

深海海底斜坡环境下的声传播

胡治国 李整林 张仁和 任云 秦继兴 何利

Sound propagation in deep water with a sloping bottom

Hu Zhi-Guo Li Zheng-Lin Zhang Ren-He Ren Yun Qin Ji-Xing He Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 014303 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.014303

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014303>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三维绝热简正波抛物方程理论及应用

Three-dimensional adiabatic mode parabolic equation method and its applications

物理学报.2016, 65(3): 034301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.034301>

一种基于简正波模态频散的远距离宽带海底参数反演方法

A far distance wideband geoacoustic parameter inversion method based on a modal dispersion curve

物理学报.2015, 64(17): 174302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174302>

浅海内波影响下的波导不变量变化特性分析

Time-varying characteristics of the waveguide invariant under internal wave condition in the shallow water area

物理学报.2014, 63(19): 194303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194303>

含气泡液体中的非线性声传播

Propagation of nonlinear waves in the bubbly liquids

物理学报.2014, 63(3): 034301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034301>

印度洋中北部声速剖面结构的时空变化及其物理机理研究

Research on the temporal-spatial distributions and the physical mechanisms for the sound speed profiles in north-central Indian Ocean

物理学报.2012, 61(8): 084301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.084301>

深海海底斜坡环境下的声传播*

胡治国¹⁾³⁾ 李整林^{1)2)†} 张仁和¹⁾ 任云¹⁾ 秦继兴¹⁾ 何利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)(中国科学院声学研究所南海研究站, 海口 570105)

3)(中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100190)

(2015年6月9日收到; 2015年8月18日收到修改稿)

海底地形变化对声传播具有很大影响, 在南海深海区域海底斜坡环境下进行了一次声传播实验, 实验显示倾斜海底环境下声传播损失出现了一些不同于平坦海底环境下的现象, 分析并解释了海底地形变化对产生声传播差异的原因. 结果表明, 海底斜坡对声波的反射增强作用可使斜坡上方的声传播损失减少约 5 dB. 当声波第一次入射到达的海底位置有较小幅度的山丘(凸起高度小于 1/10 海深)时, 海底小山丘即可对声波有反射遮挡作用, 导致在其反射区特定传播距离和深度上出现倒三角声影区, 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, 影响深度可达海面以下 1500 m. 而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会聚区结构消失, 只剩下从水体向上折射的会聚结构. 因此, 海底地形对深海声传播影响较大, 在水下目标探测和性能评估等应用中应予以重视.

关键词: 深海, 海底斜坡, 声传播, 会聚区

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

DOI: 10.7498/aps.65.014303

1 引言

海深、海底和海水声速剖面等海洋声学环境的复杂性, 对声传播影响很大. 其中, 海深变化是影响声场的主要因素之一^[1], 同时也是近年来水声研究的热点问题之一, 人们对此开展了大量的工作^[2-11].

深海平坦海底环境下声场会聚区和影区现象是典型的声场干涉效应. 文献^[4, 5]解释了会聚区声场主要由波导简正波决定, 而影区声场主要由海底反射简正波决定. Li等^[6]用波导不变性进一步解释了深海中的干涉现象. 广泛存在于不同海域的海底斜坡与海水声速结构的联合作用会产生不同于一般平坦深海声场干涉效应. 因此, 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^[12]在美国加利福尼亚海域实验发现,

与平坦海底相比, 声能量经过大陆斜坡多次反射进入到深海声道轴深度后, 声传播损失 (transmission loss, TL) 会减小, 后来人们把这种现象称为“斜坡增强效应”. Dosso和Chapman^[13]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 TL 比平坦海底最大可减少 15 dB. Tappert等^[14]对夏威夷 Kaneohe 湾 Oahu 岛附近海域的声传播进行了研究, 数值仿真中将声源固定在陆架浅海海底, 发现声波可沿着斜坡多次反射下传至深海声道轴深度后脱离斜坡, 继续在深海声道轴附近进行远距离传播, 最远可传播到 4000 km 以上, 作者将这种斜坡传播现象形象地称为“泥流效应”, 并解释了该效应的形成机理和产生的稳健性. Duda等^[15]在美国纽约州东南海域的大陆坡和 Hudson 海底峡谷区域进行了三维声传播数值分析, 结果表明海底峡谷和斜坡区域声传播规律在时间上变化不大, 在空

* 国家自然科学基金(批准号: 11434012, 41561144006, 11174312, 11404366)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lzhl@mail.ioa.ac.cn

间上海海底峡谷引起声场水平折射, 具有声会聚作用. Qin 等^[16]针对在南海大陆坡外海进行的一次实验中观测到的接收信号能量在声道轴深度附近较为集中的现象, 研究了声波从过渡海域向深海的传播规律, 着重分析了不同声源位置下斜坡的反射对声能量垂直分布的影响. 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. 国外学者很早就开展了海底山环境下的声传播实验^[17-20], 结果表明由于海底山斜坡面的反射遮挡效应, 经过海山时的 TL 比平坦海底环境下增大了 20—30 dB. 最近, 国内 Li 等^[21]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反射增强效应, 在靠近海底山之前的 TL 减小近 7 dB; 而经过海底山后的 TL, 由于海底山斜坡面的遮挡效应, 会比平坦海底环境下的会聚区处增大 30 dB 以上. 总之, 上述研究多集中在大陆架斜坡海区和深海海底山海域, 目前对深海斜坡及海底地形起伏等环境下的声传播研究较少.

