

深海海底山环境下声传播水平折射效应研究

李晟昊 李整林 李文 秦继兴

Horizontal refraction effects of seamounts on sound propagation in deep water

Li Sheng-Hao Li Zheng-Lin Li Wen Qin Ji-Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 224302 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181480

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181480>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I22>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[大深度接收时深海直达波区的复声强及声线到达角估计](#)

Complex acoustic intensity with deep receiver in the direct-arrival zone in deep water and sound-ray-arrival-angle estimation

物理学报.2016, 65(16): 164302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164302>

[基于矢量水听器的深海直达波区域声传播特性及其应用](#)

Analysis of sound propagation in the direct-arrival zone in deep water with a vector sensor and its application

物理学报.2016, 65(9): 094302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094302>

[深海海底斜坡环境下的声传播](#)

Sound propagation in deep water with a sloping bottom

物理学报.2016, 65(1): 014303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014303>

## 深海海底山环境下声传播水平折射效应研究\*

李晟昊<sup>1)2)</sup> 李整林<sup>1)†</sup> 李文<sup>1)</sup> 秦继兴<sup>1)</sup>

1) (中国科学院声学研究所, 声场声信息国家重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100190)

(2018年8月3日收到; 2018年9月20日收到修改稿)

声波在深海海底山环境中传播时, 海底山会对声传播产生重要影响. 2016年在南海深海进行了一次海底山环境下的声传播实验, 观测到了由海底山引起的三维声传播效应, 本文利用 BELLHOP 射线理论解释了海底山环境下的三维声传播机理. 结果表明: 声波在传播过程中与海底山作用后破坏了深海会聚区结构, 导致传播损失增大, 在海底山后形成具有明显边界的声水平折射区, 利用二维声传播模型无法解释实验现象, 海底山后声水平折射区实验测量的声场结构与  $N \times 2D$  模型计算结果存在明显差异, 实验的传播损失比  $N \times 2D$  模型计算结果大 10 dB. 通过三维射线模型分析  $N \times 2D$  模型计算结果与实验结果存在明显差异产生的原因, 发现由于声波水平折射作用, 部分声线无法到达接收器, 使得三维声传播效应对海底山后一定角度范围内声场影响较为明显. 因此, 深海海底山会引起明显的三维水平折射效应, 应在水下目标探测和定位等应用中给予重视.

关键词: 深海, 海底山, 水平折射, 射线理论

PACS: 43.30.Zk, 43.30.Dr, 43.30.Cq

DOI: 10.7498/aps.67.20181480

## 1 引言

深海中存在大量海底山, 声波在深海中传播过程时会频繁地与海底山碰撞, 偏离原来的传播平面, 产生三维 (three-dimensional, 3D) 水平折射效应<sup>[1]</sup>. 由于海底山的三维效应较为复杂, 并且适用的模型计算效率较低, 之前针对海底山的声传播研究多利用二维 (two-dimensional, 2D) 或  $N \times 2D$  模型. 随着海洋声学研究的深入, 研究的重点逐渐从海底山环境下的二维声传播问题转移到三维声传播问题<sup>[2-14]</sup>.

Weston<sup>[1]</sup> 首先提出了水平折射这一概念, 并发现大陆坡和海底山的地形变化会引起强烈的水平折射效应, 在此之后许多学者尝试解释水平折射现象背后的物理机制. Harrison<sup>[2,3]</sup> 利用射线不变量计算得到了斜坡环境下的声线路径, 并且发现因

海底山形成的影区存在边界. Buckingham<sup>[4]</sup> 提出了一种基于简正波理论的模型, 该模型可用于计算圆锥形刚性海底山环境下的声传播问题, 但该模型假设海底山顶点需要刚好位于海面, 他随后利用简正波的振幅方程预测海底山后方将形成明显的声影区. Munk 和 Zachariassen<sup>[5]</sup> 基于绝热简正波模型分析了简化成圆锥体的海底山对声能量的折射效应. Chapman 和 Ebbeson<sup>[6]</sup> 在太平洋东北部的实验中利用爆炸声源研究了海底山环境下声传播的多途现象, 发现由于海底山的存在, 声传播损失比无海底山时大了 10—15 dB. Kim<sup>[7]</sup> 利用“Basin Acoustic Seamount Scattering Experiment” (BASSEX) 实验获得的数据研究了海底山环境下的声传播问题, 包含由海底山引起的遮挡、衍射和散射效应, 并且采用三维耦合简正波模型计算了三维环境下的宽带声脉冲信号, 验证了水平折射现象的存在.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11434012, 41561144006, 11874061) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lzhl@mail.ioa.ac.cn

目前,我国深海海底山环境下声传播规律的研究多针对二维声传播问题<sup>[15-18]</sup>. Li等<sup>[15]</sup>对深海海底山环境下二维声传播规律进行了研究,结果表明,由于深海海底山的遮挡效应,在海底山之前声强增加7—8 dB,并破坏了深海会聚区到达结构,使得第一会聚区位置的传播损失较平坦海底环境下的会聚区处增大30 dB. 胡治国等<sup>[16]</sup>通过分析2014年南海声传播实验数据,发现海底小山丘具有明显的反射和遮挡效应,使得声传播损失较平坦海底环境下增大大约8 dB.

本文利用2016年在南海海域开展的一次深海海底山环境三维声传播数据,对由海底山引起的声水平折射效应进行了研究,通过把不同方位角的实验传播损失与BELLHOP射线模型数值计算结果进行比较,表明 $N \times 2D$ 模型计算得到的声传播损失与实验结果存在明显差异,由此说明海底山环境下存在三维声传播现象,并利用三维模型分析和解释了深海海底山环境下的声传播机制,指出当存在海底山条件时三维声传播效应不可忽略,为后续的研究工作奠定了基础.

## 2 实验方法与结果

2016年11月,声场声信息国家重点实验室在中国南海海域进行了一次深海声传播实验,实验目的之一是为研究深海海底山环境下的三维声传播规律提供数据支持,声传播实验采用如图1所示的单船结合潜标的作业方式. 其中O2点是由20个自容式水听器组成的垂直声学接收潜标,水听器分布在123—1960 m深度范围内,非等间隔布放. 接收水听器的灵敏度均为-170 dB,采样率为16 kHz.

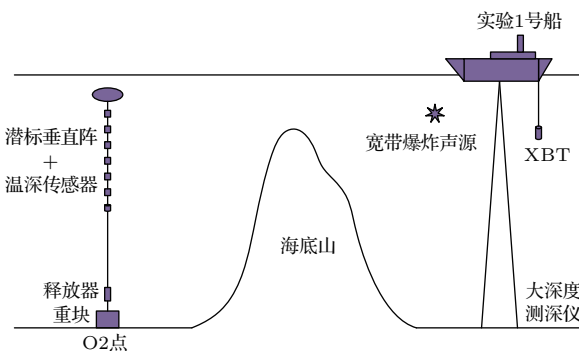


图1 实验设备布放示意图

Fig. 1. Configuration of the sound propagation experiment.

