深海海底斜坡环境对声传播规律的影响

胡治国^{①②}, 李整林^{①③*}, 秦继兴^①, 任云^①, 张仁和^①

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;

③ 中国科学院声学研究所南海研究站, 海口 570105

*联系人, E-mail: lzhl@mail.ioa.ac.cn

收稿日期: 2016-02-03; 接受日期: 2016-05-06; 网络出版日期: 2016-08-09

国家自然科学基金资助项目(编号: 11434012, 41561144006, 11174312, 11404366)

摘要 海底地形变化对声传播具有重要影响. 针对在南海深海区域海底斜坡环境下进行的一次声传播实验中观测到的一些不同于平坦海底的声传播现象, 利用射线声学方法分析并解释了海底地形变化引起声传播差异的原因. 结果表明, 当声源深度位于131 m处时, 在第一影区内, 海底斜坡前较小幅度的海底山丘(凸起高度小于1/10海深), 对第一次与海底作用而入射到该小海底山丘处的小掠射角(绝对值在 10° – 20° 范围内)声波有反射遮挡作用, 导致在其反射区特定传播距离上出现影响深度可达海面以下1300 m的倒三角声影区, 比平坦海底环境下相同影区位置处的传播损失增大约8 dB. 在第一会聚区内, 海底斜坡对声波的反射阻挡作用使得从海面反射及水体向下折射的小掠射角(绝对值小于 10°)声波所形成的会聚区结构消失, 只保留从水体向上折射的会聚结构. 因此, 准确的海底地形对深海声传播预报及目标探测等应用非常重要.

关键词 深海, 海底斜坡, 声传播, 本征声线

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

海深、海底和海水声速剖面等海洋声学环境的复杂性, 对声传播规律的影响很大. 其中, 海深变化作为对声场的主要影响因素之一^[1], 一直是近年来水声学研究的热点问题之一, 人们对此开展了大量的工作^[2–10].

海底斜坡广泛存在于不同海域, 一些学者很早就开始关注海底斜坡对声传播规律的影响. Northrop等人^[11]在美国加利福尼亚海域通过实验调查发现, 与平坦海底相比, 声能量经过大陆斜坡进入到深海声道轴

深度后, 声传播损失(TL)会减小, 后来这种现象被人们称为“斜坡增强效应”. Dosso和Chapman^[12]在加拿大西海岸的大陆坡海域对斜坡增强效应进行了进一步实验验证, 发现声源位于斜坡上方时测量得到的下坡声传播损失比平坦海底最大可减少15 dB. Tappert等人^[13]利用数值仿真模仿在夏威夷Kaneohe湾Oahu岛附近海域, 将声源置于陆架浅海海底, 发现声波可沿着斜坡下传至深海声道轴深度, 并进行远距离传播, 最远可传播到4000 km以上. 这种新发现的斜坡传播现

引用格式: 胡治国, 李整林, 秦继兴, 等. 深海海底斜坡环境对声传播规律的影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 094304
Hu Z G, Li Z L, Qin J X, et al. The effects of the sloping bottom environment on sound propagation in deep water (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 094304, doi: 10.1360/SSPMA2016-00078

象称为“泥流效应”. Qin等人^[14]在南海大陆斜坡海域一次声传播实验中,观测到在声道轴深度附近的声信号能量较其他深度大,经理论分析证实了声能量沿海底斜坡传播最终进入深海声道轴深度进行远距离传播的现象,且声源离大陆架斜坡越近,斜坡对声传播的能量分布影响越显著.关于深海海底山剖面的二维声传播问题也类似于海底斜坡问题.最近, Li等人^[15]对深海海底山二维声传播规律进行了研究,实验与数值结果表明,由于海底山斜坡面的遮挡效应,使得经过海底山后的声传播损失会比平坦海底环境下的会聚区处增大30 dB以上.上述研究多集中在大陆架斜坡海区或深海海底山海域,对深海斜坡及海底地形起伏等环境下声传播研究较少.

利用中国南海海域的一次深海声学实验数据,对海底斜坡及地形起伏环境下的声传播规律进行了研究,观测到深海平坦海底和斜坡海底环境下实验声传播损失有较大差异现象;根据实验测量的海底地形和同步海洋水文参数,利用射线理论计算了有/无海底斜坡条件下的声传播损失,对两个不同传播方向上海底地形引起的声传播损失差异原因进行了仿真分析,并结合本征声线和时间到达结构解释了实验现象.