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, 实验中观测到了深海斜坡海底和平坦海底环境下 TL 有较大差异, 会产生海底反射增强效应; 根据实验测量的海底地形和同步海洋水文参数, 理论计算了有/无海底斜坡条件下的 TL, 对两个不同传播方向上海底地形引起的 TL 差异原因进行了分析, 很好地解释了实验现象.

2 实验现象

2014年6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综合性深海海上实验. 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组成的 26 个通道垂直接收阵, 水听器分布在 130—1870 m 深度范围内, 不等间隔布放, 接收水听器的灵敏度为 -170 dB. 中国科学院声学研究所的实验 1 号科考船以 4 节航速拖曳发射换能器声源沿图 2 所示的两个不同海深变化的方向进行声传播测量, 其中平坦海底方向总长度为 172 km, 其海深变化较小, 维持在 4300 m 左右; 沿着斜坡海底方向声传播测量最远到 64 km, 其海深在 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°. 拖曳声源深度约 131 m ± 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 (hyperbolic frequency modulated, HFM) 信号. 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 给出了实验期间用温盐深仪 (conductivity, temperature and depth, CTD) 和抛弃式温深计 (XBT) 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 1533 m/s, 为典型的不完全深海声道.

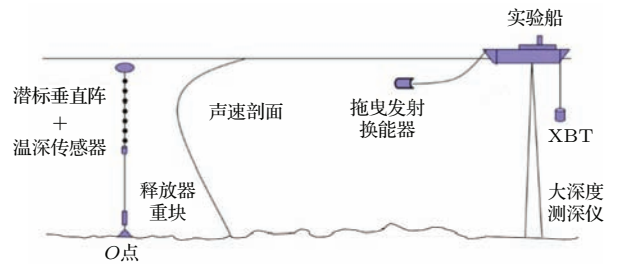


图 1 海上实验设备布放示意图

Fig. 1. The configuration of the experiment.

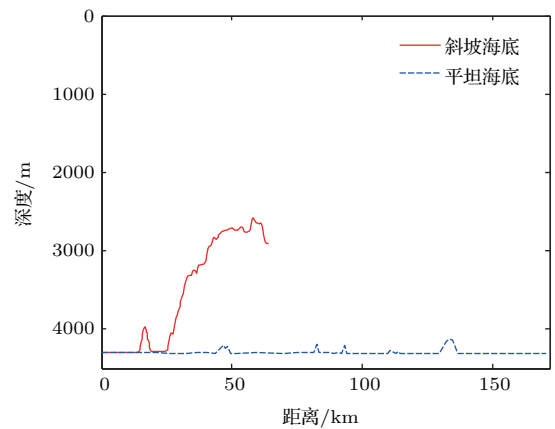


图 2 两个不同传播方向上的海深

Fig. 2. The bathymetry along the two different propagation tracks.

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

$$E(f_0) = \frac{2}{F_s^2} \frac{1}{nf_2 - nf_1 + 1} \sum_{i=nf_1}^{nf_2} |X_i|^2, \quad (3)$$

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 TL 使用下式计算:

$$\begin{aligned} TL(f_0|(r, z)) \\ = SL(f_0) - (10\lg E(f_0) - M_v), \end{aligned} \quad (4)$$

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.

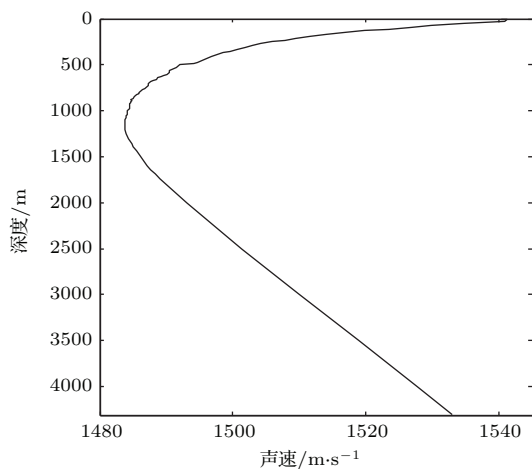


图3 实验期间用CTD测量的海水声速剖面

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

由(1)—(4)式处理的两个不同方向的二维 TL 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不高的信号予以人工剔除. 图4(a)为平坦海底方向(172 km 范围内)的实验结果, 图4(b)只显示了图4(a)中64 km 范围内的实验结果, 以便于与图4(c)斜坡海底方向同样距离区间的实验结果进行比较. 从图4(a)可见: 平坦海底方向 TL 呈现典型的深海声传播规律, 传播距离覆盖了3个会聚区; 在每个会聚区内, 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. 把斜坡海底方向的声传播损失与平坦海底方向64 km 范围内的结果对比, 发现有3处差别: 1) 图4(c)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) 在43 km 距离附近的海表面深

度处出现海底反射声增强区; 3) 第一会聚区内经海面反射在水体中向下折射部分高声强区消失了. 图5给出了图4(b)和图4(c)中3个不同接收深度144, 865和1677 m 时的 TL 对比图, 可定量比较前