图2给出了实验过程中声传播测线示意图,其中包括以第一会聚区距离(大约55 km)为半径围绕接收潜标转圈一周的O2T3T3测线、覆盖平坦海底的O2T1测线以及经过海底山区域的O2T11, O2T2, O2T9测线. “实验1号”科考船以10节的航速分别沿着图2所示的测线进行声传播测量,每隔6 min投放一枚标定深度200 m, TNT当量为1 kg的宽带爆炸声源. 图3(a)给出了实验中测量得到

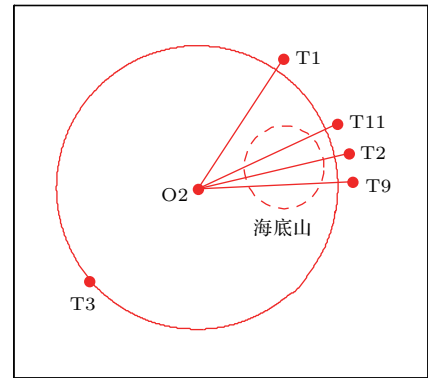


图2 声传播路径示意图

Fig. 2. Configuration of the propagation tracks.

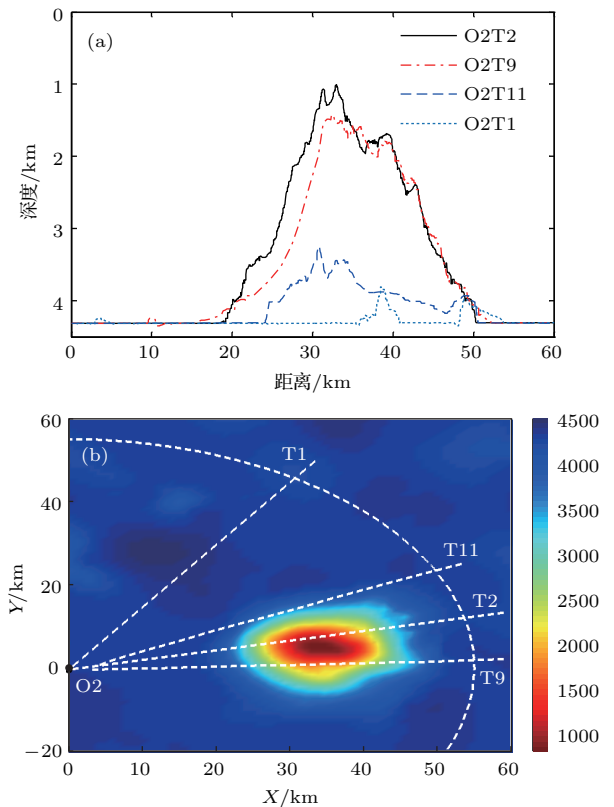


图3 实验海区水深图 (a)不同传播方向上的水深; (b)水深三维变化图

Fig. 3. Bathymetry of the experiment area: (a) Water depth along different propagation tracks; (b) 3D bathymetry data.

的O2T11, O2T2, O2T9与O2T1方向上海底深度随距离的变化. 从图3(a)可以看出, O2T2方向上海底山最高处距离海面约为1009 m, 距离接收潜标33 km, 海底山宽度约35 km, O2T11方向上切过海底山边缘, 海山的高度较矮, 最高处的海深约3300 m, 而O2T9方向上海山高度较高, 最高处的海深约为1500 m, O2T1方向上基本为平坦海底, 海深约为4350 m. 图3(b)则给出了由多波束测深仪融合海深数据库数据得到的三维海深随着空间变化的三维示意图.

图4给出了O2T3T3测线上声源与接收器的距离随方位角的变化. 实验设计各个方位角上的距离均为55 km, 但由于海深较大, 潜标布放的实际位置与预先设定的位置存在一定的误差, 使得O2T3T3圆形声传播测线上的声源到达接收潜标的距离随方位角有约1 km的误差. 另外, 为了躲避渔船, 在方位角120°—140°范围内距离偏离了圆周轨迹产生较大幅度的变化. 图5给出了实验期间测得的海水声速剖面, 通过温盐深仪 (conductivity, temperature and depth, CTD) 测得0—1760 m深度处的声速, 由声速的经验公式<sup>[19]</sup>计算得到1760—4350 m深度处的声速, 其中温度和深度由温深计测得, 而盐度在海深大于1760 m时变化很小, 可通过数据库中的插值得到. 声道轴深度在1050 m左右, 最小声速为1484 m/s. 海底附近的海水声速为1533 m/s, 小于海表面处声速1541 m/s, 为典型的不完全声道.

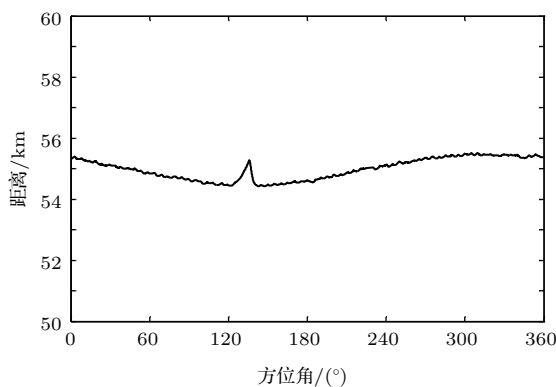


图4 O2T3T3测线上声源与接收潜标距离随方位角的变化  
Fig. 4. Distance between source and receiver along the circular propagation track O2T3T3.

在实验数据处理过程中, 将接收潜标上水听器接收到的声信号记为  $x(t)$ , 对声信号进行离散傅里叶变换得到信号的频谱  $X_i$ , 并在中心频率的1/3倍

频程内取平均, 可以得到窄带信号的平均能量为

$$E(f_0) = \frac{2}{F_s^2} \frac{1}{nf_2 - nf_1 + 1} \sum_{i=nf_1}^{nf_2} |X_i|^2, \quad (1)$$

其中  $f_0$  为中心频率,  $F_s$  为采样率,  $nf_1$  和  $nf_2$  分别为频率的下限和上限对应的频点数. 实验的声传播损失可以表示为

$$TL(f_0) = SL(f_0) - (10 \log[E(f_0)] - b), \quad (2)$$

其中  $SL$  和  $b$  分别表示声源级和水听器的灵敏度.

