshold levels of behavior response to mid- and high- frequency signals are obtained from the experiments.

(4) Effects of blasting on dolphins' behavior are studied using the model. Based on a large number of available knowledge of species' oceanic behavior, the model is used to predict behavior response of marine mammals to different underwater noises. Firstly, the behavioral characteristics of bottlenose dolphins are established through a

literature review. Based on the results of vocalization and hearing of dolphins, the model of marine mammal movement and behavior is optimized. So that it can be employed to simulate effects of underwater noise on dolphin behavior. Definitions of species behavior include descriptions of horizontal and vertical rates, surfacing distances, and surfacing intervals. East Coast Sea in Xiamen and northern South China Sea continental shelf waters are chosen to carry out simulations using the optimized model. The results show that the dolphins quickly swim away from sound sources and dolphins' diving rate significantly accelerates when exposed to underwater noise sources. Surfacing intervals reduce, but accumulated time of surfacing in one hour increases significantly. The prediction results of the model are consistent with the experimental results, so the reliability of the model is verified.

Key Words: Underwater Noise; Dolphins; Behavior Response; Bioacoustics; Model

目 录

1. 第一章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究进展	3
1.2.1 水下噪声特性研究进展	4
1.2.2 海豚发声和听觉特性研究进展	15
1.2.3 水下噪声对海豚影响研究进展	18
1.3 主要研究内容	19
1.3.1 本文的研究目标	19
1.3.2 本文的研究内容	20
1.3.3 本文的结构安排	21
2. 第二章 水下噪声监测及特性分析	22
2.1 海洋环境噪声及声传播概述	22
2.1.1 海洋环境噪声分类	22
2.1.2 影响水下声传播的环境参数	27
2.1.3 海洋中的声传播损失	32
2.1.4 海洋环境噪声的长期趋势	33
2.2 水下噪声监测	35
2.2.1 水下噪声监测系统	35
2.2.2 水下噪声现场监测	40
2.3 水下噪声特性分析	47
2.3.1 水下噪声参数	47
2.3.2 水下噪声处理流程	50
2.3.3 水下噪声分析结果	51
2.4 本章小结	65
3 第三章 海豚发声监测及特性分析	67
3.1 海豚发声监测	67

3.1.1	海豚发声监测系统.....	67
3.1.2	海豚现场监测.....	70
3.2	海豚声信号处理.....	71
3.2.1	海豚声信号处理模型.....	71
3.2.2	海豚声信号处理方法.....	72
3.2.3	海豚声信号处理具体实现.....	73
3.3	海豚声信号特性分析.....	73
3.3.1	中华白海豚定位声信号.....	73
3.3.2	中华白海豚哨叫声信号.....	77
3.3.3	南宽吻海豚发声信号.....	80
3.4	本章小结.....	84
4	第四章 海豚对不同声刺激的行为响应研究.....	86
4.1	海洋哺乳动物听觉结构及分类.....	86
4.1.1	听觉结构.....	86
4.1.2	听觉功能分类.....	87
4.2	海豚听觉阈值.....	87
4.3	海豚对不同声刺激的行为响应.....	91
4.3.1	声刺激信号产生和记录系统.....	92
4.3.2	实验过程.....	93
4.3.3	数据分析及结果.....	94
4.4	本章小结.....	99
5	第五章 水下噪声对海豚行为的影响研究.....	100
5.1	海豚行为响应.....	100
5.1.1	海豚行为概述.....	100
5.1.2	行为响应分析.....	102
5.2	水声学模型.....	105
5.2.1	水声传播模型.....	105
5.2.2	海洋环境噪声模型.....	107
5.3	海洋哺乳动物行为模拟模型.....	108

5.4 爆炸声源对海豚行为影响的分析	111
5.4.1 个体行为模拟.....	111
5.4.2 群体行为模拟.....	116
5.5 本章小节	121
6. 第六章 总结与讨论	122
6.1 主要工作和创新	122
6.2 待进一步的研究工作	123
参考文献	124
致谢.....	136
攻读博士期间的主要科研成果	137

Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background	1
1.2 Research at home and abroad	3
1.2.1 Research progress of underwater noise.....	4
1.2.2 Research of sound and hearing of dolphins	15
1.2.3 Research of the effects of noise on dolphins.....	18
1.3 Thesis research.....	19
1.3.1 Objectives	19
1.3.2 Research contents.....	20
1.3.3 Organization and arrangements	21
Chapter 2 Monitoring and Analysis of Underwater Noise	22
2.1 Overview of ocean noise and sound propagation.....	22
2.1.1 Classification of ocean noise	22
2.1.2 Environmental parameters of affecting sound propagation	27
2.1.3 Sound propagation loss	32
2.1.4 Long-Term trends of ocean noise	33
2.2 Monitoring of underwater noise.....	35
2.2.1 Monitoring system of underwater noise	35
2.2.2 Monitoring of underwater noise.....	40
2.3 Analysis of underwater noise	47
2.3.1 Parameters of underwater noise	47
2.3.2 Processing of underwater noise	50
2.3.3 Analysis results of underwater noise.....	51
2.4 Summary	65
Chapter 3 Monitoring and Analysis of sound signal of Dolphins	67
3.1 Monitoring of sound signal of dolphins.....	67

3.1.1 Monitoring system of sound signal of dolphins.....	67
3.1.2 Monitoring of sound signal of dolphins.....	70
3.2 Processing of sound signal of dolphins.....	71
3.2.1 Model of sound signal processing of dolphins	71
3.2.2 Methods of sound signal processing of dolphins.....	72
3.2.3 Specific realization of sound signal processing of dolphins.....	73
3.3 Analysis of sound signals of Chinese white dolphins.....	73
3.3.1 Click signal of Chinese white dolphins	73
3.3.2 Whistle signal of Chinese white dolphins.....	77
3.3.3 Vocalization signal of bottlenose dolphins.....	80
3.4 Summary.....	84

Chapter 4 Study on Behavior Response of Dolphins to different acoustic stimulus86

4.1 Auditory structure and classification of marine mammals	86
4.1.1 Auditory structures.....	86
4.1.2 Classification of auditory functions.....	87
4.2 Hearing threshold of dolphins.....	87
4.3 Behavior responses of dolphins to acoustic stimulus	91
4.3.1 Production and recording systems of acoustic stimulus	92
4.3.2 Test procedure.....	93
4.3.3 Data analysis and results.....	94
4.4 Summary.....	99

Chapter 5 Impact of Underwater Noise on Dolphins' Behavior100

5.1 Behavior response of dolphins.....	100
5.1.1 Overview of behavior of dolphins	100
5.1.2 Analysis of behavior response of dolphins	102
5.2 Basic acoustic model.....	105
5.2.1 Underwater acoustic propagation model	105
5.2.2 Ocean noise model.....	107

5.3 Model of marine mammal movement and behavior	108
5.4 Analysis on impacts of explosive on behavior of dolphins.....	111
5.4.1 Simulation of individual behavior of dolphins	111
5.4.2 Simulation of group behavior of dolphins	116
5.5 Summary	121
Chapter 6 Conclusion and Discussion.....	122
6.1 Conclusion	122
6.2 Future research aspects	123
References	124
Acknowledgement.....	136
Publications during Study of PHD	137

第一章 绪论

1.1 研究意义

海洋哺乳动物是地球上的宝贵自然资源,具有极高的科研、经济和军事价值。我国海域拥有许多中国特有种或世界珍稀物种,如中华白海豚、南宽吻海豚、江豚(*Neophocaena*)、伪虎鲸(*Pseudorca crassidens*)、小抹香鲸(*Kogia breviceps*)等,然而,由于国家经济发展对资源需求的日益增加和开发利用不当,造成生态环境日益恶化,导致 15~20%的物种处于濒危状态。1988年,国务院把中华白海豚列为国家一级重点保护动物,同时也被国际自然保护联盟 IUCN(International Union for Conservation of Nature)列入濒危野生动植物种国际贸易公约 CITES(Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora)附录 I 物种^[1]。与其他濒危海洋哺乳动物相比,目前国内外对中华白海豚的研究相对较少,2006年,国际自然保护联盟 IUCN 濒危物种红色名录中将其列为数据缺乏的类别,2008年,又由“数据缺乏”提升为“接近濒危”的物种^[2]。

