

陆架斜坡海域上坡波导环境中声能量急剧下降现象及其定量分析

谢磊 孙超 刘雄厚 蒋光禹 孔德智

Investigation and quantitative analysis on the acoustic energy tobogganing in the upslope waveguide of continental slope area

Xie Lei Sun Chao Liu Xiong-Hou Jiang Guang-Yu Kong De-Zhi

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 194301 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.194301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.194301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气泡体积分数对沙质沉积物低频声学特性的影响

[Effect of gas bubble volume fraction on low-frequency acoustic characteristic of sandy sediment](#)

物理学报.2017, 66(19): 194302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.194302>

基于水声信道传播时延排序的分层空时信号检测

[Ordered detection of layered space-time signals based on the propagation delays of underwater acoustic channels](#)

物理学报.2015, 64(16): 164302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164302>

矢量拖线阵水听器流噪声响应特性

[Flow-induced noise calculations for vector hydrophones in towed arrays](#)

物理学报.2015, 64(15): 154306 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154306>

水下目标几何声散射回波在分数阶傅里叶变换域中的特性

[Characteristics of the geometrical scattering waves from underwater target in fractional Fourier transform domain](#)

物理学报.2015, 64(6): 064302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064302>

单载波频域均衡中的水声信道频域响应与噪声估计

[Frequency domain response estimation of underwater acoustic channel and noise estimation for single-carrier frequency domain equalization](#)

物理学报.2014, 63(19): 194304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194304>

陆架斜坡海域上坡波导环境中声能量急剧下降现象及其定量分析*

谢磊¹⁾²⁾ 孙超^{1)2)†} 刘雄厚¹⁾²⁾ 蒋光禹¹⁾²⁾ 孔德智¹⁾²⁾

1)(西北工业大学海洋声学信息感知工业和信息化部重点实验室, 西安 710072)

2)(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

(2016年12月20日收到; 2017年7月4日收到修改稿)

深度较浅的声源其辐射声波在陆架斜坡海域上坡传播时, 在斜坡顶端会出现声能量急剧下降现象. 利用射线声学模型分析了造成这一现象的原因, 并根据抛物方程声场模型计算的深海和浅海平均传播损失定义了“声能量急剧下降距离”, 定量分析了声源位置对该现象的影响. 结果表明: 声源深度对“声能量急剧下降距离”影响较大, 而声源与斜坡底端水平距离对其影响较小; 当声源深度变大时, 部分掠射角较小的声线最终能够达到斜坡顶端, 致使“声能量急剧下降距离”增大, 继续增加声源深度, 将导致上坡声能量急剧下降现象消失. 利用抛物方程声场模型对陆架斜坡海域上坡声传播进行数值仿真, 结合“声能量急剧下降距离”的定义, 计算并比较了声源位置不同时该距离的变化, 数值计算结果验证了理论分析.

关键词: 上坡传播, 声能量急剧下降, 声源位置, 陆架斜坡海域

PACS: 43.30.+m, 43.3Cq, 43.2Mv

DOI: 10.7498/aps.66.194301

1 引言

声波从深海经过陆架斜坡向浅海传播, 称之为上坡传播. 反之声波经过陆架斜坡向深海传播, 称之为下坡传播. 针对斜坡海底上坡声传播的研究一直是水声学中的重要关注点之一. 斜坡海底也可称之为“楔形海底”, 而斜坡海底海域是陆架斜坡海域^[1]中的一部分. 近年来, 对于楔形海底上坡声传播, 研究者们分别研究了模态截止现象和声传播损失增大的问题. Rutherford^[2]利用绝热筒正波声场模型^[3], 研究了等声速的楔形海底波导环境中上坡传播的多径问题. Miller等^[4]指出, 上坡传播时, 在每阶模态截止点处声能量被折射到海底向下传播, 并在一定深度处消失. Jensen等^[5,6]研究了在可穿透楔形海底上坡传播时的模态截止现象, 在此之后Pierce^[7]利用绝热筒正波模型详细分析了模

态截止深度的问题. 但以上研究均是基于绝热筒正波模型对等声速浅海楔形海底上坡波导环境中的声传播进行研究, 且楔形海底的倾斜度较小, 一般在 0° — 2° 范围内. 在这种浅海、等声速且小倾角的楔形海底波导环境中, 海洋环境随距离变化较缓慢, 可以忽略各阶模态之间的耦合, 绝热筒正波模型能够较为精确地描述上坡模态传播问题^[3,8]. 但是当各阶模态之间耦合系数较大时, 绝热筒正波模型计算误差很大^[9], 在利用绝热筒正波声场模型之前, 需要先进行绝热近似判别^[10,11]. 相比于浅海楔形海底海域, 陆架斜坡海域的斜坡倾斜角较大(3° — 6°), 且声波传播跨越深海、斜坡和浅海海域, 在跨海域传播时声速剖面也随着距离变化, 此时模态耦合较严重, 绝热筒正波模型已不再适用. 因此利用模态截止深度分析上坡声传播规律具有一定的局限性, 需要采用新的方法对此进行研究. 不少学者对上坡声传播损失进行了研究. 如Arnold和

* 国家自然科学基金(批准号: 11534009)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: csun@nwpu.edu.cn

Felsen [12] 利用射线声学模型分析了楔形海底上坡声传播规律, Rousseau 等 [13] 给出了上坡等声速波导环境对传播损失的影响, 结果表明与平坦海底相比, 海底倾斜角度为 2° 时, 上坡传播损失会增大 10 dB. 但 Arnold 和 Rousseau 等的研究也是针对坡度较小的浅海楔形海底海域.

综合以上分析可见, 有关斜坡海域上坡声传播的研究都集中在海底倾斜角度较小的浅海楔形海底海域, 缺少对斜坡角度较大的陆架斜坡海域上坡跨海域声传播研究. 近年来, 有关陆架斜坡海域声传播的研究均是针对下坡声传播的 [14-17]. 但上坡与下坡的声传播规律有着明显差别, 目前针对陆架斜坡海域上坡声传播规律的研究内容比较缺乏.

在陆架斜坡海域上坡波导环境中, 深度较浅声源的出射声线经海底反射, 其掠射角不断增大, 最终导致在斜坡顶端的浅海区域出现声能量急剧下降现象. 本文利用水平变化波导环境声场模型(抛物方程声场模型)对这一现象进行研究, 结合射线声学模型, 分析出现上坡声能量急剧下降现象的物理机理, 并针对这一现象定义声能量急剧下降距离(range of acoustic energy tobogganing, RAET), 定量分析声源位置(深度和其与斜坡底端的距离)对陆架斜坡海域上坡声传播 RAET 的影响. 本文研究内容均是关于声源在深海声道轴以上深度时的陆架斜坡海域上坡声传播.