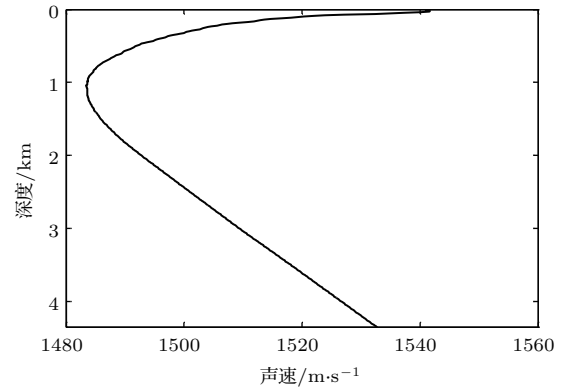


图5 实验期间测得的海水声速剖面  
Fig. 5. Sound speed profile measured in the experiment.

图6给出了由(1)和(2)式处理得到的O2T3T3测线上实验声传播损失 (transmission loss, TL) 随方位角和深度的变化, 其中声源中心频率为300 Hz, 声源深度200 m, 接收深度从123 m到1960 m, 方位角的范围为0°—360° (方位角以正北方向为0°, 顺时针方向为正方向). 以接收阵位置O2作为坐标原点, 人工剔除掉个别方位上受到较大干扰而导致信噪比不高的信号. 从图6可以看出, 在方位角0°—68°与97°—360°之间、海深约1000 m以浅形成高声强区, 在方位角68°—97°范围内, 声波经海底山作用后破坏了深海会聚区结构, 导致传播损失增大, 其中方位角约74°—90°范围内海底山对声传播影响更为明显, 形成了方位角声影区, 方位角68°—74°与90°—97°范围内形成了介于高声强区与方位角影区之间的强声水平折射区, 声影区与强声水平折射区之间存在明显边界, 且声影区内传播损失比强声水平折射区传播损失大10—15 dB, 比高声强区内传播损失大30—40 dB. 从图6中还可以发现220°—330°内高声强区影响深度比其他方位角的影响深度深, 这是由于实验期间潜标位置并未处于圆周中心位置, 导致O2T3T3圆形声传播测线上声源到达接收器距

离有约 1 km 的变化, 距离大约在 54.5—55.5 km 之间(如图 4). 图 7 给出了数值计算得到的平坦海底条件下声传播损失随距离和深度的变化, 其中声源中心频率 300 Hz, 声源深度 200 m, 其中 54.5 km 与 55.5 km 位置上的竖实线与虚线分别表示声源到达接收器的最小距离与最大距离位置. 可以看出在 54.5—55.5 km 范围内, 随着声源到接收器的距离增大, 高声强区的影响深度逐渐增大, 因此可以解释图 6 中高声强区影响深度发生变化的现象.

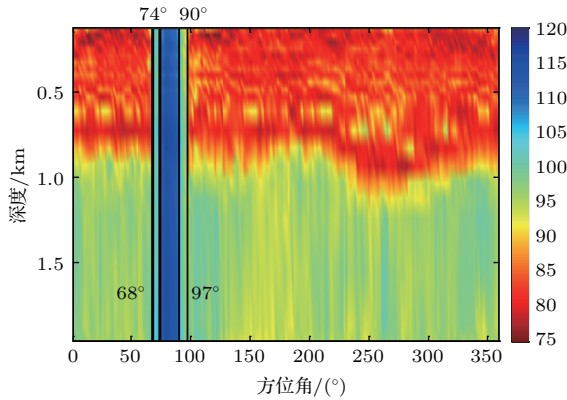


图 6 O2T3T3 测线方向上声传播损失实验结果, 其中声源中心频率 300 Hz

Fig. 6. Experimental TLs along the propagation track O2T3T3, where the central frequency is 300 Hz.

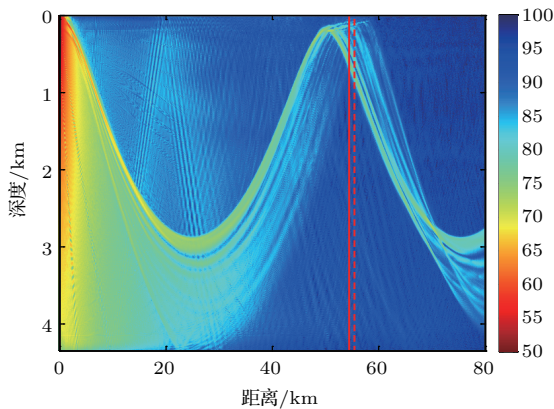


图 7 平坦海底条件下声传播损失随深度和距离的变化, 其中声源中心频率 300 Hz, 声源深度 200 m, 实线和虚线位置分别为 54.5 km 和 55.5 km

Fig. 7. The 2D transmission losses without seamounts, where the central frequency is 300 Hz, the source depth is 200 m, solid line and dashed line represent 54.5 km and 55.5 km respectively.

### 3 海底山环境下三维声场分析

为了研究由深海海底山引起的三维声传播规律及其背后的传播机理, 首先对海底山环境下的声传播损失进行数值计算, 并对实验现象进行分

析. 仿真计算采用以高斯波束追踪法<sup>[20]</sup>为基础的射线声学 BELLHOP  $N \times 2D$  模型以及 BELLHOP 3D 模型, 其中 BELLHOP  $N \times 2D$  模型使用二维模型近似处理三维问题, 而 BELLHOP 3D 模型考虑了方位角的耦合, 更适用于分析声波水平折射现象. 以上模型均可用于计算三维声场的声线轨迹与声场各接收点处声压, 根据射线理论, 考虑到接收点的各条声线的叠加, 可得声压  $p(\mathbf{r}, z)$ :

$$p(\mathbf{r}, z) = \sum_{j=1}^N A_j(\mathbf{r}, z) V_b^n V_s^m \exp(ik_0 \varphi_j(\mathbf{r}, z)), \quad (3)$$

其中  $A_j(\mathbf{r}, z)$  与  $k_0 \varphi_j(\mathbf{r}, z)$  为第  $j$  条声线的声压幅度和相位;  $V_b$  为海底界面的声压反射系数,  $V_s$  为海面的声压反射系数;  $n$  为声线在海底处的反射次数,  $m$  为声线在海面处的反射次数.

由  $p(\mathbf{r}, z)$  可以得到声场各处声强  $I(\mathbf{r}, z) = |p(\mathbf{r}, z)|^2$ . 通过对多个频点的声强进行窄带平均, 以保持与实验处理结果的一致性:

$$\bar{I}(\mathbf{r}, z) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I(f_m; \mathbf{r}, z), \quad (4)$$

其中  $M$  为频点个数. 最终给出的窄带的平均传播损失为

$$TL(\mathbf{r}, z) = -10 \lg \frac{\bar{I}(\mathbf{r}, z)}{I(|\mathbf{r}| = 1)}. \quad (5)$$

数值计算时选取与处理爆炸声源实验结果过程中相同的声源中心频率与带宽, 频点间隔为 10 Hz, 频点数取 9 个. 对于模型计算中环境参数的选择, 声速剖面的选择如图 5, 海底参数采用水平不变的单层海底模型, 声速为 1650 m/s, 密度为 1.8 g/cm<sup>3</sup>, 衰减系数为  $0.517 \times (f/1000)^{1.07}$  dB/λ<sup>[21]</sup>.