1 实验描述

2014年6月,声场声信息国家重点实验室在中国南海深海海域进行了一次水声实验.其中声传播实验采用图1所示的单船结合潜标的方式进行. O点是由自容式水听器(USR)组成的26个通道垂直接收线阵(VLA),水听器不等间隔地布放在130–1870 m深度范围内,其

接收灵敏度为−170 dB.科考船“实验1号”以VLA为中心,保持4节航速拖曳发射换能器声源沿图2所示的2个不同海深变化的方向进行声传播测量,其中相对O点东北52°方向的航线上海深变化较小,平均约4300 m;而295°方向的航线上海底不平坦,海深在14–18 km距离处有一个约320 m高的海底山丘,从25 km距离处开始,海深从4300 m逐渐减小到2600 m,在58 km距离处海深最小,海底斜坡平均倾斜角约为3°.拖曳声源深度(131±6) m,发射信号为中心频率310 Hz、带宽100 Hz、时长为20 s的双曲调频信号(HFM).发射信号的周期为发20 s HFM信号后空10 s,然后再发20 s HFM信号后空40 s.发射信号声源级为181 dB.图3给出了实验期间用CTD测量的海水声速剖面.可见,声道轴约在1150 m深度,最小声速为1484 m/s,海面处海水声速1541 m/s大于海底附近的海水声速1532 m/s,为典型的不完全深海声道.

2 实验数据处理及实验现象

设 $s(t)$ 为声源发射信号,垂直接收阵某一深度上水听器接收到的信号可以表示为

$$s_R(t) = \int S(\omega)P(r, z; \omega)\exp(-i\omega t)d\omega, \quad (1)$$

其中, $S(\omega)$ 为 $s(t)$ 的频谱, $P(r, z; \omega)$ 为 $S(\omega)$ 在海洋环境中从声源到接收器的传输函数.对垂直阵接收的声信号进行脉冲压缩可提高信噪比:

$$s_C(t) = \int |S(\omega)|^2 P(r, z; \omega)\exp(-i\omega t)d\omega, \quad (2)$$

然后对 $s_C(t)$ 进行傅里叶变换得到频谱 X_i ,并在三分之

图1 (网络版彩图)海上实验设备布放示意图

Figure 1 (Color online) The configuration of the experiment.

图2 两个不同传播方向上的海深

Figure 2 The bathymetry along the two different propagation tracks.

图3 实验期间用CTD测量的海水声速剖面

Figure 3 Sound speed profile measured by CTD during the experiment.

一倍频程带宽内取平均, 得到信号平均能量为

$$E(f_0) = \frac{2}{F_s^2} \text{mean}(|X_i|^2) (i = nf_1 : nf_2), \quad (3)$$

其中, f_0 为中心频率, F_s 为采样率, nf_1 和 nf_2 分别为频率下限和频率上限对应的频点数. 实验的声传播损失使用下式计算:

$$TL(f_0 | (r, z)) = SL(f_0) - (10 \lg[E(f_0)] - M_v), \quad (4)$$

其中, $SL(f_0)$ 为发射换能器的声源级, M_v 为接收水听器灵敏度.

由(1)–(4)式处理的两个不同方向上实验的二维声传播损失由图4给出. 以接收阵位置作为坐标原点, 个别传播距离上干扰较大而导致信噪比低于6 dB的信号

图4 两个不同方向上二维声传播损失实验结果对比. (a) 平坦海底方向; (b) 斜坡海底方向

Figure 4 Comparison of the experimental TLs along the two different tracks. (a) Flat bottom, (b) sloping bottom.