2 陆架斜坡海域上坡声传播规律及声能量急剧下降距离

2.1 陆架斜坡海域上坡声线传播规律

陆架斜坡海域上坡声传播的物理机理与下坡不同. 下坡传播时受倾斜海底的作用, 声线掠射角不断减小(如图 1(a) 所示), 使得声能量很快集中到声道轴附近传播 [18]. 与之相反, 声波在陆架斜坡海域上坡传播时, 声线经海底反射后的掠射角不断增大(如图 1(b) 所示), 形成了上坡传播特有的声传播规律. 本文考虑的陆架斜坡海域跨越深海平原, 大陆坡和浅海三种海域, 假设三种不同海域的海底均为硬海底, 斜坡海底倾斜角度为 θ . 图 2 给出了陆架斜坡海域上坡声传播过程中, 垂直入射到界面(海面或海底)的 4 条典型声线传播示意图. 这里以水平面为参考面 (0°), 规定在水平面以下出射声线的

出射角为负值, 在水平面以上出射声线的出射角为正值.

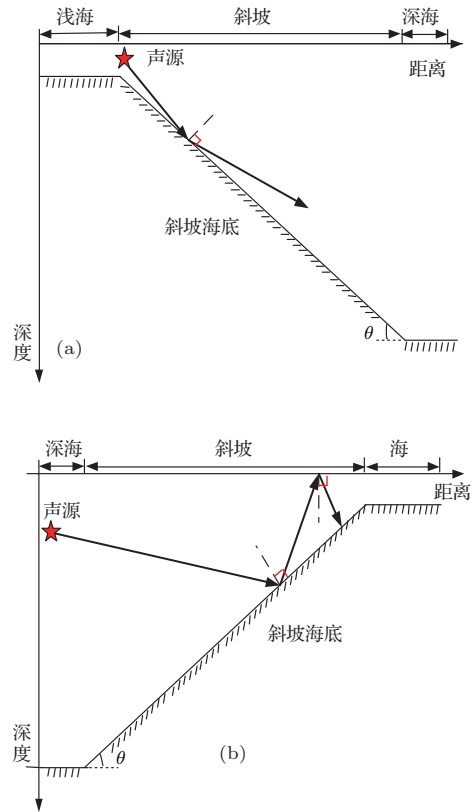


图 1 陆架斜坡海域声线传播示意图 (a) 下坡; (b) 上坡
Fig. 1. The diagrammatic sketches of a ray path in the continental shelf slope waveguide: (a) Downslope; (b) upslope.

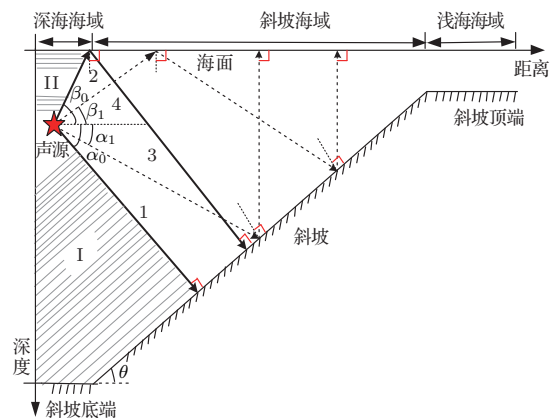


图 2 陆架斜坡海域上坡波导环境中特殊声线传播示意图
Fig. 2. The diagrammatic sketches of special rays propagation paths in the upslope waveguide.

为了方便分析, 这里将出射角为负值的声线和出射角为正值声线分开考虑, 并分别用 α 和 β 表示其出射角. 以 α_0 和 β_0 的声线为分界线, 图 2 中

“I区”和“II区”(图中阴影区)分别对应着出射角 $\alpha < \alpha_0$ 和 $\beta > \beta_0$ 的声线. 可以看出, 这两种声线经界面(海底或海面)反射将向后传播(在本文中, 向前传播是指声线经界面反射后, 向着远离声源的浅海方向传播; 向后传播是指声线经界面反射后, 向着接近声源的深海方向传播), 对本文考虑的陆架斜坡海域上坡远距声传播问题并没有贡献. 因此本文重点关注出射角在 $[\alpha_0, \beta_0]$ 范围内的声线, 以水平面为参考, 将该范围内的声线分为两类.

1) 出射角 α 满足 $\alpha_0 \leq \alpha < 0^\circ$ 的声线: 当 $\alpha = n\theta - 90^\circ$ 时, 声线将垂直入射到界面; 当 $n\theta - 90^\circ < \alpha < (n+1)\theta - 90^\circ$ 时, 声线经过界面反射开始向后传播, 其中 n 为正整数, 表示声线在传播过程中经界面反射的次数. 如图 2, 其中 1 号声线和 3 号声线垂直入射到界面, 分别对应于 $n = 1$ 和 $n = 2$ 的情况, 出射角则为 $\alpha_0 = \theta - 90^\circ$, $\alpha_1 = 2\theta - 90^\circ$; 在 1 号声线和 3 号声线之间的声线, 出射角满足 $\theta - 90^\circ < \alpha < 2\theta - 90^\circ$, 其在传播过程中都会经界面反射之后向后传播.

2) 出射角 β 满足 $0^\circ \leq \beta \leq \beta_0$ 的声线: 当 $\beta = 90^\circ - (m-1)\theta$ 时, 声线将垂直入射到界面; 当 $90^\circ - (m-1)\theta < \beta < 90^\circ - (m-2)\theta$ 时, 声线经过界面反射开始向后传播, 其中 m 为大于 1 的正整数, 表示声线在传播过程中经界面反射的次数. 如图 2, 其中 2 号声线和 4 号声线垂直入射到界面, 分别对应于 $m = 2$ 和 $m = 3$ 的情况, 出射角则为 $\beta_0 = 90^\circ - \theta$, $\beta_1 = 90^\circ - 2\theta$; 在 2 号声线和 4 号声线之间的声线, 出射角满足 $90^\circ - \theta < \beta < 90^\circ - 2\theta$, 其在传播过程中都会经界面反射之后向后传播.

由以上分析可见, 声线在上坡传播过程中经海面和海底反射后, 其中部分声线将向后传播, 另一部分声线将垂直入射到界面, 而垂直入射情况下, 部分声波将垂直反射回到海水中, 另部分声波透射到第二介质(海底或空气)中, 也不再向前传播. 因此几乎没有声线能够到达斜坡顶端, 由此导致了在陆架斜坡海域斜坡顶端“声能量急剧下降”现象的产生.

我们利用 Bellhop 软件(基于射线声学模型的声场计算软件)计算在陆架斜坡海域上坡波导环境中的声线传播轨迹. 在实际海洋环境中, 海水声速是随深度变化的, 这里假设声速剖面为典型的 Munk 曲线, 声道轴深度为 1300 m, 如图 3 所示.