在数值仿真中, 根据互易原理<sup>[19]</sup>, 对声源和接收器深度位置进行对调. 仿真条件与海上实验情况一致, 将声源分别置于 0 km 处不同水听器所在深度, 在定深爆炸声源深度 (200 m) 不同距离处接收信号. 此处需要说明, 后文中提到的“接收深度”和“声源深度”与海上实验相对应, 在数值仿真中对应的是声源深度和接收深度. 图 8 给出了接收深度 (525 m, 1869 m) 条件下 BELLHOP  $N \times 2D$  与 BELLHOP 3D 射线模型计算得到的声传播损失随距离和方位角变化的计算结果, 其中声源深度为 200 m, 中心频率为 300 Hz.

从图 8(a) 和图 8(b) 可以清晰地看出, 当接收深度为 525 m 时, 海底山后形成了明显的方位角影区以及声影区与高声强区域之间的强声水平折射区, 影区范围内的声传播损失与强声水平折射区内的声传播损失相差大约 10—15 dB. 对比图 8(a) 和图 8(b) 可以看出, 两者明显的差异在于海底山后影区的宽度及强声水平折射区的声场结构,  $N \times 2D$  模型的计算结果要比 3D 模型计算得到的方位角影区窄, 强声水平折射区的计算结果恰好相反, 而其余位置上的声传播损失结果, 两者的差别不大. 结合实验传播路径可以发现: 在图 8(a) 中, O2T9 测线穿过海底山后声影区与高声强区域之间的强声水平折射区; 而在图 8(b) 中, 由于 3D 模型计算的影区范围变宽, O2T9 测线经过海底山后声影区. 对比发现, O2T9 测线在到达海底山之前两种模型理论计算结果基本一致, 声传播损失计算结果在海底山后产生明显差异, 相差大约 10 dB. O2T2 测线也有类似的现象. O2T11 整条传播测线上两种模型

计算结果差别不大. 对比图 6 与图 8, 图 6 实验结果中 O2T3T3 测线上声影区大约位于  $74^\circ$ — $90^\circ$  范围内, 强声水平折射区在  $68^\circ$ — $74^\circ$  与  $90^\circ$ — $97^\circ$  范围内, 图 8(a) 中由  $N \times 2D$  模型计算得到的声影区比实验结果窄, 强声水平折射区则相反, 图 8(b) 中通过 3D 模型得到的声影区及强声水平折射区的范围与实验结果基本一致. 图 8(c) 和图 8(d) 给出了当接收深度为 1869 m 时, 利用  $N \times 2D$  模型与 3D 模型得到的声传播损失随距离和方位角变化的计算结果. 对比图 8(c) 与图 8(d) 可以得到与图 8(a) 和图 8(b) 中当接收深度为 525 m 时相近的结论.

图 9 给出了 O2T11 及 O2T9 测线方向上  $N \times 2D$  模型及 3D 模型计算结果与实验结果的比较, 其中声源中心频率 300 Hz, 声源深度 200 m, 接收深度 525 m. 从图 9(a) 可以看出, 在 O2T11 方向上两种模型的理论计算结果与实验结果基本符合, 表明在海底山后声影区及强声水平折射区之外的区域, 声传播的三维效应不明显. 从 O2T11 与

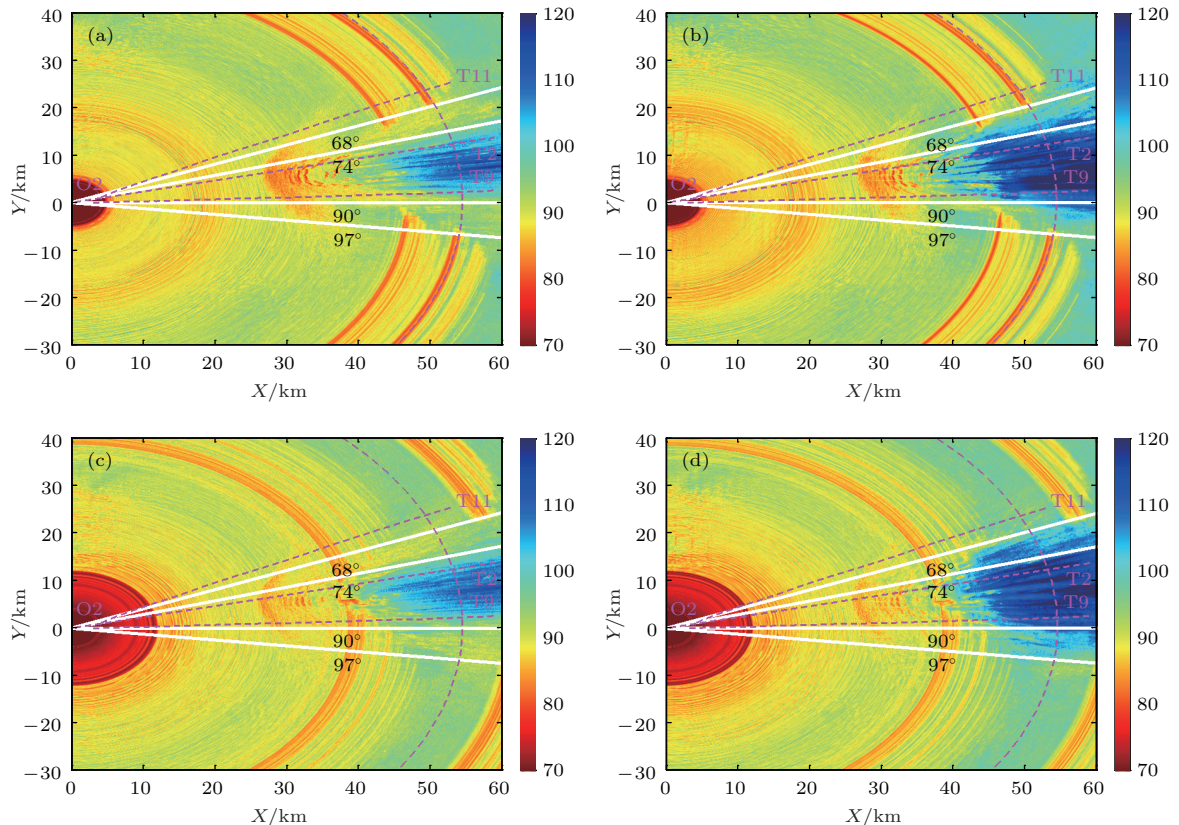


图 8 BELLHOP 模型计算的声传播损失, 其中声源深度 200 m, 声源中心频率 300 Hz (a) 和 (b) 分别为接收深度 525 m 时  $N \times 2D$  模型和 3D 模型的计算结果; (c) 和 (d) 分别为接收深度 1869 m 时  $N \times 2D$  模型和 3D 模型的计算结果

Fig. 8. Numerical TLs calculated by BELLHOP model, where the source depth is 200 m, the central frequency is 300 Hz: (a) and (b) are results of  $N \times 2D$  and 3D model when the receiver depth is 525 m; (c) and (d) are results of  $N \times 2D$  and 3D model when the receiver depth is 1869 m.