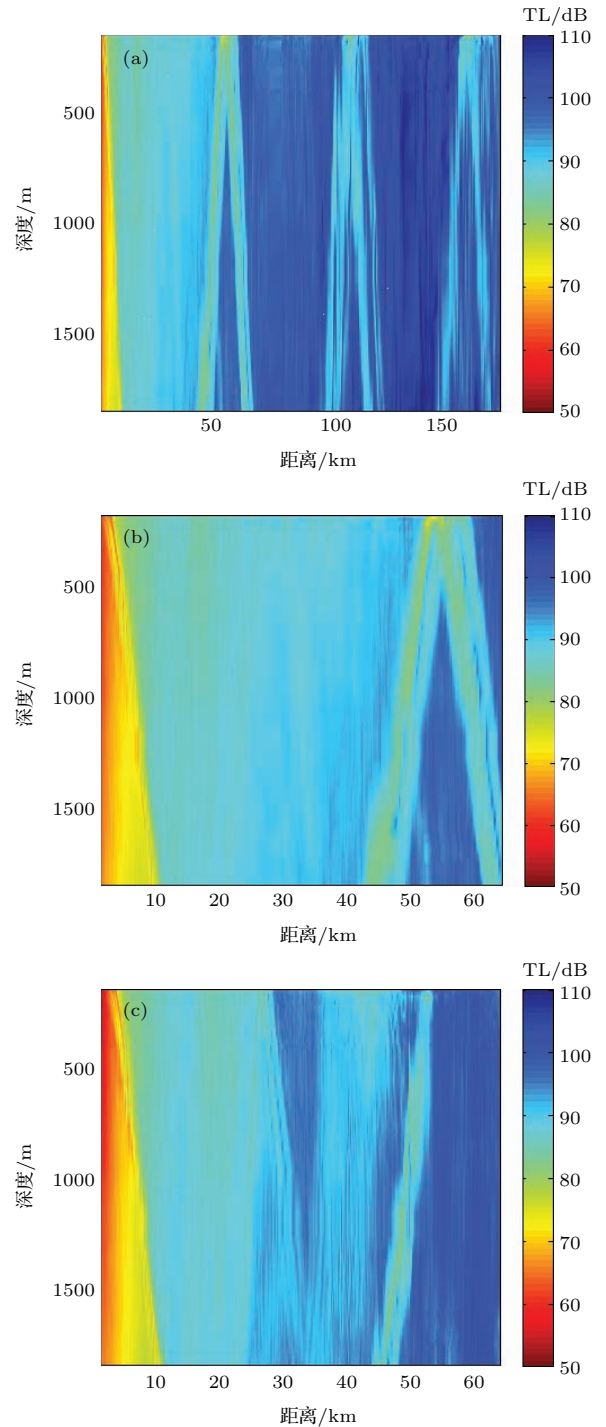


图4 两个不同方向上二维 TL 实验结果对比 (a) 平坦海底方向 (172 km); (b) 平坦海底方向 (64 km); (c) 倾斜海底方向

Fig. 4. Comparison of the experimental TLs along the two different tracks: (a) Flat bottom (172 km); (b) flat bottom (64 km); (c) sloping bottom.

面提到的3处差别: 1) 斜坡海底方向28—36 km距离处的TL明显低于平坦海底方向的结果, 当接收深度为144 m时TL增大8 dB, 随着接收深度增加, 32 km距离附近, 斜坡海底方向的TL凹陷的宽度逐渐变窄, 到1677 m时完全消失; 2) 斜坡海底方向41—45 km距离处的TL比平坦海底方向减少约5 dB, 随着深度增加差别变小, 在865 m深度上两者几乎接近; 3) 在52 km距离处, 斜坡海底的TL出现类似平坦海底方向的第一会聚区, 但在平坦海底环境下出现的会聚区双峰结构, 在斜坡海底方向却没有出现。

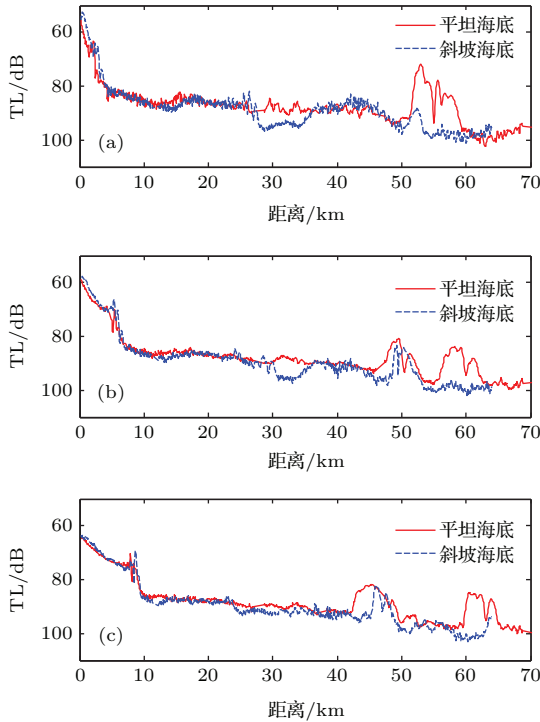


图5 图4中平坦海底和倾斜海底两个声传播方向上3个不同接收深度上的TL对比, 其中接收深度分别为(a) 144 m, (b) 865 m, (c) 1677 m

Fig. 5. Comparison of the TLs along the two different tracks for three different receiver depths: (a) 144 m; (b) 865 m; (c) 1677 m.

