

学校编码：10384
学号：22320131151363

密级_____

厦门大学

硕士 学位 论文

南海北部大陆架海域声传播实验分析与声

场模拟研究

The Research on Sound Propagation
Experiment and Numerical Simulation in
Continental Slope Environment of the
Northern China Sea

任海元

指导教师姓名：杨燕明研究员
专业名称：物理海洋学
论文提交日期：2016年08月
论文答辩时间：2016年08月

2016年08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()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。)

声明人(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

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 绪论	1
1.1 声传播研究意义	1
1.2 大陆架海域声传播研究现状	2
1.3 主要研究内容	6
1.3.1 本文的研究目标	6
1.3.2 本文的结构安排	6
第 2 章 实验介绍与数据处理	8
2.1 实验介绍	8
2.1.1 实验海区及站位、测线概况	8
2.1.2 声传播实验概况	9
2.1.3 海洋环境观测	10
2.2 数据处理	12
2.2.1 理论模型	12
2.2.2 实测声传播损失计算	14
第 3 章 声传播损失的季节变化	15
3.1 南海北部物理海洋概况	15
3.2 O2-T22 测线	17
3.2.1 温度与声速的季节变化	17
3.2.2 传播损失的季节变化	18
3.3 O2-T23 测线	21
3.3.1 温度与声速的季节变化	21
3.3.2 声传播损失的季节变化	22
3.4 分析与讨论	25
3.5 本章小结	31

第 4 章 典型海底地形下的声传播实验与仿真	32
4.1 RAM 模型	32
4.2 仿真简介	34
4.2.1 水体吸收系数	35
4.2.2 海底声学模型	35
4.2.3 宽带平均	40
4.3 典型浅海地形下声传播实验与仿真	40
4.3.1 大陆架平坦海底	40
4.3.2 大陆架斜坡海底	43
4.4 典型深海地形下的声传播实验与仿真	45
4.4.1 深海平原海底	45
4.5 典型过渡海域地形下声传播实验与仿真	48
4.5.1 过渡海域斜坡海底	48
4.5.2 过渡海域平坦海底	50
4.6 本章小结	52
第 5 章 海底山对声传播的影响	54
5.1 研究背景	54
5.2 声传播环境简介	54
5.3 海底山对声传播的影响	56
5.4 数值仿真	58
5.5 本章小结	61
第 6 章 总结与展望	62
6.1 总结	62
6.2 展望	63
参考文献	65
致 谢	70

CONTENTS

Abstract(Chinese).....	I
Abstract(English).....	II
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Research background and significance	1
1.2 Review of studies about sound propagation on continental slopes.....	2
1.3 Contents of paper	6
1.3.1 Target of research	6
1.3.2 Arrangements	6
Chapter 2 Experiments description and data processing.....	8
2.1 Experiments description.....	8
2.1.1 Experimental sites and tracks.....	8
2.1.2 Sound propagation deployments.....	9
2.1.3 Physical oceanography observation.....	10
2.2 Data processing.....	12
2.2.1 Theoretical models.....	12
2.2.2 Calculation of measured TL.....	14
Chapter 3 Seasonal variations of transmission loss.....	15
3.1 Sketch of physical oceanography in the South China Sea.....	15
3.2 Track O2-T22.....	17
3.2.1 Seasonal variation of temperature and sound speed	17
3.2.2 Seasonal variation of TL	18
3.3 Track O2-T23.....	21
3.3.1 Seasonal variation of temperature and sound speed	21
3.3.2 Seasonal variation of TL	22
3.4 Analysis and discussion	25
3.5 Summary	31