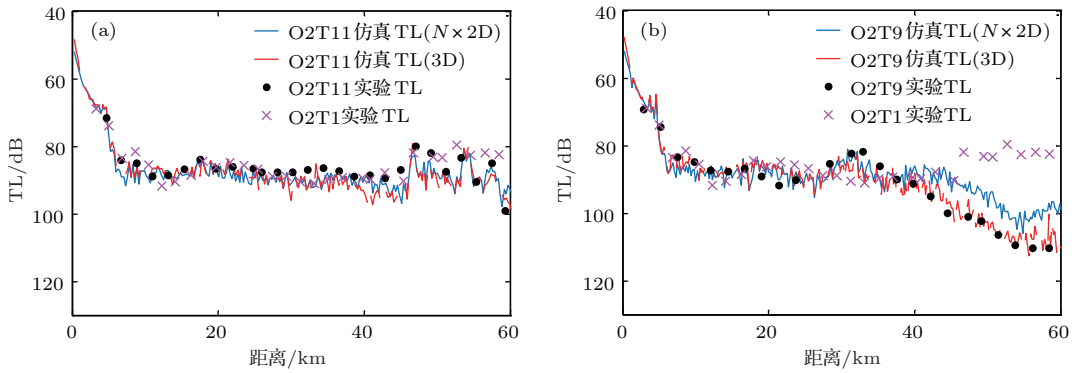


图9 不同方向传播损失实验结果与理论计算结果比较 (a) O2T11; (b) O2T9

Fig. 9. Comparison of the numerical and experimental TLs at different propagation tracks: (a) O2T11; (b) O2T9.

O2T1 测线方向上实验数据的对比可以看出, 由于 O2T11 方向偏离海底山中心位置较远, 海底山对声传播损失的影响较小. 从图 9 (b) 可以看出, 在 O2T9 方向的海底山后方, 由  $N \times 2D$  模型计算得到的声传播损失比实验结果小 10 dB 左右, 在该方向其他位置上的理论计算结果与实验结果差异较小, 而由 3D 模型计算的声传播损失与实验结果基本符合. 对比 O2T9 与平坦海底 O2T1 方向上实验数据可以看出, 在 O2T9 方向上海底山对声传播损失有较大影响, 引起海底山后声传播损失增大 30 dB.

小 5—10 dB, 同样在声影区及强声水平折射区之外,  $N \times 2D$  模型的计算结果与实验中声传播损失差别不大. 3D 模型的计算结果则与实验结果较为一致.

#### 4 三维声传播实验现象理论解释

上述实验和模型计算结果中, BELLHOP  $N \times 2D$  模型计算结果在海底山后声传播损失与实验结果存在明显差异, 而 BELLHOP 3D 模型可较好地解释实验的传播损失, 表明该实验中海底山环境在有些传播角度上会有明显的三维声传播效应. 我们分别在 O2T11 方向、O2T9 方向及由实验得到的强声水平折射区中选取不同声源位置, 利用本征声线进行机理分析, 本征声线仿真过程中未利用互易原理, 声源与接收器位置均与实验相同.

图 11 (a) 和图 11 (b) 及图 11 (c) 和图 11 (d) 分别给出了当声源位于 O2T11 方向海底山后方时, BELLHOP  $N \times 2D$  模型及 BELLHOP 3D 模型计算得到的本征声线结果, 其中声源的水平位置为 (49.6 km, 23.8 km), 即 O2T11 测线与 O2T3T3 测线的交汇处附近, 声源深度 200 m, 接收器水平位置位于坐标原点, 接收深度 525 m. 从图 11 (a) 和图 11 (b) 可以看出, 由于 BELLHOP  $N \times 2D$  模型并未考虑方位角的耦合, 声线沿直线方向到达接收位置, 其中包括直达声波以及与海底山作用一次、两次的声线. 从图 11 (c) 和图 11 (d) 中可以发现, 在基于 BELLHOP 3D 模型得到的本征声线中, 同样包含直达声波以及与海底山作用一次、两次的声线, 其中声线与海底山作用后, 经过水平折射到达接收位置, 产生三维声传播现象. 对比

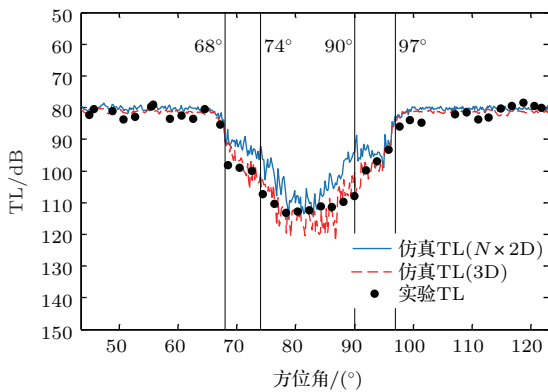


图 10 O2T3T3 方向上海山后方 45°—122° 方位角范围内的传播损失实验结果与理论计算结果比较

Fig. 10. Comparison of numerical and experimental TLs along the propagation track O2T3T3 within 45° to 122°.

图 10 给出了 O2T3T3 测线上海山后方 45°—122° 方位角范围内实验结果与两种模型声传播损失计算结果的对比, 其中声源中心频率 300 Hz, 声源深度 200 m, 接收深度 525 m. 从图 10 可以看出, 在通过实验得到的声影区与强声水平折射区范围内,  $N \times 2D$  模型的计算传播损失比实验结果

图 11 (a) 和图 11 (b) 及图 11 (c) 和图 11 (d) 发现, 虽然  $N \times 2D$  模型与 3D 模型通过理论计算得到的本征声线传播路径存在差异, 但是由于到达接收位置的声线组成基本一致, 均由直达声波以及与海底山作

用一次、两次的声线组成, 因此在 O2T11 方向上声传播三维效应对声传播损失的影响较小, 因此可以解释图 9 (a) 中在 O2T11 方向上两种模型计算得到的声传播损失均与实验结果相近的现象.