声波传播经过深海、斜坡和浅海(其中深海和浅海均假设为平坦海底)三种海域: 其中深海海域水深为 5000 m, 自声源位置处延伸 2 km 的距离到达斜坡海域; 斜坡海域倾斜度为 3.5° , 跨越 78 km 的距离, 水深由 5000 m 变化到 229 m; 浅海海域水深为 229 m, 延伸 20 km 的距离. 海底声速为 1749 m/s, 密度为 1941 kg/m^3 , 海底吸收系数均为 $0.5 \text{ dB}/\lambda$. 声源位于深海海域声道轴以上深度, 图中用红色五星标出, 仿真中设声源深度为 110 m, 频率为 100 Hz. 图 4 给出了利用 Bellhop 软件计算得到的 25 条声线上坡传播轨迹图, 声线初始掠射角范围为 $[-80^\circ, 80^\circ]$ (后面用 Bellhop 软件计算时, 均取此参数). 图 4 中用红色和绿色实线标出了两条出射角为负值、且传播到达一定距离后不再向前传播的声线; 用紫红色和黑色实线标出了出射角为正值、且传播到达一定距离后不再向前传播的声线.

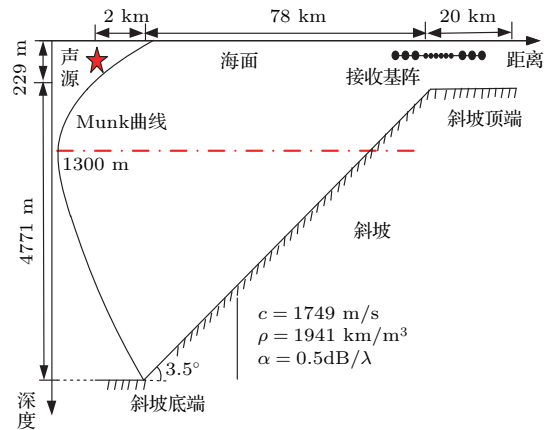


图 3 陆架斜坡海域及各仿真参数示意图

Fig. 3. The simulation environment and parameters.

由图 4 可以看出, 由声源出射的声线在未达到声道轴之前, 受负声速梯度的影响, 其掠射角随着深度的增加不断增大; 声线穿越声道轴深度后, 受正声速梯度的影响, 掠射角开始不断减小, 直至与斜坡海底作用返回海水中. 经海底反射的声线, 其掠射角增大, 最终将垂直入射到界面或者经界面反射向后传播. 可见, 深度较浅的声源辐射声波在陆架斜坡海域上坡传播时, 会出现: 1) 声线经海面或海底反射, 开始向后传播; 2) 声线垂直入射到海面或海底后, 垂直返回到海水中传播, 而不再向前传播. 这两种因素最终导致在陆架斜坡海域斜坡顶端出现声能量急剧下降的现象.

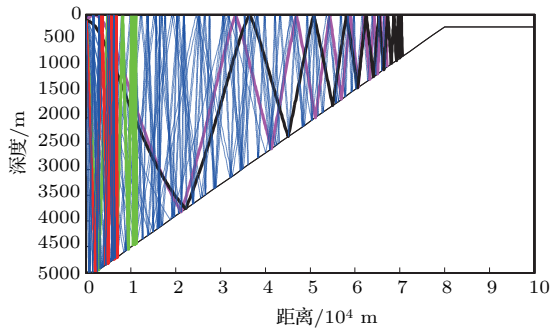


图4 (网刊彩色) 声源频率为 100 Hz、深度为 110 m 时, 陆架斜坡海域上坡波导环境中 25 条声线传播轨迹图

Fig. 4. (color online) 25 ray traces in the upslope waveguide when the source frequency is 100 Hz and the depth is 110 m.

2.2 抛物方程模型声场近似计算

标准抛物方程的详细推导过程及其求解方法可参考文献 [18]. 本文则利用 Collins [19] 提出的超宽角抛物方程声场模型和其对应的 RAM 软件, 计算陆架斜坡海域上坡声传播损失.

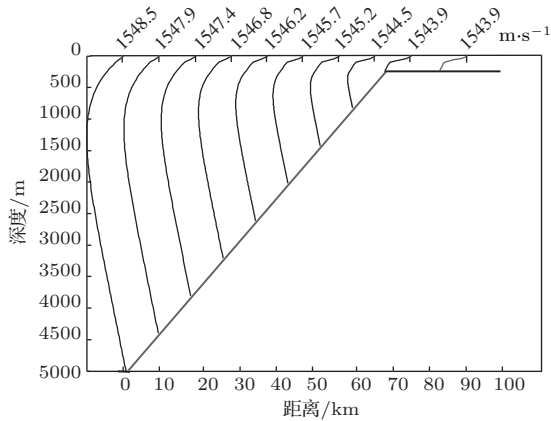


图5 陆架斜坡海域波导环境 10 km 距离分段的声速剖面
Fig. 5. Sound speed profiles of the upslope waveguide at 10 km interval.

在 100 km 跨度的陆架斜坡海域, 海水声速剖面变化较大, 不同海域对应的声速剖面不相同. 这里假设浅海海域为典型的浅海负梯度声速剖面, 深海海域声速剖面为标准的 Munk 曲线, 声道轴深度为 1300 m. 斜坡海域的声速剖面采用 10 km 距离分段, 即给定深海声速剖面 and 浅海声速剖面之后, 利用 RAM 软件通过插值依次生成中间各距离段的声速剖面, 结果如图 5 所示 (后面用 RAM 软件计算时, 均是采用该声速剖面). 陆架斜坡海域其他海洋环境参数如图 3 所示. 利用 RAM 软件计算传播损失时, 垂直方向计算步长为 1 m, 水平方向计算

步长为 2 m, RAM 输出网格大小为 10 m × 2 m (垂直方向为 10 m, 水平方向为 2 m). 在本文中利用 RAM 软件计算时均采用此参数. 图 6 给出了声源频率为 100 Hz、深度 110 m 时 RAM 软件计算得到的上坡声传播损失结果. 其中图 6(a) 为传播损失图, 图中红色五星为声源所在位置, 红色实线为海水与海底的分界线 (下同). 图 6(b) 为 150 m 深度上传播损失随距离变化的曲线. 可以看出, 在陆架斜坡海域上坡波导环境中, 深度较浅的声源辐射声波传播到达斜坡顶端附近时, 声传播损失开始迅速增大, 当其传播到达浅海海域时, 传播损失达到 140—160 dB, 即出现声能量急剧下降现象.