Chapter 4 Simulation of sound propagation in typical seabeds.....	32
4.1 RAM	32
4.2 Introductions of simulation	34
4.2.1 Absorbtion of sea water	35
4.2.2 Sediment acoustic models.....	35
4.2.3 Wide band average.....	40
4.3 Simulation of sound propagation in shallow sea	40
4.3.1 Flat seabed in shallow sea.....	40
4.3.2 Continental slopes	43
4.4 Simulation of sound propagation in deep ocean	45
4.4.1 Abyssal plain in deep ocean.....	45
4.5 Simulation of sound propagation in typical transitional waters.....	48
4.5.1 Slopes in transitional areas.....	48
4.5.2 Flat seabed in transitional areas	50
4.6 Summary	52
Chapter 5 Impact of seamounts on sound propagation.....	54
5.1 Background.....	54
5.2 Experiment environment description	54
5.3 Impact of seamounts on sound propagation.....	56
5.4 Numerical simulation.....	58
5.5 Summary	61
Chapter 6 Summary and outlook.....	62
6.1 Summary	62
6.2 Outlook	63
References.....	65
Acknowledgement.....	70

摘要

南海大陆架和大陆斜坡是由浅海向深海过渡的海区，拥有强烈的地形变化和较为复杂的水文动力条件，是一种复杂的声传播环境。理解这些典型条件下的声传播现象并掌握其规律对南海的国防建设、资源开发、交通运输等均具有重大意义。

本文首先对季节性的海洋环境变化做了分析，500 m 深温度断面的比较表明季节间的变化特别体现在混合层深度的增减上，反映在声速上的变化则是混合层声道的深度的季节性变化，声速梯度基本结构没有变化。对四个季节的声传播损失数据，首先进行了距离与深度上的平均，然后利用长期非静态（LTNS, Long-term nonstationary）均值来比较各季节声传播损失的相对变化。结果表明，声源与接收器都在混合层深度以下时，O2-T22 测线上的声传播损失没有明显的季节性变化规律，但在 40-60 km 距离内传播损失出现约 2 dB 至 10 dB 的减小；而 O2-T23 测线上表现出冬季比夏季的传播损失平均高不足 5 dB，季节性变化非常小。关于混合层声道对声传播影响的模拟实验证明了季节性海洋环境变化对实验中的声传播情形影响微弱。在地形变化剧烈的传播环境下，声传播现象体现的更多的是地形特征的影响。

根据前人研究成果，选择具有如下特征的海底声学模型：压缩波衰减系数具有频散关系；从声速比的角度入手计算海底表层沉积物压缩波声速；水平变化的两层海底模型；结合声速梯度与沉积层厚度确定上层声速结构；将剪切波衰减等效为压缩波衰减。根据地形特征的不同，选择对浅海、过渡海域与深海典型地形开展 RAM 模式下的声传播仿真，模型计算结果与实测声传播损失数据吻合较好。

选择了海底山地形下的声传播实验，详细剖析了两座海底山对于实验中声传播的影响。通过模型仿真与对比可以发现，在所考虑的传播情形内，第一座海底山遮挡最高可以造成山体后方超过 30 dB 的传播损失增大；第二座海底山离声源距离太远，而对声传播的影响较小。

关键词：大陆坡；声传播；RAM 模式；海底声学特性；声场模拟

Abstract

As transitional areas from shallow sea to the deep ocean, continental shelf and slopes of the South China Sea involve intense topographical changes and intricate hydrographical conditions, which bring a typical un-regular sound propagation environment. To understand all kinds of sound propagation phenomenon in such an environment and its governing law are of great significance to military activities, resource exploitations and transportations in the South China Sea.

Seasonal variations of ocean environment are analyzed firstly. Comparisons of the upper 500 m sections show that seasonal variation of temperature can be mostly depicted by the depth of mixed layer, and seasonal variation of sound speed by the depth of surface duct, while basic sound speed structures remain the same. Measured sound TL collected during each experiment are averaged with respect to distance and depth, and long-term nonstationary(LTNS) averages are introduced to evaluate relative differences among seasonal TL. The results suggest that, there are no seasonal regular patterns of TL on track O2-T22, except for about 2-10 dB reduction in TL between 40-60 km; less than 5 dB is observed from the difference of TL between winter and summer on track O2-T23, which indicates that seasonal regular patterns are extremely weak. This is further confirmed by a simulation about impact of suarface duct on sound propagation. Overall, in an environment where bathymetry varies drastically, sound propagations embody more effects of topographical features than that of seasonal variance.