予以人工剔除. 图4(a)为平坦海底方向实验结果, 图4(b)为斜坡海底方向实验结果. 对比可见, 对于声源位于131 m深度, 平坦海底方向声传播损失呈现典型的深海声传播规律, 传播距离覆盖的第一会聚区内, 随着接收深度增加出现会聚区分裂现象, 即向上折射和经海面反射后向下折射形成的高声强区. 对比图4(a)和图4(b)的声传播损失结果发现有两处差别: (1) 图4(b)中斜坡海底方向在32 km距离附近有一个随着深度增加逐渐变窄的倒三角声影区; (2) 图4(b)中第一会聚区内出现在平坦海底环境下经海面反射及水体中向下折射的高声强部分结构消失了. 图5给出了图4(a)、(b)中接收深度为865 m处的声传播损失对比图, 可定量比较前面提到的两处差别: (1) 斜坡海底方向28–36 km距离处的传播损失明显大于平坦海底方向的结果, 声传播损失增大约8 dB; (2) 在50 km距离处, 斜坡海底的声传播损失随距离变化出现类似平坦海底方向会聚区分裂的峰值结构; 但在60 km距离处, 在斜坡海底方向却没有出现那种在平坦海底环境下的会聚区分裂结构.

3 声场数值分析

为了分析图4和5中不同海底地形环境引起声传

图5 图4中平坦海底和倾斜海底两个声传播方向上接收深度865 m处的声传播损失对比

Figure 5 Comparison of the experimental TLs along the two different tracks at the receiver depth of 865 m.

播损失差异的原因, 对图2所示平坦海底和斜坡海底环境下的声传播损失进行数值计算, 并对其其中的一些现象进行分析. 计算采用以高斯波束追踪法^[16]为基础的射线声学BELLHOP模型, 该模型可以计算水平变化环境中的声线轨迹和声强. 根据射线理论, 若考虑到接收点的各条声线相干叠加, 可得声压:

$$p(r, z) = \sum_{j=1}^N A_j(r, z) V_b^n V_s^m \exp(ik_0 \varphi_j(r, z)), \quad (5)$$

其中 $A_j(r, z)$ 和 $k_0 \varphi_j(r, z)$ 分别是第 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 为声线在海底处反射的次数, m 为声线在海面处反射的次数.

由 $p(r, z)$ 进而得到声强 $I(r, z) = |p(r, z)|^2$. 为了与实验结果保持一致, 用多个频点的声强进行窄带平均:

$$\bar{I}(r, z) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I(f_m; r, z), \quad (6)$$

其中 M 为频点数. 最终给出窄带平均的传播损失:

$$TL(r, z) = -10 \lg \frac{\bar{I}(r, z)}{I(r=1)}, \quad (7)$$

理论计算时选取与实验换能器相同的声源中心频率和带宽, 频点间隔为10 Hz, 频点数 M 为取11. 计算中环境参数声速剖面同图3, 海底取两层液态海底, 其中沉积层厚度为20 m, 声速为1555 m/s, 密度为1.6 g/cm³, 无

限大基底声速1650 m/s, 密度为1.8 g/cm³, 沉积层和基底的衰减系数均为 $0.517 \times (f/1000)^{1.07}$ dB/λ^[17]. 计算中海水吸收系数取^[1]:

$$\alpha \approx 3.3 \times 10^{-3} + \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 3.0 \times 10^{-4}f^2 \text{ (dB/km)}, \quad (8)$$

其中, 频率 f 的单位为kHz.

根据声学互易原理^[1], 计算中将声源分别置于0 km处不同的水听器所在深度, 在原拖曳声源深度(131 m)的不同距离处接收信号, 图6给出倾斜海底方向和平坦海底方向从130–1870 m整个接收深度和整个距离上的二维声传播损失仿真结果. 对比图6和4发现, 仿真结果与实验结果吻合得较好, 从图6(b)可以清晰看到如图4(b)中32 km距离附近的类似的倒三角声影区, 其影响深度可达海面以下1300 m; 52 km距离附近第一会聚区处, 斜坡海底方向只剩下水体中向上折射的高声强区结构. 图7对图6(a)和(b)中接收深度为865 m处的声传播损失曲线进行对比, 也可以看到如图5所示的两处明显差别.

图6 声场模型计算的不同传播方向上的二维声传播损失结果. (a) 平坦海底方向; (b) 斜坡海底方向

Figure 6 Numerical TLs along the two different tracks. (a) Flat bottom; (b) sloping bottom.

图7 理论计算的斜坡海底方向与平坦海底方向上接收深度865 m处的声传播损失对比

Figure 7 Comparison of the numerical TLs along the two different tracks at the receiver depth of 865 m.