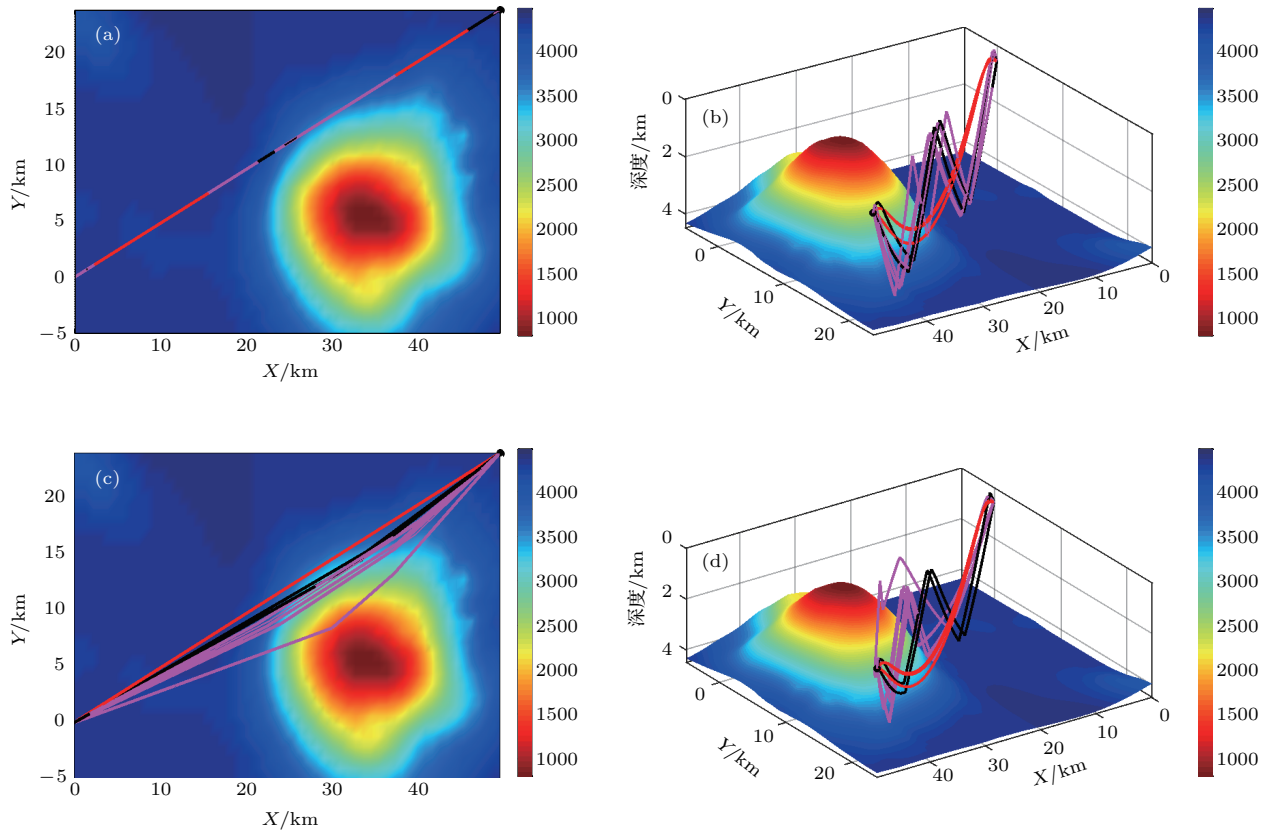


图 11 声源位于 O2T11 方向时的本征声线仿真结果 (a), (b)  $N \times 2D$  模型本征声线结果; (c), (d) 3D 模型本征声线结果  
 Fig. 11. Numerical results of eigenrays when the source located at the propagation track O2T11: (a), (b) Eigenrays calculated by  $N \times 2D$  model; (c), (d) eigenrays calculated by 3D model.

图 12 (a) 和图 12 (b) 及图 12 (c) 和图 12 (d) 分别给出了当声源位于 O2T3T3 测线上、如图 10 中  $68^\circ$ — $74^\circ$  范围内时, 利用 BELLHOP  $N \times 2D$  模型及 BELLHOP 3D 模型计算得到的本征声线结果, 其中声源水平位置位于 (51 km, 19 km), 声源深度 200 m, 接收器水平位置位于坐标原点, 接收深度 525 m. 从图 12 (a) 和图 12 (b) 可以看出, BELLHOP  $N \times 2D$  模型计算得到的声线沿直线方向到达接收位置, 由于海底山的遮挡效应, 没有直达声波到达接收位置, 只存在与海底山作用一次、两次的声线. 通过图 12 (c) 和图 12 (d) 可以发现, 在 BELLHOP 3D 模型的仿真结果中, 由于声传播三维效应, 只存在经过水平折射到达接收位置的声线. 对比图 12 (b) 与图 12 (d) 发现, 利用 BELLHOP  $N \times 2D$  模型得到的本征声线明显多于通过 BELLHOP 3D

模型得到的本征声线, 因此 BELLHOP  $N \times 2D$  模型计算的声能量将大于 BELLHOP 3D 模型的计算结果. 上述分析可以解释图 10 中的现象, 在方位角  $68^\circ$ — $74^\circ$  与  $90^\circ$ — $97^\circ$  范围的强声水平折射区内, 由实验得到海山后的声传播损失比 BELLHOP  $N \times 2D$  模型计算得到的传播损失大 10 dB 左右. 因此, 声传播三维效应对强声水平折射区内声场存在一定影响.

图 13 给出了当声源位于 O2T9 方向海底山后方时, 利用 BELLHOP  $N \times 2D$  模型与 BELLHOP 3D 模型得到的声线仿真结果, 其中声源水平位置位于 (54.7 km, 2.2 km), 在 O2T9 与 O2T3T3 的交汇处附近, 声源深度 200 m, 接收器水平位置位于坐标原点, 接收深度 525 m. 图 13 (a) 和图 13 (b) 给出了通过 BELLHOP  $N \times 2D$  模型得到的本征声线