3 声场数值分析

为了分析图4和图5中不同海底地形环境下TL的差异, 对图2所示平坦海底和斜坡海底环境下的TL进行理论计算, 并对其中的一些现象进行分析. 数值计算使用适用于水平变化环境的抛物方程近似声场模型RAM-PE^[22,23]. 根据RAM-PE模型, 声压 p 的分裂步Padé近似解形式如下:

$$p(r + \Delta r, z)$$

$$= \exp(ik_0 \Delta r) \prod_{j=1}^n \frac{1 + \alpha_{j,m} X}{1 + \beta_{j,m} X} p(r, z), \quad (5)$$

其中 $k_0 = \omega/c_0$, c_0 为参考声速, $\alpha_{j,m}$ 和 $\beta_{j,m}$ 为复系数. 深度算子 X 满足:

$$X = k_0^{-2} \left[\rho \frac{\partial p}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + k^2 - k_0^2 \right], \quad (6)$$

对深度算子 X 使用Galerkin有限差分法求解, 最终转化为求解系数矩阵为三对角的线性方程组问题. RAM-PE采用自起始场:

$$p(r_0, z) = \frac{\exp[ik_0 r_0 (1 + X)^{\frac{1}{2}}]}{k_0^{\frac{1}{2}} (1 + X)^{\frac{1}{4}}} \delta(z - z_0). \quad (7)$$

由(5)—(7)式可求得不同距离和深度下的声压 $p(r, z)$, 进而得到声强 $I(r, z) = p^2(r, z)/Z_w$, 其中 Z_w 为声场点的声阻抗. 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:

$$\bar{I}(r, z) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I(f_m; r, z), \quad (8)$$

其中 M 为频点数. 最终给出窄带平均的传播损失:

$$TL(r, z) = -10 \lg \frac{\bar{I}(r, z)}{I(r=1)}. \quad (9)$$

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 取为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, 无限大基底声速为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^[24]. 计算中海水吸收系数取^[1]:

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

其中频率 f 的单位为kHz.

根据声学互易原理^[1], 仿真中将声源置于0 km处不同的水听器所在深度, 在原拖曳声源深度的不同距离处接收信号, 图6(a)和图6(c)分别给出了平坦海底方向和倾斜海底方向从130—1870 m整个接收深度和整个测线距离的二维声传播损失仿真结果. 图6(b)只显示了图6(a)中64 km范围内的仿真结果, 以便于与图6(c)同样的距离区间进行比较. 对比图6和图4发现, 仿真结果与实验结果符合得比较好. 从图6(c)可以更清晰地看到如

图4(c)中32 km距离附近的类似的倒三角声影区、43 km距离附近海表面处的海底反射声增强区和52 km距离附近只剩下向上折射的高声强区。

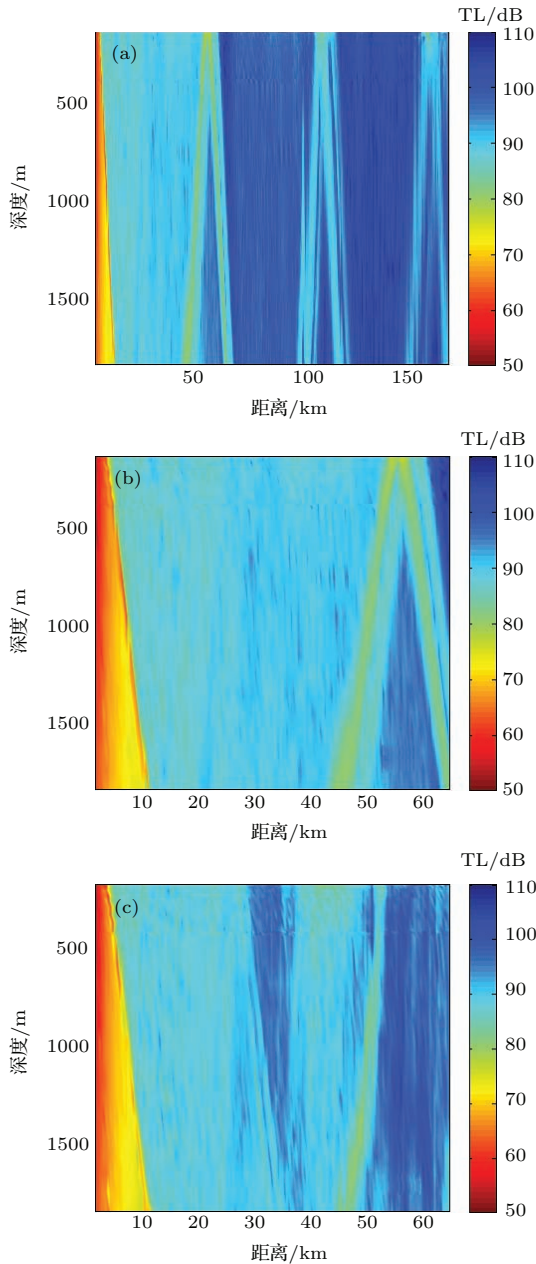


图6 声场模型计算的不同传播方向上的二维TL结果 (a) 平坦海底方向 (172 km); (b) 平坦海底方向 (64 km); (c) 倾斜海底方向

Fig. 6. Numerical TLs along the two different tracks: (a) Flat bottom (172 km); (b) flat bottom (64 km); (c) sloping bottom.