4 不同方向声传播损失差异解释与讨论

上述实验和数值计算结果中, 倾斜和平坦海底环境下的声传播损失在特定区域出现了明显的差异. 下面将使用BELLHOP模型对这些差异区域形成的原因作物理解释.

4.1 海底斜坡对会聚区的影响

根据声学互易性原理, 将声源置于865 m深度, 分别画出平坦海底和斜坡海底方向全海深的传播损失图及声线图, 如图8所示. 图中0 km处黑色圆点表示声源, 黑色横虚线表示互易后的接收深度131 m, 黑色竖线分别表示接收距离50 km和60 km处. 从图8(a)和(c)看出, 平坦海底方向分别在距离50 km和60 km的接收深度处形成反转点会聚区^[18], 这两个区域附近的声场

图8 两个不同传播方向上的声传播损失仿真结果与声线图. (a) 平坦海底方向声传播损失; (b) 斜坡海底方向声传播损失; (c) 平坦海底方向声线图; (d) 斜坡海底方向声线图. 声源深度865 m, 图中用黑点表示, 声源频率310 Hz. 接收深度131 m, 图中黑色虚线表示

Figure 8 Numerical TLs and sound rays traces along the two different tracks. (a) TLs along the flat bottom; (b) TLs along the sloping bottom; (c) rays along the flat bottom; (d) rays along the sloping bottom. The source depth is 865 m depicted by the black dot, and the central frequency is 310 Hz. The receiver depth is 131 m depicted by the black dashed line.

强度较高, 即传播损失较小, 这与图5中的平坦海底方向实验结果吻合; 但从图8(b)和(d)看到, 斜坡海底方向只在距离50 km的接收深度处, 形成类似平坦海底方向较高声强的反转点会聚区, 而海底斜坡对图8(d)中红色虚线标注的声线的反射阻挡影响, 使得在距离60 km的接收深度处没有形成反转点会聚区, 该接收区域附近传播损失增大, 这与图5中的斜坡海底方向实验结果吻合.

为了更定量地分析斜坡海底对会聚区声线的具体影响, 使用BELLHOP模型计算图2所示的平坦海底和

斜坡海底方向拖曳声源分别从50和60 km传播到垂直接收阵距离处的本征声线和时间到达结构, 其中接收深度为865 m, 声源深度为131 m, 声源频率为310 Hz. 为了直观地说明海底斜坡环境对不同掠射角声线的影响, 将 0° – 10° , 10° – 20° , 20° – 40° 和大于 40° 掠射角范围的本征声线分别标记为青色、红色、蓝色和绿色, 本文提到的掠射角范围均指其绝对值.

图9(a)和(b)分别给出了声源距离为50 km时, 平坦海底方向和斜坡海底方向的本征声线, 图9(c)和(d)分别给出了对应的时间到达结构. 从图9(a)和(c)看出, 平

图9 (网络版彩图) 声源位于50 km距离处(S点)时, 到达接收点(R点)的本征声线及时间到达结构. 声源深度为131 m. (a) 平坦海底方向本征声线; (b) 斜坡海底方向本征声线; (c) 平坦海底方向时间到达结构; (d) 斜坡海底方向时间到达结构; (e) 平坦海底方向实验测量得到的时间到达结构; (f) 斜坡海底方向实验测量得到的时间到达结构

Figure 9 (Color online) Eigenrays and arrivals from the source denoted by point S at the range of 50 km to the receiver denoted by point R along the two different tracks. The source depth is 131 m. (a) Eigenrays along the flat bottom; (b) eigenrays along the sloping bottom; (c) arrivals along the flat bottom; (d) arrivals along the sloping bottom; (e) experimental arrivals along the flat bottom; (f) experimental arrivals along the sloping bottom.