With measured sediment properties absent, a set of sediment acoustic models are constructed, based on canonical sediment acoustic theories, inversions, and related researches on sediment properties of experimental areas. The underlying main points are: the attenuation coefficient of compressional wave is frequency dependent; the compressional wave speed of surface sediment can be calculated by ratio of the sound speed of sediment and the sound speed of sea water; all the sediment acoustic models

are range dependent with two layers; the sound speed structure of the upper layer can be determined by sound speed gradient combined with the thickness of sediment; effects of shear wave can be reduced to attenuation caused by compressional wave. Experiment sites are then categorized into shallow sea, transitional water and deep ocean, sediment acoustic models are respectively chosen in simulations of the actual sound propagation experiments. The agreements between simulated and measured TL are good.

Additionally, an especially typical propagation environment with two seamounts is picked to analyze influences of each and every seamount in detail, with the help of simulation and artificially handled bathymetry. It is found that, for the case considered, the first seamount caused a TL reduction as large as 30 dB; and the second seamount has trivial influence on sound propagation since it locates too far away from sound source.

Key words: Continental slope; Sound propagation; RAM; Sediment acoustic properties; Sound field simulation

第1章 绪论

1.1 声传播研究背景与意义

声波作为海洋中唯一可以长距离传播的能量形式，人们对它的研究从一开始具有很强的现实背景。从水声应用的角度来看，到目前为止，在水下目标探测、通讯、导航等方面均以声波作为重要载体。水声技术已是开发海洋与研究海洋广泛采用和行之有效的手段，如水下通讯、声遥测遥控、水下数据图像传输、海洋涡旋运动和变化遥测等方面。理解各种典型条件下的声传播现象并掌握其规律，一直是海洋声学理论领域的经典问题，更是海洋声学应用领域的重大关注对象。

大陆架和大陆坡作为由浅海向深海过渡的海区，以其强烈的地形变化，复杂的水文动力条件，呈现出典型的非规则声传播环境，进而使得海洋声场既有一定的规律性又富有变化。国内外的历次海洋声学实验中，大陆架和陆坡区域的海洋环境及其变化和相应条件下的声传播规律都是研究的重点。

我国南海东北部海域是十分重要的边缘海域，研究该海域的声传播有其海洋学和水声学意义。近十几年来，国内外海洋学家通过不同的资料和方法对南海东北部海域影响水声传播特性的环流、中尺度涡等做了很多的研究。在水声物理场考察和实验方面，国内外各研究单位在该海域也做了大量工作。例如，早在 1960 年 1 月～4 月，中苏两国在榆林海区进行了水声考察，这是我国在南海取得的第一套水声调查资料；1985 年前后，国家海洋局第三海洋研究所对榆林港外开展海底声学特性调查，在南海中部综合调查中开展声速专业调查；1994 年，由海军牵头，中科院声学所、南海所、中船 715 所、760 所等单位对南海重点海域开展声场调查；2001 年 4～5 月间，美国、中国、中国台湾地区、日本、新加坡等在南中国海大陆架边缘附近进行了亚洲海声学实验（ASIAEX 2001），也称为声场与水体交互作用实验；在 2004 年和 2005 年间，中科院声学所在南海还分别进行了两次声传播实验。总的说来，南海东北部海域是中尺度环流、涡旋、内波活跃的区域，它一直是海洋学和水声学研究的热点区域。

研究南海东北部附近海域的声传播还具有军事国防意义。南海东北部海域由于地理位置较特殊（东北部边界经巴士海峡、巴林塘海峡等众多的海峡和水道与

太平洋相沟通，西靠广东、广西和海南三省，存在由浅海到深海的过渡区域，有些地方还存在海底圆台或小型海底山），水文特征较复杂，成为具有较大军事战略价值的海区。

研究南海东北部附近海域的声传播还具有一定的民用意义。了解南海东北部海域垂直方向的声传播规律和水平方向的声传播规律，都具有同样广泛的应用价值。例如，由于南海北部海域受黑潮流的入侵，再加上沿岸冲淡水、浅滩上升流的影响，南海北部海域有较丰富的渔业资源（如粤东渔场、汕头-台湾浅滩渔场等），而近年来为了对我国近海渔业资源生态容量进行调查，常采用水声技术手段估算鱼群分布；对该区域声传播特性的了解也有助于较精确的确定渔业资源分布。另外，在开发、利用海洋的过程中，人类对于水下声通信的需求日益增强。现代水声通信要求了解水下声信道规律，尤其是声传播损失和通信距离的关系以及多途传播效应对水声通信的影响等。因此，研究该海域的水平声传播特性十分有助于研究水下通信、水下遥测等在该海域的应用。