图7给出了平坦海底方向不同接收深度144, 865和1677 m处实验TL和模型计算TL结果的对比, 可以看出典型的深海三个会聚区结构, 在每个会聚区内, 随着接收深度增加, 会聚区出现分裂形成双峰结构, 数值结果与实验结果非常符合。

图8给出了倾斜海底方向不同接收深度144, 865和1677 m处的传播损失的实验结果和仿真结果的对

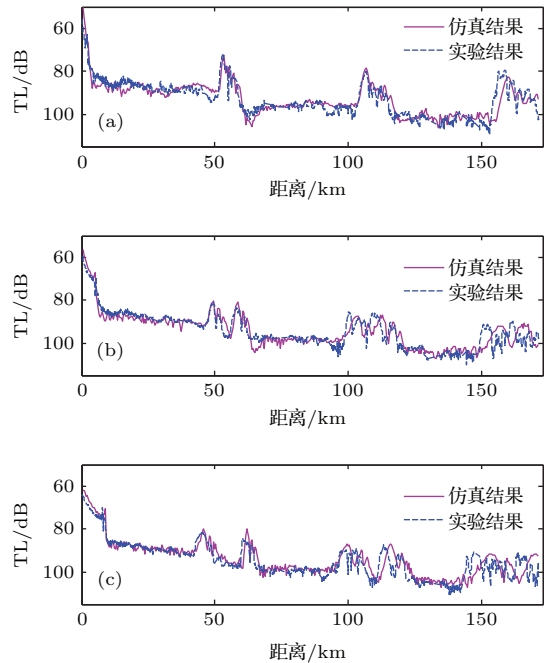


图7 沿平坦海底方向3个不同深度上实验与模型计算的TL对比, 其中接收深度分别为(a) 144 m; (b) 865 m; (c) 1677 m
Fig. 7. Comparison of the experimental and the numerical TLs along the flat bottom track at the three different receiver depths: (a) 144 m; (b) 865 m; (c) 1677 m.

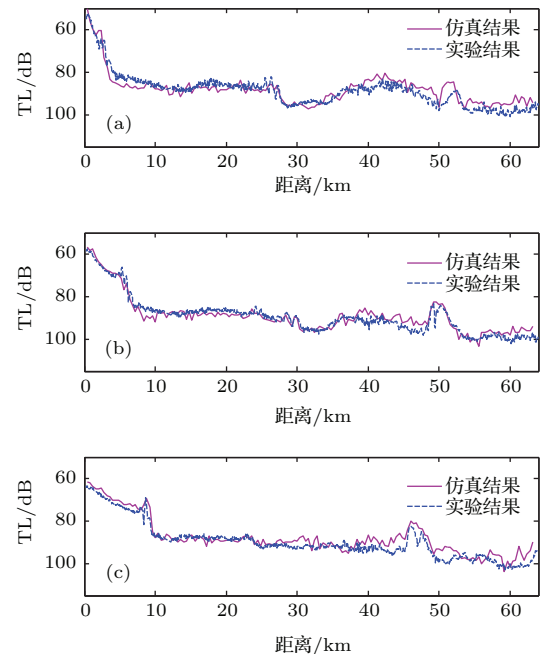


图8 斜坡海底方向3个不同深度上实验与模型计算的TL对比, 其中接收深度分别为(a) 144 m; (b) 865 m; (c) 1677 m
Fig. 8. Comparison of the experimental and the numerical TLs along the sloping bottom track at the three different receiver depths: (a) 144 m; (b) 865 m; (c) 1677 m.

比, 可见在 32 km 距离附近有一个随着深度增加范围逐渐变窄的 TL 增大区, 到 1677 m 深度处 TL 增大区完全消失; 在 43 km 距离附近有一个随着深度增加逐渐变弱的 TL 减小区; 在 52 km 距离附近有一个随着深度增加逐渐向左偏移的单峰结构. 数值结果与实验结果也比较符合, 部分距离上存在一定偏差, 估计是计算中用到的海底地形和海底声学参数等与真实的海洋环境存在一定的差别, 另外, 受海流影响拖曳声源的发射深度及潜标垂直接收阵接收水听器的实际深度也会有一定的起伏. 图 9 给出了图 6(b) 和图 6(c) 中不同传播方向上 3 处不同深度 144, 865 和 1677 m 上的 TL 模型计算结果. 对比图 5 中的实验结果可见, 基本能反映出由于海底斜坡引起的 TL 变化幅度和距离区间.