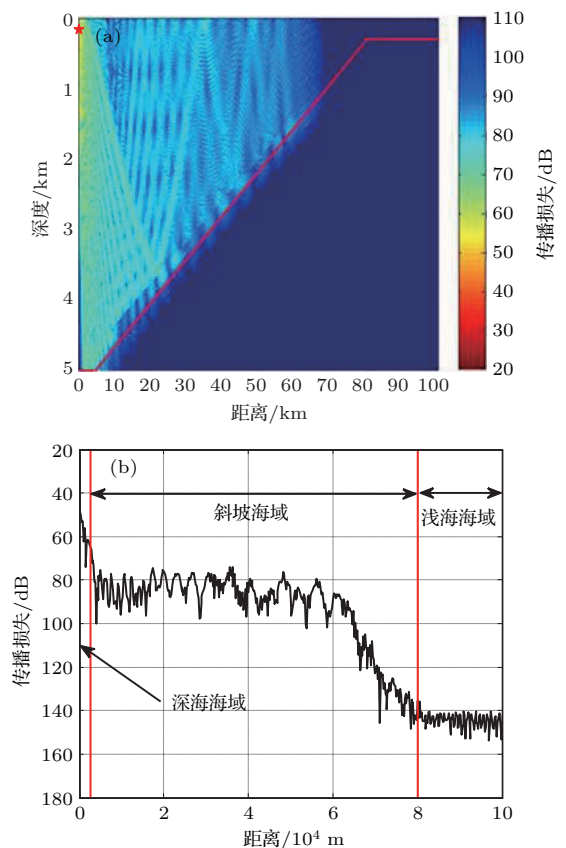


图6 (网刊彩色) 声源频率为 100 Hz, 深度 110 m 时, (a) 上坡声传播损失图, (b) 150 m 深度上的传播损失

Fig. 6. (color online) The transmission losses of upslope acoustic propagation when the source frequency is 100 Hz and the depth is 110 m: (a) The transmission losses; (b) the transmission losses at the depth of 150 m.

2.3 声能量急剧下降距离的定义

由 2.1 和 2.2 节中的分析可见, 深度较浅的声源辐射的声波在陆架斜坡海域上坡传播时, 会出现声能量急剧下降现象. 本文根据深海平均传播损失和

浅海平均传播损失定义了RAET, 对这一现象进行定量研究.

设声波在陆架斜坡海域上坡波导环境中传播时, 深度 H (小于浅海海深) 上的深海海域平均传播损失为 RTL_A^H , 浅海海域平均传播损失为 RTL_S^H , 深海和浅海平均传播损失的算术平均值为 RTL_{AS}^H , 则

$$RTL_A^H = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N TL_A^H(i),$$

$$RTL_S^H = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M TL_S^H(j),$$

$$RTL_{AS}^H = (RTL_A^H + RTL_S^H)/2, \quad (1)$$

式中, N 为深海海域深度 H 上的传播损失计算点的个数, $TL_A^H(i)$ 为其中第 i 个点的传播损失值, M 为浅海海域深度 H 上的传播损失计算点的个数, $TL_S^H(j)$ 为其中第 j 个点的传播损失值.

在深度 H 上, 取传播损失等于 RTL_{AS}^H 的点, 将该点与斜坡底端之间的水平距离定义为RAET. 由于传播损失随距离是起伏振荡的(如图6), 仅根据 RTL_{AS}^H 确定的RAET存在但不惟一. 因此, 本文定义: 在深度 H 上传播损失等于 RTL_{AS}^H , 且与声源距离最大的点为声能量急剧下降位置点(position of acoustic energy tobogganing, PAET), 该点

与斜坡底端之间的水平距离为RAET. 则有

$$D_P^H = \max[D_P^H(1), D_P^H(2), \dots, D_P^H(i), \dots, D_P^H(n)],$$

$$RAET = D_P^H - D_B, \quad (2)$$

式中 \max 为取最大值运算, $D_P^H(i)$ 为第 i 个传播损失等于 RTL_{AS}^H 位置点与声源之间的距离, D_P^H 为声源与PAET之间的距离, D_B 为声源与斜坡底端之间的距离.

3 声源位置对陆架斜坡海域上坡声传播影响定量分析

3.1 声源深度对RAET的影响

由Munk曲线可以看出, 深海声速随着深度的增加由负梯度经声道轴变化到正梯度, 这将导致声源深度对陆架斜坡海域上坡声传播规律的影响较大. 保持声源与斜坡底端水平距离为2 km不变, 将声源深度分别设置为110, 550和800 m, 分析声源深度对RAET的影响. 图7给出了声源深度为550和800 m, 其他仿真条件与2.2节相同时, 利用RAM软件计算得出的传播损失图, 图中用红色五星标出了声源位置(声源深度为110 m时的声传播损失见图6(a)).

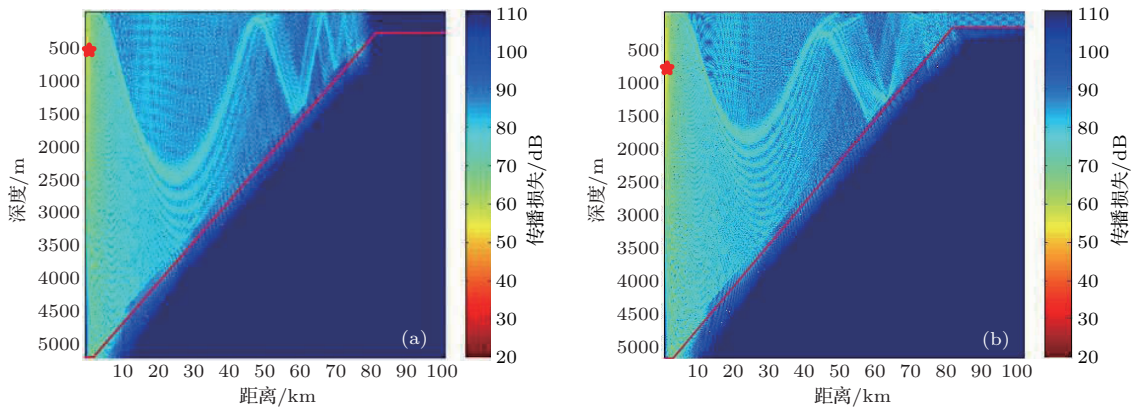


图7 (网刊彩色) 声源频率为100 Hz, 其深度分别为(a) 550 m和(b) 800 m时, 上坡声传播损失图

Fig. 7. (color online) The transmission losses of upslope acoustic propagation when the source frequency is 100 Hz and the depths are (a) 550 m; (b) 800 m, respectively.

对比图6和图7可以看出, 在陆架斜坡海域上坡波导环境中, 随着声源深度的增加, 斜坡顶端的声能量增大, 当声源深度为800 m时声能量急剧下降现象将消失. 为了更加清楚地说明声源深度对上坡声能量急剧下降现象的影响, 当声源深度为110, 550和800 m时, 分别截取80 m和200 m深度

上的传播损失进行分析. 根据2.3节中有关RAET的定义, 首先计算三种深度声源辐射声波在80 m和200 m深度上的 RTL_A 和 RTL_S ; 以此为基础分别确定相应的AET (由于计算精度的限制, 在实际计算时, 可取传播损失约等于 RTL_{AS} , 且与声源之间距离最大的点为PAET); 最后根据(2)式计算

出RAET, 结果如表1所列. 与之对应, 图8给出了声源深度不同时, 在80 m和200 m深度上的传播损失随距离变化曲线. 由表1和图8均可看出, 随着声源深度的增加, RAET会不断增大, 而当声源深度为800 m时不会出现声能量急剧下降现象. 图8中分别标出了声源深度为110 m和550 m时的RAET.