在当前南海岛礁主权归属及专属经济区划分争端纷起，美国在南海问题上频频发声，甚至炫耀军事存在的大背景下，更好的研究南海东北部海域的声传播规律也是维护我国领海主权，保护我国海洋权益的现实需要。

1.2 大陆架海域声传播研究现状

从研究方法来讲，自八九十年代数值技术在海洋声学领域渐渐得到重视起，数值模拟也成为研究声传播问题的重要手段。较早时候学者们多采用现场实验数据与数值模拟结合的方法。比较来说，现场试验数据的优点在于数据可靠，能够真实反映研究海域特定时刻的海洋环境与相应环境下的声场现象；但缺点也很明显，实验本身较为费时费力，且不易获得时空连续数据，离散单点数据难以对实验海域做全场的深入了解，尤其不能完全了解声传播的路径；声场随时间的变化也很难了解全面。而这恰恰是数值模拟的长处所在，只需要有合适的现场环境数据作输入参数，好的数值模式可以给出所模拟的全声场数据。声传播的路线和任意深度距离上的传播损失均可以极为方便的计算出来。如果考虑时间引起的海洋环境变化，只需要对相关的输入参数做校正，则声场随时间的变化也可以重新计算出来。

Carey (1986) 在西北大西洋进行的海表船噪声实验中发现, 强的表面声道和斜坡反射同时存在的情况下声传播增强现象, 这证实了船致噪声对深海环境噪声的贡献; 数值仿真呈现了声进入深海声道轴传播的路径^[1]。Dosso (1987) 利用加拿大西海岸 Vancouver 岛附近陆坡区域的声传播实验数据, 详细分析了声源位于陆坡之上时, 陆坡对向外传播的声波的增强效应, 指出最大的增强出现在 110 km 左右, 可以达到 15 dB; 并利用实测的声速和海底地质数据模拟了声传播的主要路径, 模拟计算的传播损失的与实测结果具有很好的一致性^[2]。Heaney (2007) 在夏威夷 Kauai 岛附近进行的 BASSEX04 声学实验中, 选取了跨过大陆斜坡的两条传播路线, 分析了宽带信号的到达结构并提取特征谱; 他认为信号接收上的时间延迟是地形引起的声波折射, 这证明了在大陆斜坡区域存在明显的三维声传播现象^[3]。张镇迈等 (2007) 使用南海现场试验数据对大陆坡海域的海底倾斜度对声传播的影响做了数值模拟, 其结果表明, 海底倾斜度小于 2×10^{-3} 时, 1500 Hz 以下的声传播损失差距在 2 dB 内; 对不同声速剖面的仿真结果同时了证明负梯度的剖面受海底倾斜度影响最大, 等声速剖面次之, 正梯度最小^[4]。王鲁军 (2011) 利用数值模拟和实验研究分析和总结了不同斜坡海底条件下声场垂直相关性随垂直间隔和传播距离的变化规律, 并利用楔形简正波理论对海底倾斜引起的声场垂直相关变化机理进行了解释。研究结果表明, 上坡和下坡地形的声场垂直相关性具有很大的差别^[5]。秦继兴 (2014) 在西太平洋大陆坡海域观测到声道轴深度附近声波能量较为集中的现象, 结合数值模拟定量分析了声源位置对于声传播损失与信号波形的影响。指出声源在海表面时, 声波在大陆坡表面反射, 可以在声道轴深度实现远距离传播; 而声源在大陆坡表面时, 斜坡改变了水体中的能量分布从而引起会聚区位置的变化, 而对会聚区传播损失的影响较小^[6]。