坦海底方向首先到达接收点附近的是小掠射角声线(青色), 这些声线部分在水体中发生反转而不与海底海面反射, 部分只与海底海面发生一次反射, 能量衰减最少, 对接收点附近声场贡献最大; 较小掠射角声线(红色)以及较大掠射角声线(蓝色), 与海底海面多次反射后, 依次到达接收点, 其声压幅度很快地衰减. 对比平坦海底方向, 从图9(b)和(d)看出, 斜坡海底方向一部分小掠射角声线(青色)能掠过斜坡上方在水体中发生反转而最先到达接收点附近, 另一部分小掠射角声线(青色)与斜坡海底发生一次反射后在海面附近反转, 然后到达接收点附近, 这些声线对接收点处的声场能量贡献最大; 而较小掠射角声线(红色)以及较大掠射角声线(蓝色), 均与斜坡海底反射, 传播路径发生改变, 其到达接收点的时间和幅度也会有同平坦海底方向细微的差别. 图9(e)和(f)分别为平坦海底方向和斜坡海底方向, 实验中测量得到的信号时间到达结构, 其中幅度进行了同一归一化. 可以看出, 图9(c)和(d)理论

仿真时间到达结构与实验结果非常吻合. 因此, 图5中在50 km距离处、接收深度865 m附近, 斜坡海底方向形成了类似平坦海底方向的声传播损失曲线第一个峰值, 即在图4中由水体中向上折射的会聚区结构.

图10(a)和(b)分别给出了声源距离位于60 km时, 平坦海底方向和斜坡海底方向的本征声线, 图10(c)和(d)分别给出了对应的时间到达结构. 从图10(a)和(c)看出, 平坦海底方向由水体折射反转而不与海底海面反射的小掠射角声线(青色)最先到达接收点, 其声压幅度最大, 对声场的贡献也最大; 较小掠射角声线(红色)以及较大掠射角声线(蓝色), 与海底海面多次反射后, 能到达接收点的声线数量和声压幅度迅速衰减. 对比平坦海底方向, 从图10(b)和(d)看出, 倾斜海底方向斜坡对声线的反射阻挡作用, 使得小掠射角声线(青色)不再能够由水体折射反转到达接收点附近; 而较小掠射角声线(红色)和较大掠射角声线(蓝色)由于斜坡的反射, 传播的掠射角逐渐变小, 与海底海面的反射次数

图 10 (网络版彩图) 声源位于60 km距离处(S点)时, 到达接收点(R点)的本征声线及时间到达结构. 声源深度为131 m. (a) 平坦海底方向本征声线; (b) 斜坡海底方向本征声线; (c) 平坦海底方向时间到达结构; (d) 斜坡海底方向时间到达结构

Figure 10 (Color online) Eigenrays and arrivals from the source denoted by point S at the range of 60 km to the receiver denoted by point R along the two different tracks. The source depth is 131 m. (a) Eigenrays along the flat bottom; (b) eigenrays along the sloping bottom; (c) arrivals along the flat bottom; (d) arrivals along the sloping bottom.

也相应地减少, 其到达接收点的时间有所提前, 而且到达接收点附近的声线数量和声压幅度比平坦海底方向也有所增加, 对声场的能量贡献起主要作用. 因此, 图5中在60 km距离处、接收深度865 m附近, 斜坡海底方向没有形成类似平坦海底方向的声传播损失曲线第二个峰值, 即在图4中由海面反射及水体向下折射的会聚区结构.

4.2 小海底山丘反射阻挡引起的倒三角影区

使用BELLHOP模型计算图2所示的平坦海底和斜坡海底方向拖曳声源从32 km传播到垂直接收阵距离处的本征声线和时间到达结构, 其中接收深度为865 m, 声源深度为131 m, 声源频率为310 Hz. 同样为了直观地说明不平海底环境对不同掠射角声线的影响, 将 0° – 10° , 10° – 20° , 20° – 40° 和大于 40° 掠射角范围的本征声线分别标记为青色、红色、蓝色和绿色.

图11(a)和(b)分别给出了声源距离为32 km时, 平

坦海底方向和斜坡海底方向本征声线, 图11(c)和(d)分别给出了对应的时间到达结构. 从图11(a)和(c)看出, 平坦海底方向红色较小掠射角声线只与海底发生一次反射, 首先到达接收点, 声压幅度最大, 即对接收点附近的声场贡献最大; 较大掠射角声线(蓝色)与海底海面发生多次反射, 到达时间较晚, 在第一影区因多途产生的时间展宽较大, 声压幅度较小. 对比平坦海底方向, 从图11(b)和(d)看出, 斜坡海底方向小海底山丘的阻挡作用使得较小掠射角声线(红色)与海底海面多次反射, 其能到达接收点附近的声线数量和声压幅度也均大幅减少, 到达时间反而比大掠射角声线晚; 而部分更大掠射角声线(绿色)由于在28 km附近海底斜坡的第一次反射后掠射角减小, 与海底海面反射次数减少, 提前到达接收点附近, 对该处声场的贡献增大, 类似于图11(d)中的较大掠射角声线(蓝色), 在第一影区因多途产生的时间展宽反而较小. 可见, 图5中斜坡海底方向32 km距离处、接收深度865 m附近的传播损失