表1 声源深度分别为110, 550和800 m时, 80 m和200 m深度上的传播损失和RAET
Table 1. The *RTL* and *RAET* at the depths of 80 m and 200 m, when the source depths are 110 m, 550 m and 500 m, respectively.

声源深度/m	110		550		800	
	80	200	80	200	80	200
<i>RTL_A</i> /dB	56.2	58.3	59.7	59.5	61.4	61.0
<i>RTL_S</i> /dB	145.6	142.3	126.9	125.5	85.5	84.6
<i>RTL_{AS}</i> /dB	100.9	100.3	93.3	92.5	73.9	73.3
<i>RAET</i> /km	62	64.4	76.4	75.6	—	—

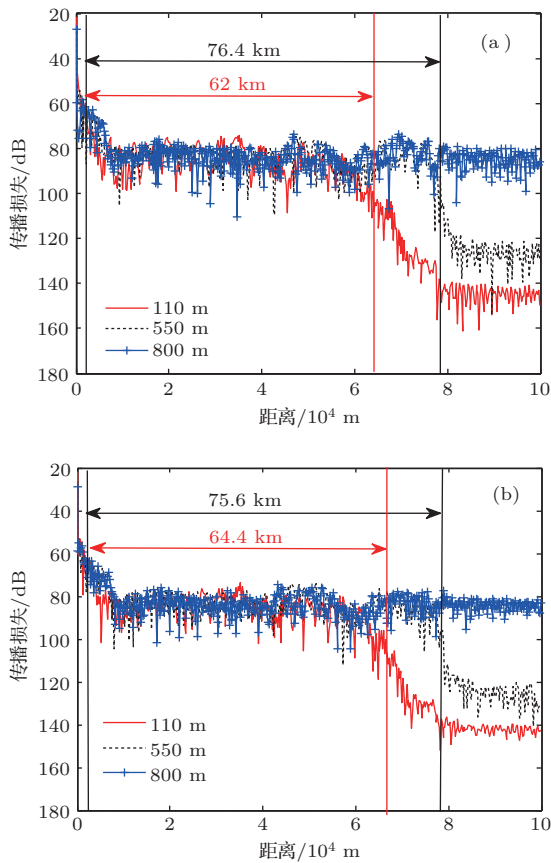


图8 (网刊彩色) 声源频率为100 Hz, 深度分别为110, 550和800 m时, (a) 80 m和(b) 200 m深度上的传播损失和RAET

Fig. 8. (color online) The transmission losses and *RAET* at depths of (a) 80 m and (b) 200 m, when the source frequency is 100 Hz and the depths are 110 m, 550 m and 800 m, respectively.

这里利用射线模型解释声源深度对上坡RAET的影响. 由Snell定理可知, 声源出射声线在未到达声道轴之前, 受负声速梯度的影响, 其掠射角不断增大; 声线穿越声道轴深度后, 受正声速梯度的影响, 掠射角开始不断减小, 直至与斜坡海底作用返回海水中或者在未到达海底之前出现反转. 对于同一掠射角的声线, 当声源深度较深时(在声道轴以上深度), 声线能够“较早”地出现反转, 其传播到较远距离后才可能出现垂直入射或向后传播的情况, 导致RAET变大. 随着声源深度的增加, RAET将不断增大, 直至声线能够到达斜坡顶端, 并在浅海海域传播, 声能量急剧下降现象消失. 图9给出了声源深度分别为550 m和800 m, 其他参数与图3相同时, 利用Bellhop软件得到的陆架斜坡海域上坡波导环境中25条声线轨迹图. 与图4中声源深度为110 m的声线轨迹图对比, 可见声源深度为550 m(图9(a))和800 m(图9(b))时, 有部分声线能够到达斜坡顶端, 用红色线条标出. 由图9

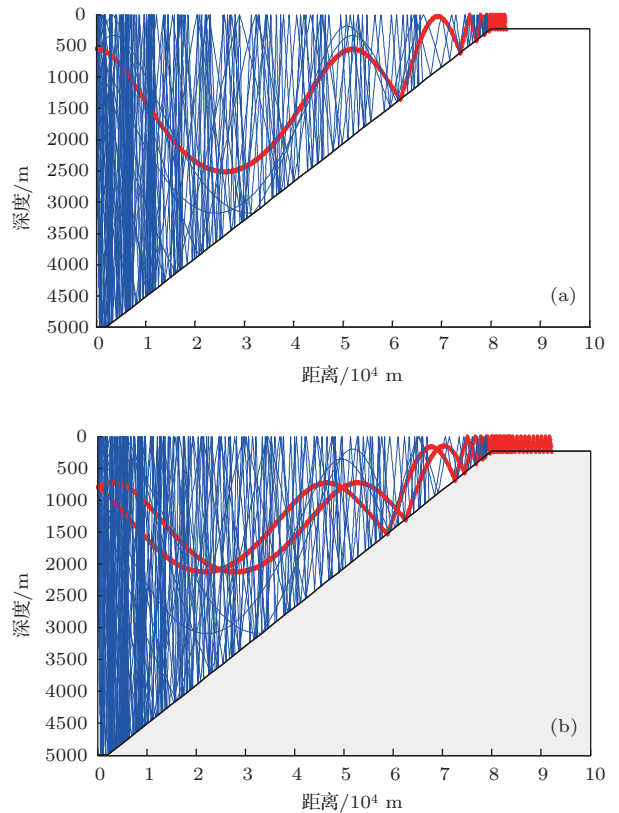


图9 (网刊彩色) 声源频率为100 Hz, 深度分别为(a) 550 m和(b) 800 m时, 陆架斜坡海域上坡波导环境中25条声线轨迹图

Fig. 9. (color online) 25 ray traces in the upslope waveguide when the source frequency is 100 Hz and the depths are (a) 550 m, (b) 800 m, respectively.

还可以看出, 声源深度越深, 达到斜坡顶端的声线条数也就越多, 声能量越大, 且能够到达斜坡顶端浅海区域的声线, 均为能够很快到达声道轴深度的较小掠射角声线. 由以上分析可见, 当声源深度变大时, RAET会增大, 且声源深度增加到一定值时, 将导致上坡声能量急剧下降现象消失.

3.2 声源与斜坡底端水平距离对RAET的影响

假设在斜坡底端之前的海域均是深度为5000 m的深海海域, 保持声源深度不变, 将声源向着远离斜坡底端的方向移动, 分析声源与斜坡底端水平距离对RAET的影响. 固定声源深度为110 m(会出现声能量急剧下降现象的声源深度), 声源频率为100 Hz, 其他仿真条件与2.2节相同, 利用RAM 软件计算总跨度为150 km的陆架斜坡海域传播损失(斜坡海域的跨度保持78 km不变, 调整深海海域和浅海域的跨度). 取150 m深度上的声传播损失, 分析声源与斜坡底端水平距离对

RAET的影响. 图10给出了深度150 m上RAET随声源与斜坡底端距离变化曲线, 其中声源与斜坡底端距离在1—50 km范围内以1 km间隔取值.