大陆架和大陆坡海域的声传播环境, 地形作为传播环境的边界是一个不可忽视的因素。综合现有的研究资料来看, 大陆斜坡影响声传播的主要方式是改变声传播路径^[2; 7]。以不同入射角接触斜坡的声线经过斜坡反射, 传播路径被改变, 水体中能量的空间分布随之改变; 再由水体中各种传播环境如表面声道、负梯度、深海声道等进行典型传播, 形成与常规平坦海底地形的不同声传播现象。根据斜坡地质类型和水文环境的差异, 其中可能会伴有散射、水平折射的发生^[8], 声场的结构和与之相关的空间特性发生改变^[3; 9]; 表现在接收器上一般是传播损失的

异常增大或减小，信号的多途效应与时间延迟等现象^[10;11]。而这些影响的具体表现和声源位置、接收器位置、海底倾斜度、地质类型、所在海域水文条件都有很大关系。

尤其是水文条件，作为主体传播环境，与地形一起决定了声传播的主要特点。在某些海底倾斜度较小的海域，水文条件对声传播的影响甚至要超过地形。学者们通常结合特定的海洋现象来研究水文条件对声传播的影响，如海洋锋、内波、潮汐等。这是非常自然的，因为在现实海洋中，一方面这些现象代表了最典型的水文特征，是理想的研究目标；另一方面大陆架和陆坡海域本身是这些现象的多发海域，通过这些现象来研究水文条件对声传播的影响是一种必然选择。

Dickey (2001) 总结了 1995-1997 年间在新英格兰大陆架及其邻近海域进行的 CMO, PRIMER, SAS 等综合性海洋实验中，学者们研究了该区域内中物理的、生物的、地质沉积的，光学的海洋过程以及它们之间的相互耦合。重点关注了大陆架陆坡区域内波的产生、运动和锋面的时空变化以及对声传播的影响^[12]。其中，Lynch (2003) 利用 PRIMER 实验中 CTD 提供的高分辨率的水文资料，分析了春、夏、冬季跨大陆架的海洋锋面及其变化规律；并利用 RAM 模型模拟了跨大陆架区域的低频声场结构，分析了声场的昼夜差异与季节差异；同时结果还表明内波孤立子导致的声散射使得实测声传播损失大于仿真结果^[13]。Pasewark (2002) 介绍了在美国东海岸新泽西大陆架进行的 SWARM95 实验。实验旨在研究内波孤立子和内潮引起的声场时空变化。对 42 km 接收距离上 224 Hz 和 400 Hz 声波的单频能量和宽带能量进行统计分析，K-S 检验与闪烁指数 (scintillation index, SI) 分析均表明声信号能量在不同接收深度上随时间变化，这与内波孤立子或内潮引起的散射有关^[14]。陈守虎等 (2004) 利用 ASIAEX2001 南海实验部分数据，分析了实验海区大陆架及陆坡区域的内波基本特征以及内波对声场起伏的影响。结果表明，224 Hz 的声信号能量起伏峰值超过 17 dB，延时起伏峰值超过 700 ms；400 Hz 的声信号能量起伏峰值超过 21 dB，延时起伏峰值超过 500 ms。并且垂直于内波传播方向的声传播起伏更大；高频内波对声信号的影响也更大^[15]。Tuncay Akal (2002) 利用 SACLANTCEN 项目中的海洋声学实验，给出了极地海域大陆架上极地锋面对声传播的影响。结果表明，声波垂直于锋面传播的情况下，12-14 km 处出现的暖锋面使得 13—18 km 距离范围内 100-800 Hz 声传播损失降低 5-6

dB；更高频率的声传播则基本不受影响。48 小时的连续观测还表明，上述频带内声传播损失有至多 12 dB 的起伏^[16]。

内波引起的声传播起伏原因可归结为温度微结构和界面的随机不均匀性^[17]，以上研究表明不同频率的内波对不同频率的声传播影响不同，表现在声信号传播时间，传播距离，能量起伏的差异上；非均匀界面间的散射是引起这些变化的重要原因。海洋锋同样容易形成很强的水团间界面，除了散射之外，海洋锋还更容易影响声传播的路径，改变声能量在水体中的分布；依声源位置和传播方向的不同，不同类型的锋面可以导致声能量在水体上部或下部异常集中的现象，并对传播距离有较大影响^[18; 19]。比起关于内波或海洋锋这些单一的水文因素对声传播影响的研究，更复杂的情况也渐渐得到学者们的注意。而数据同化技术和动力声学耦合模型的出现，则提供了一种更全面深入研究手段。不仅高时空分辨率的海洋环境数据更易获得，多种复杂水文条件的耦合模拟也变得可能，进而这种条件下的声传播现象模拟也得以实现。