图11 (网络版彩图) 声源位于32 km距离处(S点)时, 到达接收点(R点)的本征声线及时间到达结构. 声源深度为131 m. (a) 平坦海底方向本征声线; (b) 斜坡海底方向本征声线; (c) 平坦海底方向时间到达结构; (d) 斜坡海底方向时间到达结构

Figure 11 (Color online) Eigenrays and arrivals from the source denoted by point S at the range of 32 km to the receiver denoted by point R along the two different tracks. The source depth is 131 m. (a) Eigenrays along the flat bottom; (b) eigenrays along the sloping bottom; (c) arrivals along the flat bottom; (d) arrivals along the sloping bottom.

增大主要为海底斜坡前的小海底山丘对 10° – 20° 范围内的小掠射角声线的反射阻挡引起.

5 结论

利用2014年中国南海深海平坦海底和斜坡海底环境下的声传播数据, 研究了深海海底斜坡环境下的声传播规律. 对有/无斜坡环境下的声传播损失进行了对比分析, 结果表明, 对于声源深度在131 m处, 深海海底地形对声传播有很显著的影响. 主要结论有以下两点:

(1) 在声影区范围内, 当声波第一次入射到海底位置有较小幅度的海底山丘(凸起高度小于 $1/10$ 海深)时, 小海底山丘对 10° – 20° 范围内的小掠射角声线有反射阻挡作用, 导致其反射区特定传播距离和深度上出现倒三角声影区; 而海底平坦情况下, 部分小掠射角声线能够经一次海底反射到达对应反射位置的声影区, 且对该区域的声场能量贡献最大. 与平坦海底环境下相同影区位置处的传播损失相比, 斜坡环境下的倒三

角影区处声传播损失增大约8 dB, 影响深度可达海面以下1300 m.

(2) 在第一会聚区范围附近, 声源发射出 10° 以内小掠射角声线能够掠过特定距离下的深海海底斜坡上方, 或部分经斜坡海底一次反射后在海面以下发生反转, 使得在相应距离处形成类似平坦海底方向由水体向上折射的会聚结构; 但当声源距离进一步增大时, 10° 以内的小掠射角声线受到海底斜坡的反射阻挡不再能够掠过斜坡上方, 而是经斜坡海底和海面多次反射后到达接收点, 能量迅速衰减, 不再对接收点附近的声场能量起主要贡献, 使得在平坦海底方向出现的从海面反射及水体中向下折射的那部分高声强区结构在斜坡海底方向消失.

总之, 由于深海环境声波与海底作用次数有限, 当声波第一次入射到海底位置的海底地形变化会对深海声传播影响较大, 可引起特定深度和距离上声传播损失增大或减小, 在声纳探测应用及效能评估中应予以重视.

致谢 感谢参加2014年南海综合调查实验的全体工作人员, 他们的辛勤工作为本文提供了可靠宝贵的实验数据.