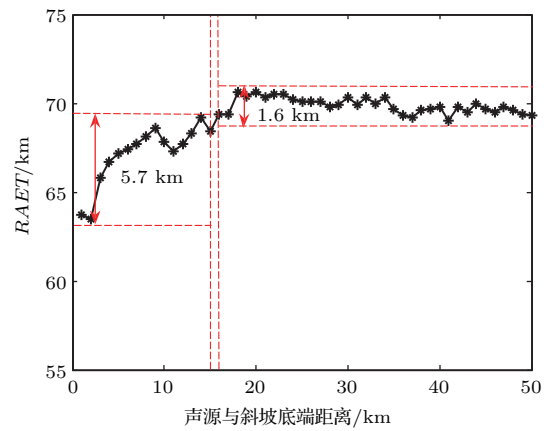


图10 声源频率为100 Hz, 深度为110, 150 m深度上RAET随声源与斜坡底端距离变化曲线
Fig. 10. The RAETs vary with the distances between the source and the bottom of the slope on the depth of 150 m, when the source frequency is 100 Hz and the depth is 110 m.

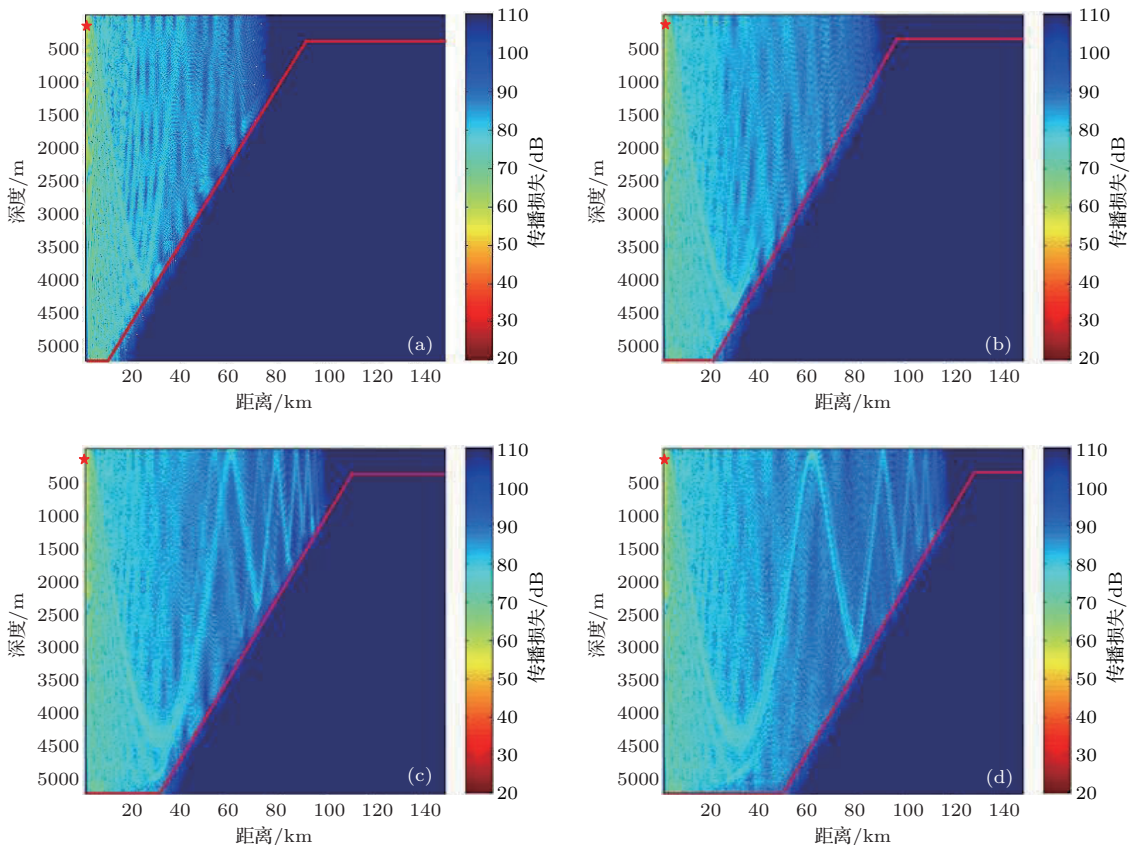


图11 (网刊彩色) 声源频率为100 Hz, 深度为110 m, 声源距斜坡底端水平距离分别为10, 20, 30和50 km时, 传播损失图对比
Fig. 11. (color online) The transmission losses of upslope acoustic propagation when the source frequency is 100 Hz, the depth is 110 m, and the distances between the source and the bottom of the slope are (a) 10 km, (b) 20 km, (c) 30 km and (d) 50 km, respectively.

由图 10 可以看出, 当声源与斜坡底端距离较近 (1—15 km) 时, RAET 较小, 且在 63.5—69.2 km 范围内变化, 即 RAET 在这段距离跨度为 15 km 范围内的起伏达 5.7 km. 引起这种现象的原因是, 声源与斜坡底端距离较近时, $RTL_A^{150\text{ m}}$ 较小, 且传播损失几何衰减使得 $RTL_A^{150\text{ m}}$ 随距离变化较大, 最终导致 RAET 起伏较大. 而当声源与斜坡底端距离较远 (16—50 km) 时, RAET 在 69—70.6 km 范围内变化, 即 RAET 在此段距离跨度为 35 km 范围内的起伏只有 1.6 km. 可见, 此时 RAET 几乎不受声源与斜坡底端距离的影响.

图 11 给出了声源与斜坡底端的水平距离为 10, 20, 30 和 50 km 时, 跨度 150 km 的声传播损失图. 图中红色实线为陆架斜坡海域中海水与海底的分界线. 从图 11 可以看出, 在距离斜坡底端几乎同样的位置将出现声能量急剧下降现象. 分别截取这四幅图 150 m 深度上的传播损失进行分析, 表 2 给出了计算得到的 $RTL_A^{150\text{ m}}$, $RTL_S^{150\text{ m}}$, $RTL_{AS}^{150\text{ m}}$

和 RAET. 图 12 相应地给出了 150 m 深度上传播损失随距离变化曲线以及 RAET 的值, 分别为 67.8, 70.6, 70.3 和 69.3 km. 可见, 当声源与斜坡底端距离较近时, RAET 较小且起伏较大; 当声源与斜坡底端距离较远时, RAET 基本保持不变.