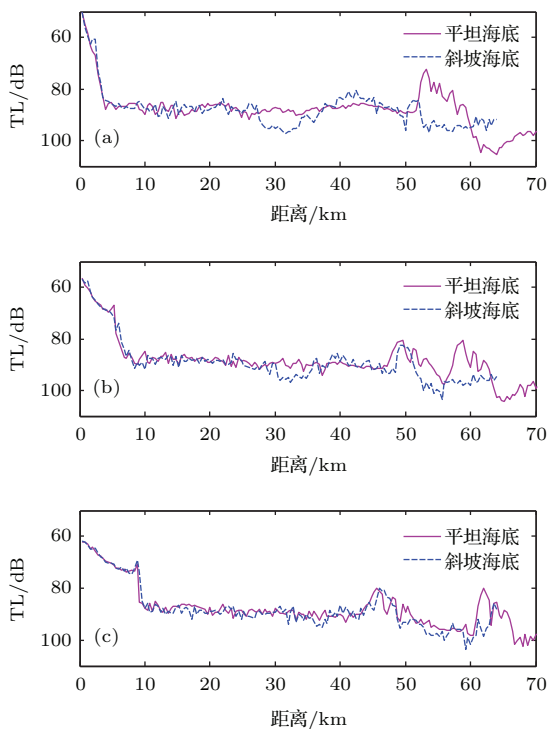


图 9 理论计算的斜坡海底方向与平坦海底方向上 3 个不同接收深度的 TL 对比, 其中接收深度分别为 (a) 144 m, (b) 865 m, (c) 1677 m

Fig. 9. Comparison of the numerical TLs along two different propagation tracks at three different receiver depths: (a) 144 m; (b) 865 m; (c) 1677 m.

4 不同传播方向 TL 差异的解释

上述实验和模型计算结果中, 平坦海底和斜坡环境中的传播损失在特定的距离和深度上存在明显差异. 为了解释这些差异, 根据图 5(a) 选取 4

个典型距离 32, 43, 50 和 60 km, 模拟深海斜坡方向从拖曳声源传播到接收阵位置处的全海深二维 TL, 结果如图 10 所示, 其中声源深度设为 137 m. 由图 10(a) 可见, 当声源位于 32 km 时, 一部分声线受 14—18 km 距离处的海底小山丘反射遮挡影响, 传播方向发生改变, 使得接收阵位置从海表面到 1500 m 深度上接收到的声波能量较小, 形成了图 4(c) 实验结果中 32 km 距离附近 130—1500 m 深度的倒三角声影区. 可见, 在深海环境中由于垂直方向的尺度较大, 在声波入射到海底的距离上, 海深的微小变化会引起反射区位置上呈现出明显的传播异常. 所以, 深海要注意这种因“小”环境变化引起的长距离/大深度声传播效应的放大现象. 当声源距离为 43 km 时, 由海底反射来的声能量再经海面反射, 在海面附近较高的声强区 (图 10(b)), 对应于图 4(c) 中 43 km 附近较浅深度处的高声强区. 当收发距离为 50 km 时 (图 10(c)), 大掠射角声线受到海底斜坡遮挡影响提前与海底作用反射, 部分小掠射角声线不受海底斜坡影响, 能在水中折射反转到达 0 km 处垂直阵接收深度范围 (130—1870 m), 形成图 4(c) 中 52 km 距离附近从水体向上折射的声会聚区结构. 但当声源距离进一步增大, 比如到 60 km 时 (图 10(d)), 由于海底斜坡的阻挡效应, 发射声线会提前入射到 3000 m 以内浅的斜坡海底, 经反射回到水体中进行折射传播, 在大尺度的深海环境传播过程中, 斜坡的反射阻挡效应会被放大增强, 使得接收阵处整个接收阵所在的深度范围内传播损失较大, 所以实验中没有出现在平坦海底中从海面反射及水体向下折射的会聚区结构.

为了进一步验证 14—18 km 距离处的海底山丘对声传播的影响而导致的图 10(a) 中 0 km 处海表面到 1500 m 深度的声影区, 对有/无海底小山丘环境下的 TL 计算, 结果如图 11 所示, 计算中根据互易性原理假设声源位于实验中接收器 144 m 深度处. 对比图 11(a) 和图 11(b), 可以确定为海底小山丘对声能量的遮挡, 导致 32 km 距离附近出现倒三角声影区; 另外, 从图 11(a) 看出, 32 km 距离处的海底斜坡的反射作用使得 43 km 距离附近海表面深度附近声能量较为聚集, 即传播损失减小, 这与从图 10(b) 中得到的结论是一致的.