参考文献

- 1 Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. Computational Ocean Acoustics. 2nd ed. New York: Springer, 2011
- 2 Collis J M, Siegmann W L, Jensen F B, et al. Parabolic equation solution of seismo-acoustics problems involving variations in bathymetry and sediment thickness. *J Acoust Soc Am*, 2008, 123: 51–55
- 3 Evans R B. A coupled mode solution for acoustic propagation in a waveguide with stepwise depth variations of a penetrable bottom. *J Acoust Soc Am*, 1983, 74: 188–195
- 4 Collins M D. A split-step Padé solution for the parabolic equation method. *J Acoust Soc Am*, 1993, 93: 1736–1742
- 5 Zhang R H, Liu H, He Y, et al. WKBZ adiabatic mode approach to sound propagation in gradually range-dependent channels (in Chinese). *Acta Acust*, 1994, 19: 408–417 [张仁和, 刘红, 何怡, 等. 水平缓变声道中的WKBZ绝热简正波理论. *声学学报*, 1994, 19: 408–417]
- 6 Porter M B, Buckner H P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. *J Acoust Soc Am*, 1987, 82: 1349–1359
- 7 Piao S C. Researches On Improvement of Bottom Boundary Condition Expressions in Parabolic Approximation Method (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin Engineering University, 1999 [朴胜春. 抛物方程方法中海底边界条件处理的改进研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1999]
- 8 Peng Z H, Zhang R H. On study of the theory and algorithm of the three dimensional coupled mode-parabolic equation (in Chinese). *Acta Acoust*, 2005, 30: 97–102 [彭朝晖, 张仁和. 三维耦合简正波-抛物方程理论及算法研究. *声学学报*, 2005, 30: 97–102]
- 9 Li Z L, Zhang R H, Yan J, et al. Broadband matched-field source localization in the continental slope environment (in Chinese). *Acta Acoust*, 2003, 28: 425–428 [李整林, 张仁和, 鄢锦, 等. 大陆斜坡海域宽带声源的匹配场定位. *声学学报*, 2003, 28: 425–428]
- 10 Zhang Z M, Li Z L, Dai Q X. The effects of sloping bottom on sound propagation (in Chinese). *Tech Acoust*, 2007, 26: 998–999 [张镇迈, 李整林, 戴琼兴. 海底倾斜度对声传播的影响. *声学技术*, 2007, 26: 998–999]
- 11 Northrop J, Loughbrid M S, Werner E W. Effects of near-source bottom conditions on long range sound propagation in the deep ocean. *J Geophys Res*, 1968, 73: 3905–3908
- 12 Dosso S E, Chapman N R. Measurement and modeling of downslope acoustic propagation loss over a continental slope. *J Acoust Soc Am*, 1987,

81: 258–268

- 13 Tappert F D, Spiesberger J L, Wolfson M A. Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source. *J Acoust Soc Am*, 2002, 111: 757–762
- 14 Qin J X, Zhang R H, Luo W Y, et al. Sound propagation from the shelfbreak to deep water? *Sci China-Phys Mech Astron*, 2014, 57: 1031–1037
- 15 Li W, Li Z L, Zhang R H, et al. The effects of seamounts on sound propagation in deep water. *Chin Phys Lett*, 2015, 32: 064302
- 16 Porter M B. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. *J Acoust Soc Am*, 1987, 82: 1349–1359
- 17 Li Z, Li F. Geoacoustic inversion for sediments in the South China Sea based on a hybrid inversion scheme. *Chin J Ocean Limnol*, 2010, 28: 990–995
- 18 Zhang R H. An asymptotic theory of the sound fields near the turning points (in Chinese). *Acta Acoust*, 1988, 13: 100–110 [张仁和. 反转点附近声场的渐近理论. *声学学报*, 1988, 13: 100–110]

The effects of the sloping bottom environment on sound propagation in deep water

HU ZhiGuo^{1,3}, LI ZhengLin^{1,2*}, QIN JiXing¹, REN Yun¹ & ZHANG RenHe¹

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;

³ Haikou Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Haikou 570105, China

Variation of bathymetry has large effects on sound propagation. An acoustic propagation experiment was conducted in the South China Sea. Some different propagation phenomena are observed for two different tracks with the flat bottom and the sloping bottom environments when the source depth is 131 m. Numerical analysis based on the ray methods is carried out to explain the causes of the differences. The experimental and numerical results show that when a sea hill with height of 320 m, which is less than 1/10 of water depth, exists at the range of sound beams with the grazing angles from 10° to 20° incident on bottom first time, an inverted-triangle shadow zone appears at the reflection-blockage area of the sea hill. Compared with the TLs results in the flat bottom environment, TLs increase up to about 8 dB in the corresponding area of the first shadow zone, and the abnormal TLs effects can reach to maximal depth of 1300 m. The first convergence zone caused by refractions of sound beams with small grazing angles within 10° from the water above the axis of sound channel is lost. There are only the sound beams refracted back from water below the axis of sound channel. It's quite different from the convergence-zone structure in deep water with flat bottom. Thus, the accuracy of bathymetry is meaningful for sound propagation and target detection in deep water.

deep water, sloping bottom, sound propagation, eigenrays

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

doi: [10.1360/SSPMA2016-00078](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00078)