表 2 声源频率为 100 Hz, 深度 110 m, 与斜坡底端的距离分别为 10, 20, 30 和 50 km 时, 150 m 深度上的传播损失和 RAET

Table 2. The RTL and $RAET$ on the depth of 150 m, when the source frequency is 100 Hz, the depth is 110 m and the distances between the source and the bottom of the slope are (a) 10 km, (b) 20 km, (c) 30 km and (d) 50 km, respectively.

与斜坡底端距离/km	10	20	30	50
$RTL_A^{150\text{ m}}/\text{dB}$	72.9	76.8	78.6	81.0
$RTL_S^{150\text{ m}}/\text{dB}$	145.1	143.2	143.0	138.4
$RTL_{AS}^{150\text{ m}}/\text{dB}$	109.	110.0	110.8	109.7
$RAET/\text{km}$	67.8	70.6	70.3	69.3

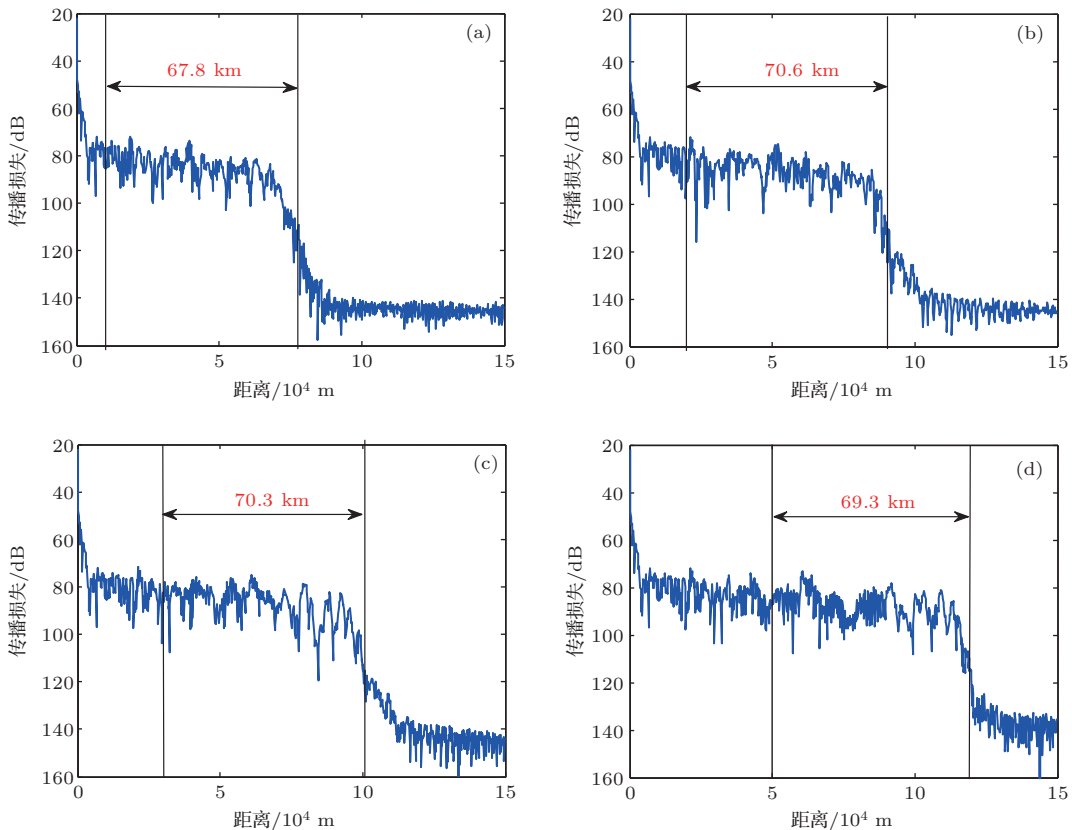


图 12 声源频率为 100 Hz, 深度为 110 m, 其距斜坡底端的距离分别为 10, 20, 30 和 50 km 时, 深度 150 m 上的传播损失图

Fig. 12. The transmission losses of at depth of 150 m when the source frequency is 100 Hz, the depth is 110 m, and the distances between the source and the bottom of the slope are (a) 10 km, (b) 20 km, (c) 30 km and (d) 50 km, respectively.

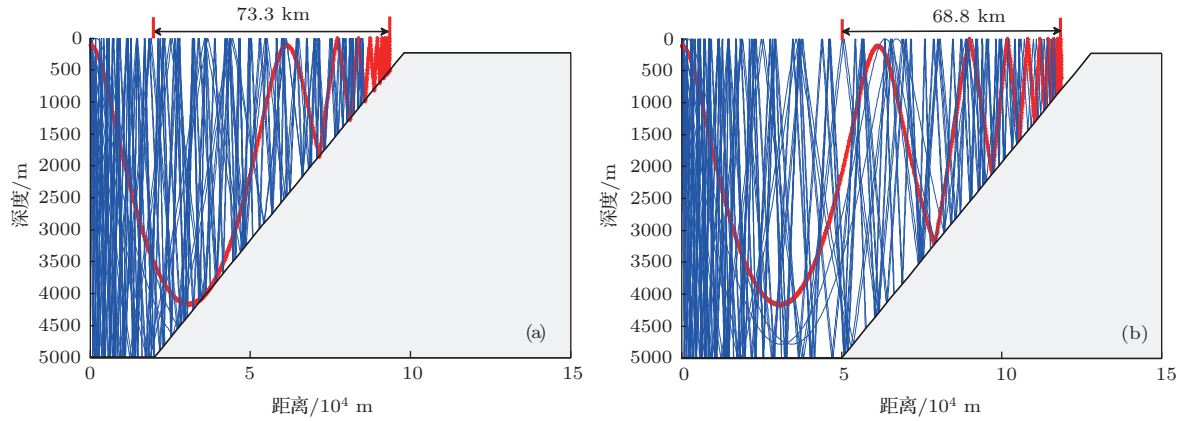


图 13 (网刊彩色) 声源频率为 100 Hz, 深度为 110 m, 其与斜坡底端的距离分别为 (a) 20 km 和 (b) 50 km 时, 陆架斜坡海域上坡波导环境中 25 条声线轨迹图

Fig. 13. (color online) 25 ray traces in the upslope waveguide when the source frequency is 100 Hz, the depth is 110 m, and the distances from the bottom of the slope are (a) 20 km and (b) 50 km, respectively.

这里同样利用射线模型解释声源与斜坡底端水平距离较远时, 上坡 RAET 基本保持不变的现象. 图 13 给出了声源深度为 110 m, 其他参数与图 3 相同, 声源与斜坡底端的水平距离分别为 20 km (图 13(a)) 和 50 km (图 13(b)) 时, 利用 Bellhop 软件得出的陆架斜坡海域上坡波导环境中 25 条声线轨迹图. 从图 13 可以看出, 固定声源深度为 110 m, 而与斜坡底端水平距离变化时, 均不会出现类似于图 9 中用红色实线标示的声线, 没有声线到达斜坡顶端, 且其中传播最远的声线与斜坡底端的距离分别为 73.3 km 和 68.8 km. 可见, 当声源与斜坡底端水平距离较远时, 只在水平方向上改变声源位置, 对这种声线的影响较小, 即 RAET 几乎不受声源与斜坡底端距离的影响.