Duda (2002) 利用数值模型模拟陆架坡区域，有无内波存在的情况下，底层暖盐水代表的锋面入侵对于对声传播的影响。分情形的模拟对照表明，13 km 处的内波孤立子导致了简正波的耦合，但能量穿过孤立子后衰减很快，这种影响随波包的位置变化而不同；底部的锋面入侵模拟显示 10 km 以后的声传播经海底的反射减少，传播损失分布较为一致；内波孤立子与锋面都存在的情况下，简正波耦合与穿过内波后声能量的增益都很明显^[9]。Lin (2013) 利用模型输出南加州 Bight 海域的潮致海流，并研究这种条件下大陆斜坡引起的声波斜反射以及声场随时间的变化。指出了这种斜反射可以在水平方向上形成不同尺度的干涉条纹；水体环境的变化使得声波入射到大陆斜坡的角度发生改变，这种干涉条纹也会发生变化^[18]。Chen (2014) 利用海洋动力声学耦合模型输出威尔士西岸凯尔特海大陆架海域的典型海洋环境并模拟其对声传播的影响。他的主要结论有：声源在近岸跨陆架斜坡向外的声传播夏季受温跃层和锋面影响，能量集中在近水体底部；冬季则在水体垂直方向上呈较为均匀的分布；经过 40 km 传播距离在 10 m 接收深度上差值可达 15 dB。由外海向近岸传播的传播受季节变化和声源位置影响一样明显：夏季浅海声源能量在水体中分布均匀，传播损失比冬季显著增大；夏季深海声源能量在温跃层作用下被束缚在底部冷水团中，传播损失比冬季的降低，

最多有 20 dB。三维模拟显示，传播损失在各个深度上都具有各相异性，这受地形变化的影响较大^[20]。

对于以上实验海域的声传播规律，我们已经有了相当的了解。然而大陆架与陆坡在世界大洋中广泛存在，在各局部海域中，大陆架和陆坡成因不同，地质类型与变化不同；在这些海域中，水文动力机制，水体中的物理、生物、光学、化学等过程的相互作用规律也不一样；加之人类海运，油气开采等活动的影响不一。综合来看，这些因素使得各大陆架和陆坡海域的水声传播环境不尽相同，声传播的现象也在表现出规律性的同时包含不同的特点。

1.3 主要研究内容

1.3.1 论文的研究目标

论文的研究目标是了解南海北部各季节的声传播规律；参考经典理论和相关研究建立适用于该海区典型地形下的海底声学模型，并对声传播实验展开仿真模拟，对比模拟声场与实验结果。并利用所建立的海底声学模型对各种地形下的声传播现象与规律进行研究分析，为以后的研究与应用做储备。

1.3.2 论文的结构安排

本论文共分六章，其结构安排如下：

论文的第一章首先介绍了本课题的研究意义和研究背景，简要回顾了当前大陆架和大陆坡海域声传播的研究重点。

论文的第二章介绍了声传播实验的地形地貌，实验中使用的各类仪器和水听器阵相关信息；其次，介绍实验过程中的海洋环境要素观测、声传播实验的作业方式与数据获取；最后，概述了实验数据的处理方法，包括理论模型和实测声传播损失的计算。

论文的第三章首先介绍了南海北部的物理海洋概况，实验两条测线的水温与声速的季节变化，然后通过长期损失均值比较不同季节下海洋环境导致的声传播损失差异；接着通过对混合层声道的模拟，验证季节性海洋环境变化对声传播的影响。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.