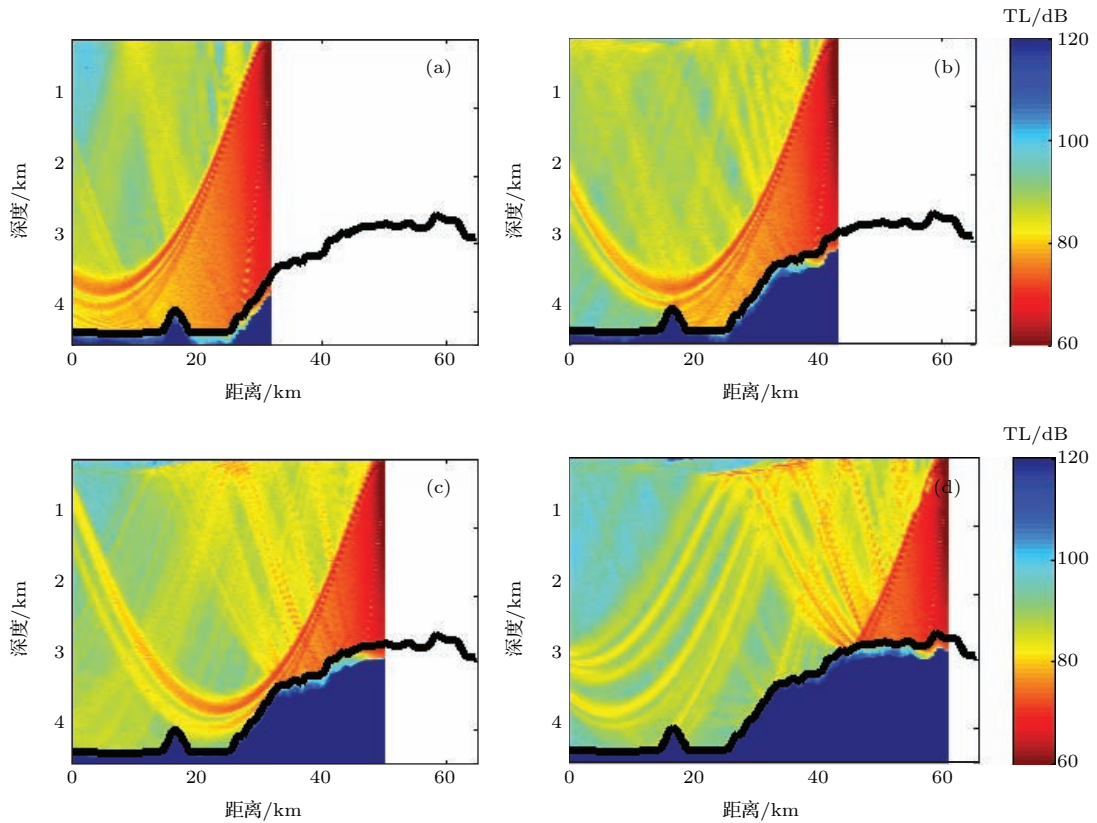


图 10 深海斜坡环境下声源位于 4 个典型距离时的二维 TL 计算结果, 其中, 声源距离分别为 (a) 32 km, (b) 43 km, (c) 50 km, (d) 60 km; 声源深度 137 m, 中心频率 310 Hz

Fig. 10. The numerical TLs in the sloping environment for the source at four different ranges (a) 32 km, (b) 43 km, (c) 50 km and (d) 60 km, respectively, where the source depth is 137 m, and the center frequency is 310 Hz.

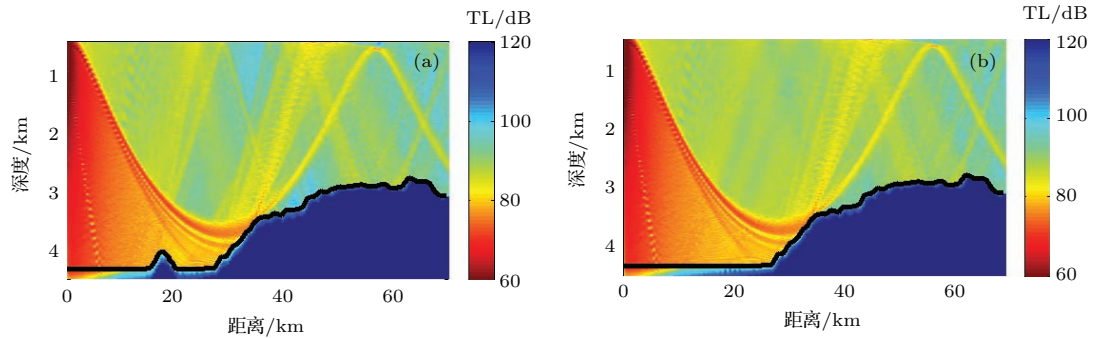


图 11 有 (a)/无 (b) 海底小山丘时斜坡环境下的 TL 比较, 其中, 声源深度 144 m, 声源频率 310 Hz

Fig. 11. Comparison of the TL results with/without the sea hill along the sloping bottom track, where (a) is with the sea hill, (b) is without the sea hill, the source depth is 137 m, and the central frequency is 310 Hz.

5 结 论

本文利用 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对声传播的影响. 经对有/无斜坡环境下的 TL 进行了对比分析, 表明深海海底地形对声传播有很显著的影响. 主要结论有以下 3 点.

1) 在声影区范围内, 当声波第一次入射到达的

海底位置有较小幅度的山丘 (凸起高度小于 1/10 海深), 海底小山丘可对声波有反射遮挡作用, 导致在其反射区特定传播距离和深度上出现倒三角声影区, 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, 影响深度可达海面以下 1500 m.

2) 深海海底斜坡对入射的声波有反射增强作用, 可使得斜坡上方靠近海表面深度处形成一个声增强区, 其声传播损失减小约 5 dB.

3) 特定距离下的深海海底斜坡对声波的反射

作用结合深海海水的折射,使得在相应距离处形成只从水体向上折射的单会聚结构,这不同于深海平坦海底环境下的会聚区会存在向上折射和经海面反射后向下折射的两个高声强区.