4 结 论

本文利用抛物方程和射线两种声场模型研究了陆架斜坡海域上坡波导环境中声能量急剧下降现象. 针对此现象定义了 RAET, 定量分析了声源位置对该现象的影响, 并结合射线模型进行了解释. 基于图 3 所示陆架斜坡海域上坡波导环境的仿真结果可以看出, 当声源深度较浅时, 在斜坡的顶端传播损失迅速增大, 即出现声能量急剧下降的现象. 当声源深度变大时, 部分掠射角较小的声线将能够达到斜坡顶端, 使得 RAET 增大. 当声源深度增大到一定值后, 上坡声能量急剧下降现象将消失. 固定声源深度不变, 改变声源与斜坡底端的水平距离, 当声源与斜坡底端距离较近时, 该距离对

RAET 的影响较大, 而当声源与斜坡底端距离较远时, 该距离对 RAET 几乎没有影响. 可将陆架斜坡海域作为一种特殊的波导环境, 该波导以海面 and 海底为边界, 而上坡声能量急剧下降现象即为上坡波导环境的“瓶颈效应”. 当声源深度变大时, 声能量可以突破该“瓶颈”, 传播到达斜坡顶端的浅海区域; 但当声源深度较小, 且只在上坡底端之前的深海海域做水平移动时, 声能量不能突破该“瓶颈”. 这就意味着在陆架斜坡海域上坡波导环境中, 对于深度较浅的目标在深海海域做水平运动, 当声源与斜坡底端距离较远时, 声波传播到达一定距离之后 (本文仿真的陆架斜坡海域上坡波导环境, 150 m 深度上的 PAET 与斜坡底端之间距离, 即 RAET, 大约为 69.8 km), 都将会出现声能量急剧下降现象.

参考文献

- [1] Xie L, Sun C, Liu X H, Jiang G Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 144303 (in Chinese) [谢磊, 孙超, 刘雄厚, 蒋光禹 2016 物理学报 **65** 144303]
- [2] Rutherford S R 1979 *J. Acoust. Soc. Am.* **66** 1482
- [3] Pierce A D 1965 *J. Acoust. Soc. Am.* **37** 19
- [4] Miller J F, Nagl A, Uberall H 1986 *J. Acoust. Soc. Am.* **79** 562
- [5] Jensen F B, Kuperman W A 1980 *J. Acoust. Soc. Am.* **67** 1564
- [6] Jensen F B, Tindle C T 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **82** 211
- [7] Pierce A D 1982 *J. Acoust. Soc. Am.* **72** 523
- [8] Graves R D, Nagl A, Uberall H, Zarur G L 1975 *J. Acoust. Soc. Am.* **58** 1171
- [9] Nagl A, Uberall H, Haug A J, Zarur G L 1978 *J. Acoust. Soc. Am.* **63** 739

- [10] Milder D M 1969 *J. Acoust. Soc. Am.* **46** 1259
- [11] Wang N, Huang X S 2001 *Sci. Sin. Ser. A* **9** 857 (in Chinese) [王宁, 黄晓圣 2001 中国科学(A辑) **9** 857]
- [12] Arnold J M, Felsen L B 1983 *J. Acoust. Soc. Am.* **73** 1105
- [13] Rousseau T H, Jacobson W L 1985 *J. Acoust. Soc. Am.* **78** 1713
- [14] Carey W M, Gereben I B 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **81** 244
- [15] Dosso S E, Chapman N R 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **81** 258
- [16] Carey W M 1986 *J. Acoust. Soc. Am.* **79** 49
- [17] 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]
- [18] Jensen F B, Kuperman W A, Portor M B, Schmidt H 2000 *Computational Ocean Acoustics* (New York: AIP Press/Springer) p326
- [19] Collins M D 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 1736

Investigation and quantitative analysis on the acoustic energy tobogganing in the upslope waveguide of continental slope area*

Xie Lei¹⁾²⁾ Sun Chao^{1)2)†} Liu Xiong-Hou¹⁾²⁾ Jiang Guang-Yu¹⁾²⁾ Kong De-Zhi¹⁾²⁾

1) (Key Laboratory of Ocean Acoustics and Sensing (Northwestern Polytechnical University, Ministry of Industry and Information Technology, Xi'an 710072, China)

2) (School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 20 December 2016; revised manuscript received 4 July 2017)

Abstract

The toboggan in acoustic energy will appear at the top of the slope when the sound wave radiated by a shallow water source propagates in an upslope waveguide of the continental slope area. The grazing angles of the sound rays reflected by the ocean bottom will increase in the upslope waveguide, which leads to the acoustic energy tobogganing in the shallow water at the top of the slope. In this paper, the range of acoustic energy tobogganing (RAET) at a specified depth is defined to study this phenomenon. The transmission loss (TL) is calculated by the parabolic-equation acoustic model that is applied to the range-dependent waveguide. The RAET is defined by an average transmission loss in the abyssal water and in the shallow water corresponding to the depth. The acoustic energy toboggan is explained using the ray-based model, and the effects of source location change on it are demonstrated, including the source depth and the range away from the bottom of the slope. The sound rays from a shallow water source which transmit in the upslope waveguide can be divided into two types: one is incident to the interface vertically and will return to the water along the original path; the other is that the rays will transmit towards the sound source (the deep sea direction). However, all of them will no longer spread forward after they have transmitted to a certain distance, leading to the acoustic energy tobogganing in shallow water. The analysis results show that the RAET becomes larger with source depth increasing, and the energy toboggan phenomenon will disappear when the source is deep enough. However, the range of source away from the slope bottom has less effect on RAET. Numerical simulations are conducted in a continental upslope environment by the RAM program based on the split-step Padé algorithm for the parabolic equation. The simulation results show as follows. 1) The TL will increase rapidly after the waves have transmitted to a certain range away from the bottom of the slope when the source depth is 110 m, and the TLs is 140–160 dB propagating to the shallow water at the top of the slope. 2) The RAET will enlarge orderly when the source depths are 110 m, 550 m and 800 m respectively, and the energy toboggan phenomenon will disappear when the source depth is more than 800 m. 3) Fix the source depth at 110 m and move it along the deep sea, then the RAET will greatly varies when the distance between the source and the slope bottom changes in a range of 1–15 km. However, the RAET remain almost constant at 69.8 km when the distance between the source and the slope bottom changes in a range of 16–50 km.

Keywords: upslope, transmission loss, source location, energy tobogganing

PACS: 43.30.+m, 43.3Cq, 43.2Mv

DOI: 10.7498/aps.66.194301

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11534009).

† Corresponding author. E-mail: csun@nwpu.edu.cn