中华白海豚主要分布在东南亚、澳大利亚北部海域、非洲南部的浅水海域^[3],在我国主要分布在福建、台湾、广东、香港、广西等地沿海^{[4][5]}。然而,由于海洋经济活动的飞速发展,中华白海豚的生存环境正面临严重危机。栖息水域遭填埋、海洋污染、非法捕鱼导致的食物匮乏以及海洋噪声等影响了中华白海豚生存环境。厦门海域是中华白海豚的重要分布区之一,历史上曾有较大的种群数量。然而,从 1997 年至 2007 年十年间,至少有 35 头中华白海豚死亡,仅 2004 年下半年死亡个体达到 6 头。2015 年 3 月发生的中华白海豚致死事件引起了当地政府和诸多媒体的高度重视,“谁杀死了中华白海豚?新市长叫停厦门新机场炸礁工程”等相关标题新闻出现在各大媒体。

中华白海豚、南宽吻海豚等海洋哺乳动物主要靠回声定位系统觅食、交流信息和探测周围的环境,发声和听觉系统对其生命活动具有重要意义。然而,海洋活动产生的水下强噪声,严重干扰了海豚发声和听觉系统,影响其觅食和群体活动,甚至造成听觉器官损伤。1998 年以来,国际《自然》杂志连续发表了数篇有关美国海军低频主动声纳对海豚听觉器官造成的物理损伤和重要器官慢性致

命损伤的报道^[6]。与低-中频主动声纳相比，目前的水下工程活动，如爆破（特别是水中爆破）、打桩、船运等将产生更强、影响范围更大的水下冲击波和强噪声。美国国家海洋渔业局 NMFS（National Marine Fisheries Service）在 2012 年及美国国家海洋和大气管理局 NOAA（National Oceanic and Atmospheric Administration）在 2013 年已颁布（临时性）标准，规定大多数海洋哺乳动物所可承受的脉冲型声压级应低于 190dB；须鲸和抹香鲸可承受的脉冲型声压级应低于 180dB；而目前不少海洋活动所产生的噪声级高于这一数值。反观我国在这一方面的研究起步较晚，近些年才逐渐引起学术界和政府部门的关注，2014 年，国家海洋局制定了《海上风电工程环境影响评价技术规范》，规范中明确指出海上风电项目必须要进行水下噪声环境现状调查与评价；发改委、工信部、交通部也于 2014 年发布“关于征集开展水下噪声相关研究建议的函”，函中提出“我国在民船水下噪声方面的研究较少，且不具备大规模开展水下噪声测试的条件，缺少相关数据积累，未来将难以深入开展该议题的国际谈判。为今后在水下噪声规则制定工作中占据主动优势，希望国内工业界密切跟踪该议题进展情况，同时提前开展关于水下噪声的相关科研工作，完善水下噪音水平设定、测量和报告方法等内容”。预计不久的将来，民船水下噪声的排放将列入强制内容，入港将实施与“船舱污水排放”同样的管理。2018 年，联合国海洋与海洋法即将进行的非正式磋商会议主题即为“人为水下噪声”，号召各国提交有关水下噪声对海洋生物资源影响的科研素材。

随着 21 世纪“海上丝绸之路”建设推进，必将增加民船航行、海洋调查、资源开发和工程建设等海上活动，这些活动产生的水下强噪声给中华白海豚、南宽吻海豚等海洋哺乳动物的生存环境带来的威胁越来越严重。为实现生态与经济和谐发展双赢目的，开展水下噪声对海豚行为的影响研究具有重要意义。目前，水下噪声对海豚行为的影响研究集中于实验或类比于其他海洋哺乳动物，但海豚生活在茫茫大海，开展实验研究存在诸多困难。本论文拟利用传统实验方法和新型模型模拟方法相结合开展水下噪声对海豚行为的影响研究，预测水下强噪声对海豚行为的影响范围，为合理保护海豚提供重要的科学依据。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库