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

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, Schmidt H 2011 *Computational Ocean Acoustics* (2nd Ed.) (New York: Springer) p33
- [2] Collis J M, Siegmann W L, Jensen F B, Zampolli M, Küsel E T, Collins M D 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **123** 51
- [3] Evans R B 1983 *J. Acoust. Soc. Am.* **74** 188
- [4] Zhang R H, Liu H, He Y, Akulichev V A 1994 *Acta Acust.* **19** 408 (in Chinese) [张仁和, 刘红, 何怡, Akulichev V A 1994 声学学报 **19** 408]
- [5] Zhang R H, He Y, Liu H, Akulichev V A 1995 *J. Sound Vib.* **184** 439
- [6] Li Q Q, Li Z L, Zhang R H 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 034303
- [7] Porter M B, Bucker H P 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **82** 1349
- [8] 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]
- [9] Peng Z H, Zhang R H 2005 *Acta Acust.* **30** 97 (in Chinese) [彭朝晖, 张仁和 2005 声学学报 **30** 97]
- [10] Zhang Z M, Li Z L, Dai Q X *Tech. Acoust.* **26** 998 (in Chinese) [张镇迈, 李整林, 戴琼兴 2007 声学技术 **26** 998]
- [11] 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]
- [12] Northrop J, Loughbrid M S, Werner E W 1968 *J. Geophys. Res.* **73** 3905
- [13] Dosso S E, Chapman N R 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **81** 258
- [14] Tappert F D, Spiesberger J L, Wolfson M A 2002 *J. Acoust. Soc. Am.* **111** 757
- [15] 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
- [16] Qin J X, Zhang R H, Luo W Y, Peng Z H, Liu J H, Wang D J 2014 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **57** 1031
- [17] Northrop J 1970 *J. Acoust. Soc. Am.* **48** 417
- [18] Nutile D A, Guthrie A N 1979 *J. Acoust. Soc. Am.* **66** 1813
- [19] Chapman N R, Ebbeson G R 1983 *J. Acoust. Soc. Am.* **73** 1979
- [20] Kim H J 2009 *Ph. D. Dissertation* (Boston: Massachusetts Institute of Technology)
- [21] Li W, Li Z L, Zhang R H, Qin J X, Li J, Nan M X 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 064302
- [22] Collins M D, Westwood E K 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **89** 1068
- [23] Collins M D 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 1736
- [24] Li Z L, Li F H 2010 *Chin. J. Oceanol. Limnol.* **28** 990

Sound propagation in deep water with a sloping bottom*

Hu Zhi-Guo¹⁾³⁾ Li Zheng-Lin^{1)2)†} Zhang Ren-He¹⁾ Ren Yun¹⁾ Qin Ji-Xing¹⁾ He Li¹⁾

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

2) (Haikou Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Haikou 570105, China)

3) (College of Electronic Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 9 June 2015; revised manuscript received 18 August 2015)

Abstract

Variation of bathymetry has a large effect on the sound propagation in deep water. An acoustic propagation experiment is carried out in the South China Sea. Some different propagation phenomena are observed for two different tracks in the flat bottom and the sloping bottom environments. Numerical analysis based on the parabolic equation model RAM (range-dependent acoustic model) is performed to explain the causes of the differences. The experimental and numerical results show that the transmission losses (TLs) decrease down to about 5 dB above the slope due to the reflection of the bottom, with a high-intensity region appearing below the sea surface. When a sea hill with a height of 320 m, which is less than 1/10 of water depth, exists in the incident range of sound beams on bottom first time, the sound beams are blocked due to the reflection of the sea hill. Then their propagating directions are changed, which makes an inverted-triangle shadow zone appearing in the reflection area of the sea hill. Compared with the TL 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 TL effects can reach a maximal depth of 1500 m. Consequently, the shadow amplification effect caused by a small variation of bathymetry in deep water for long-range/large-depth sound propagation should receive enough attention. Furthermore, the convergence-zone structure in the sloping environment is different from that in deep water with flat bottom. The first convergence zone caused by refractions from the water above the axis of sound channel disappears. There are only the sound beams refracted back from water below the axis of sound channel. The numerical simulations show that the reflection-blockage of sound beams caused by the sloping bottom is significant. When the source is located somewhere above the slope, sound beams with large grazing angles can be reflected by the sloping bottom, and only some sound beams with small grazing angles can be refracted in the water without touching the slope and then come into the depth range of the vertical line array (VLA), forming the first part of the convergence zone refracted back from water. As the source moves farther from the VLA, the reflection-blockage of the sloping bottom becomes stronger. Sound beams are all reflected by the slope at a depth of about 3000 m, and they go through below the VLA, which leads to the absence of the first convergence zone caused by refractions from the water above the axis of sound channel. Therefore, the accuracy of bathymetry is meaningful for the sound propagation and target detection in deep water.

Keywords: deep water, sloping bottom, sound propagation, convergence zone

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

DOI: 10.7498/aps.65.014303

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11434012, 41561144006, 11174312, 11404366).

† Corresponding author. E-mail: lzhl@mail.ioa.ac.cn