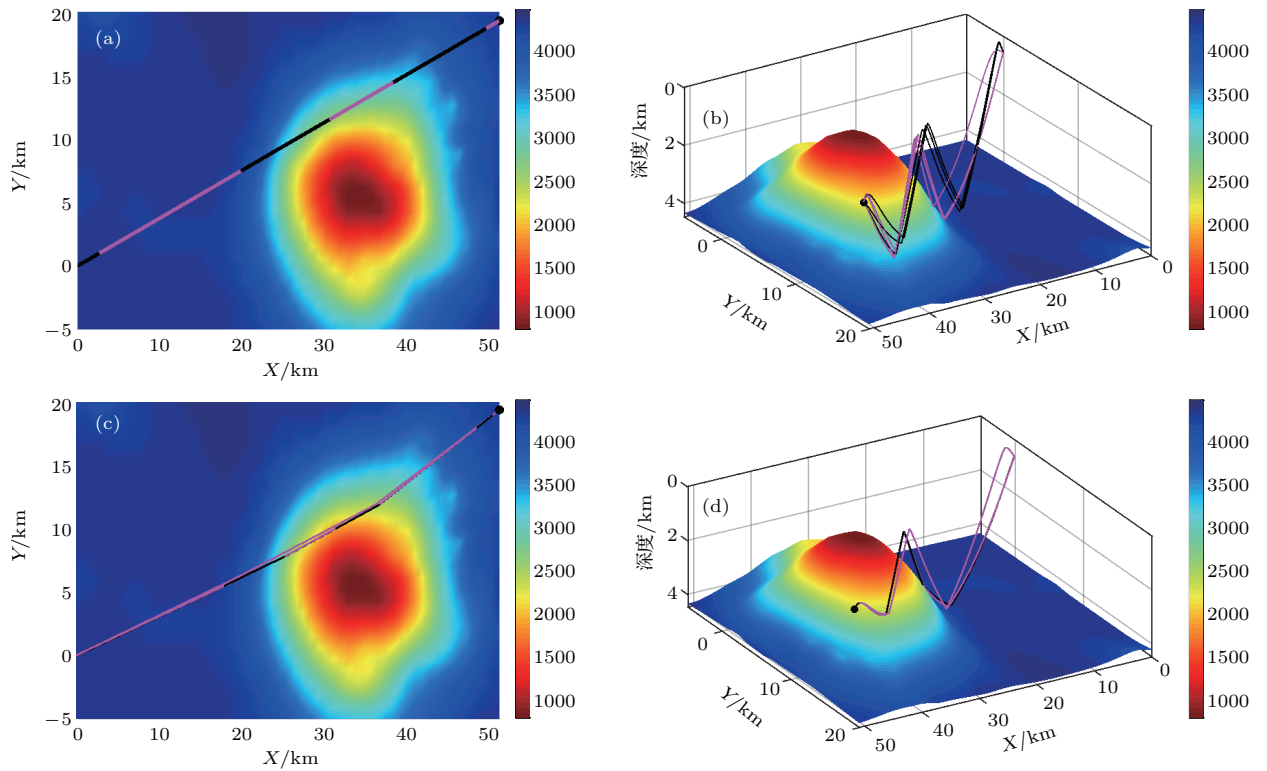


图 12 声源位于强声水平折射区时的本征声线仿真结果 (a), (b) BELLHOP  $N \times 2D$  模型本征声线结果; (c), (d) BELLHOP 3D 模型本征声线结果

Fig. 12. Numerical results of eigenrays when the source located in strong horizontal refraction zone: (a), (b) Eigenrays calculated by  $N \times 2D$  model; (c), (d) eigenrays calculated by 3D model.

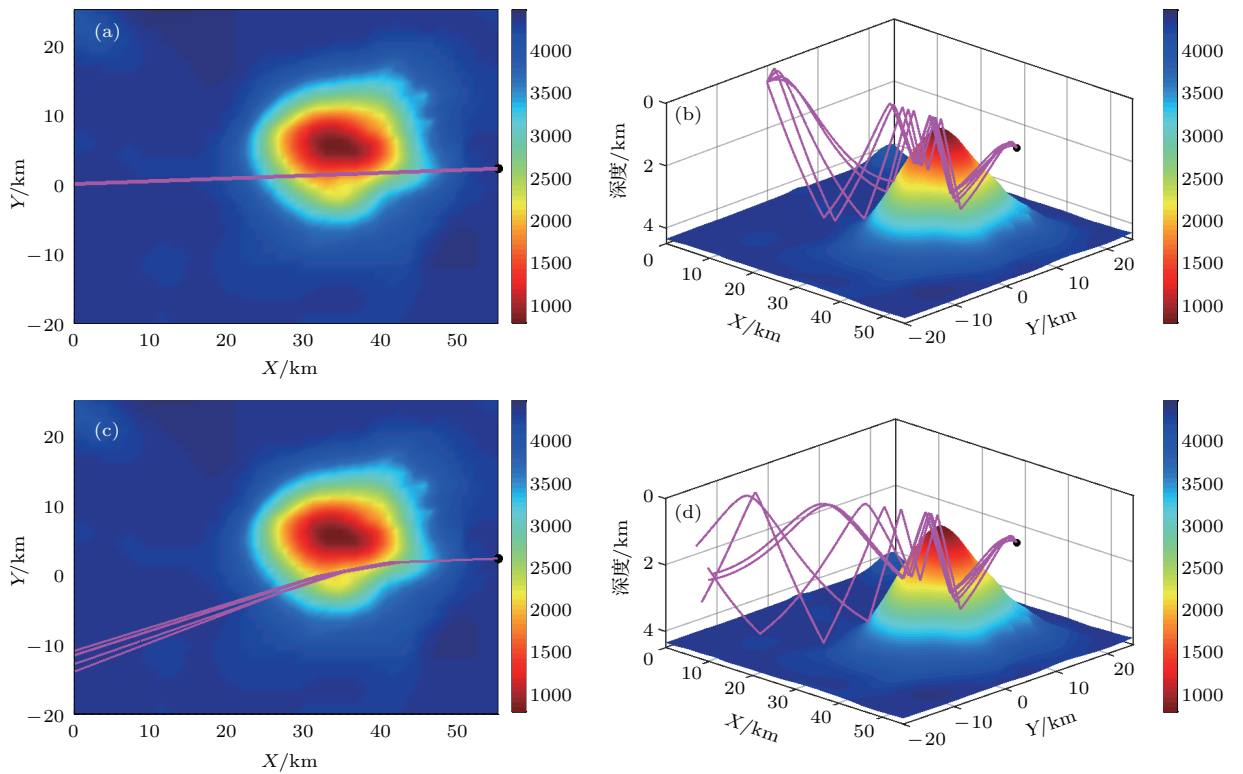


图 13 声源位于 O2T9 方向时的声线仿真结果 (a), (b) BELLHOP  $N \times 2D$  模型本征声线结果; (c), (d) 声波在 3D 模型下的传播路径

Fig. 13. Numerical results of rays when the source located at the propagation track O2T9: (a), (b) Eigenrays calculated by BELLHOP  $N \times 2D$  model; (c), (d) the rays above calculated by 3D model.

计算结果,可以看出在 $N \times 2D$ 模型中依然有声线到达接收位置.而在BELLHOP 3D模型的仿真过程中,由于声波的水平折射效应,并没有声线到达接收位置.因此,可以解释图8及图9(b)中的现象,由于三维声传播效应,由 $N \times 2D$ 模型得到的声影区宽度比实验结果窄,引起在海底山后 $N \times 2D$ 模型计算的声传播损失与实验结果存在明显差异,大小相差约10 dB.图13(c)和图13(d)给出了图13(a)和图13(b)中的本征声线在3D模型下的传播路径,可以看出由于水平折射效应,声波偏离原方向,并向偏离海山轴线的其他方向传播.

## 5 结 论

本文利用2016年中国南海深海海底山环境下的声传播实验数据,证明了海底山引起的三维声传播现象,使用二维射线模型无法解释不同传播路径上的实验结果,因此利用三维射线模型对海底山三维声传播机理进行了解释.深海海底山环境会引起声场水平折射,导致海山后的声影区宽度增加,在海底山后会形成存在明显边界的声影区以及位于高声强区与声影区之间的强声水平折射区.海底山后声源发出的大部分声线由于水平折射无法到达接收位置,从而引起海山后声传播损失比二维模型计算结果增大约10 dB以上.当分析海底山后声传播特性时,应考虑声水平折射效应的影响.所以,海底山环境下的三维声传播规律对声纳的环境应用性改进等具有重要意义.下一步将重点研究海底山引起声场空间相关特性的变化,为声纳在复杂环境的探测方法提供基础理论支撑.

感谢参加2016年海上实验和研制设备的全体人员为本文提供了可靠宝贵的实验数据.

## 参考文献

[1] Weston D E 1961 *Proc. Phys. Soc. London* **78** 46

- [2] Harrison C H 1979 *J. Acoust. Soc. Am.* **65** 56
- [3] Harrison C H 1977 *J. Acoust. Soc. Am.* **62** 1382
- [4] Buckingham M J 1986 *J. Acoust. Soc. Am.* **80** 265
- [5] Munk W H, Zachariassen F 1991 *J. Atmos. Oceanic Technol.* **8** 554
- [6] Chapman N R, Ebbeson G R 1983 *J. Acoust. Soc. Am.* **73** 1979
- [7] Kim H J 2009 *Ph. D. Dissertation* (Boston: Massachusetts Institute of Technology)
- [8] Reilly S M, Potty G R, Goodrich M 2016 *J. Comput. Acoust.* **24** 165007
- [9] Herman M, Emily C, Edgar A J, Robert A S 1984 *J. Acoust. Soc. Am.* **75** 1478
- [10] Megan S B, Benjamin M G, Marcia J I 2015 *J. Comput. Acoust.* **23** 267
- [11] Doolittle R D, Tolstoy A, Buckingham M J 1988 *J. Acoust. Soc. Am.* **83** 2117
- [12] Duda T F, Lin Y T, Newhall A E, Zhang W G, Lynch J F 2010 *OCEANS 2010, MTS/IEEE Seattle—A Global Responsibility: the Global Ocean is an Uncommon Resource Demanding Common Responsibility Seattle USA*, September 20–23, 2010 p1
- [13] Luo W Y, Schmidt H 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 52
- [14] Qin J X, Katsnelson B G, Peng Z H, Li Z L, Zhang R H, Luo W Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 034301 (in Chinese) [秦继兴, Katsnelson Boris, 彭朝晖, 李整林, 张仁和, 骆文于 2016 物理学报 **65** 034301]
- [15] Li W, Li Z L, Zhang R H, Qin J X, Li J, Nan M X 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 064302
- [16] Hu Z G, Li Z L, Zhang R H, Ren Y, Qin J X, He L 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 014303 (in Chinese) [胡治国, 李整林, 张仁和, 任云, 秦继兴, 何利 2016 物理学报 **65** 014303]
- [17] Li Z L, Zhang R H, Yan J, Peng Z H, Li F H 2003 *Acta Acust.* **28** 425 (in Chinese) [李整林, 张仁和, 鄢锦, 彭朝晖, 李风华 2003 声学学报 **28** 425]
- [18] Qin J X, Zhang R H, Luo W Y, Wu L X, Jiang L, Zhang B 2014 *Acta Acust.* **39** 145 (in Chinese) [秦继兴, 张仁和, 骆文于, 吴立新, 江磊, 张波 2014 声学学报 **39** 145]
- [19] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2011 *Computational Ocean Acoustics* (2nd Ed.) (New York: Springer) p3
- [20] Porter M B, Buckner H P 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **82** 1349
- [21] Li Z L, Li F H 2010 *Chin. J. Oceanol. Limnol.* **28** 990

# Horizontal refraction effects of seamounts on sound propagation in deep water<sup>\*</sup>

Li Sheng-Hao<sup>1)2)</sup> Li Zheng-Lin<sup>1)†</sup> Li Wen<sup>1)</sup> Qin Ji-Xing<sup>1)</sup>

1) (State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

( Received 3 August 2018; revised manuscript received 20 September 2018 )

## Abstract

The seamounts usually have important effects on sound propagation in deep water. A sound propagation experiment was conducted in the South China Sea in 2016. One of the experimental goals is to investigate the three-dimensional (3D) effects of seamounts on sound propagation. Phenomena about horizontal refraction of acoustic waves are observed in different propagation tracks which go through the seamount along different directions when the source depth is 200 m. Ray methods (BELLHOP  $N \times 2D$  and 3D models) which can calculate sound field efficiently and show clear physical images, are used to analyze and explain the causes of the phenomena. The experimental and numerical results show that the convergent zone structures are destroyed by the direct blockage of seamount due to the multiple reflection of acoustic waves, which leads to the increase of transmission loss (TL), and horizontal-refraction zone with obvious boundaries appears behind the seamount. Some experiment phenomena cannot be explained by BELLHOP  $N \times 2D$  model in which the horizontal refraction effects are not taken into consideration. The experimental sound field structure behind the seamount is obviously different from  $N \times 2D$  model numerical result, i.e. the width of shadow zone based on the experimental data is wider than that calculated by  $N \times 2D$  model, and the width of strong horizontal-refraction zone from the experiment is narrower than the  $N \times 2D$  model result. Moreover, the TLs calculated by  $N \times 2D$  model is about 10 dB less than the experimental result in horizontal refraction zone. After analyzing the difference between experimental data and  $N \times 2D$  model numerical results by BELLHOP 3D model which contains the azimuth-coupling capability, it can be concluded that sound waves reach the receiver through horizontal refraction after the interaction with seamount when the source is located behind the seamount. The eigenrays obtained from 3D model are less than  $N \times 2D$  model numerical result because some of sound beams cannot reach the receiver as a result of the horizontal refraction effects, which leads to the experimental TLs larger than the numerical results calculated by  $N \times 2D$  model. Therefore, 3D effect of seamount has an obvious influence on sound field within a certain angle range behind the seamount, and the investigation of 3D effects of seamounts is meaningful for the sound propagation and target detection in deep water.

**Keywords:** deep water, seamounts, horizontal refraction, ray model

**PACS:** 43.30.Zk, 43.30.Dr, 43.30.Cq

**DOI:** 10.7498/aps.67.20181480

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11434012, 41561144006, 11874061).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: lzhl@mail.ioa.ac.cn