

环境因素对海-气界面低频异常声透射的影响研究

郭业才 连晨方 张秀再 赵益波

Influences of environmental factors on low frequency abnormal sound transmission through sea-air interface

Guo Ye-Cai Lian Chen-Fang Zhang Xiu-Zai Zhao Yi-Bo

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 144301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.144301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

水下任意刚性散射体对 Bessel 波的散射特性分析

[Study on underwater acoustic scattering of a Bessel beam by rigid objects with arbitrary shapes](#)

物理学报.2015, 64(15): 154305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154305>

水声正交频分多址上行通信稀疏信道估计与导频优化

[Sparse channel estimation and pilot optimization for underwater acoustic orthogonal frequency division multiple access uplink communications](#)

物理学报.2015, 64(15): 154304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154304>

一种基于长基线交汇的超短基线定位系统精度评价方法

[A precision evaluation method of USBL positioning systems based on LBL triangulation](#)

物理学报.2015, 64(9): 094301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094301>

环境因素对海-气界面低频异常声透射的影响研究*

郭业才^{1)2)†} 连晨方³⁾ 张秀再¹⁾²⁾ 赵益波¹⁾²⁾

1)(南京信息工程大学, 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 南京 210044)

2)(江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

3)(南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044)

(2014年11月1日收到; 2015年1月19日收到修改稿)

针对海中声源在海-气界面低频异常声透射问题, 根据两层媒质声传输模型, 分析了大气声速和密度与气压、气温、湿度及海水中声速和密度与海温、盐度间的关系, 研究了低频声透射和传输受温度、气压、盐度、湿度等因素的影响, 分析了各因素对声透射和传输的影响程度. 结果表明: 1) 声透射到大气中的声功率与气温、湿度负相关, 与海温、盐度、气压正相关; 2) 单极子与水平偶极子声源辐射到海中的声功率与海温、盐度负相关, 而垂直偶极子声源辐射到海中的声功率与海温、盐度正相关; 3) 声透射指向性与海温正相关, 与气温负相关; 4) 低频声透射受温度影响最大, 其次是盐度, 受气压和湿度影响较小, 垂直偶极子声源的声透射受温度影响大于水平偶极子和单极子声源.

关键词: 低频异常声透射, 海-气界面, 声功率, 环境因素

PACS: 43.30.Es, 43.28.Js, 43.28.+h, 43.30.+m

DOI: 10.7498/aps.64.144301

1 引言

海中声源发射低频声波经海-气界面透射到大气中的声功率受温度、盐度、风浪、海流、内波、海底类型和海中悬浮物等环境因素的影响, 这些影响主要是由于环境因素变化导致媒质特性阻抗变化引起的. 而海-气界面上部是大气, 下部是海洋, 上部媒质的特性阻抗远小于下部媒质的特性阻抗. 当海中声源向海-气界面发送入射声波时, 透射率极小. 所以对于海中声源, 通常认为海-气界面是一个全反射面^[1].

文献[2—12]分析了水下声源发射低频声波通过水气界面的声透射现象指出, 源深度远小于水中声波波长时, 由于倏逝波的作用, 声源辐射的总能量绝大部分能透射到空气中, 出现了异常声透射^[13]; 源深越小、水气界面反射波能量越小, 而倏逝波经分界面透过空气激发的平面波声能量越

强^[14], 异常声透射现象越显著; 当水气界面不光滑部分的厚度小于声波波长时, 粗糙因素对低频声透射影响很小^[15]. 文献[16, 17]研究大气温度、密度、风场等因素对次声波在非均匀大气中传播的影响时, 仅考虑大气这一单层媒质; 文献[18]研究浅海中低频声波透射受声源深度、接收器高度、入射平面波与海-气界面的掠射角等因素的影响时, 也没有考虑环境因素的影响. 与水中静止声源相比, 水中运动声源在低频时的倏逝波对声透射的贡献会更大^[19,20], 而刚性海底和分层海水中声源低频异常声透射受海水深度、声源深度和声源速度等因素的影响^[21].

上述研究并未考虑环境因素变化引起媒质特性阻抗变化对海-气界面低频异常声透射的影响. 本文在Godin等^[22]建立的水-气界面低频声透射模型的基础上, 根据波动理论, 综合考虑温度、湿度、气压、盐度等多种环境因素, 研究海中静止声源

* 全国优秀博士论文作者专项资金(批准号: 200753)、江苏省高校自然科学基金(批准号: 13KJA510001)、江苏省高校科研成果产业化推进项目(批准号: JHB 2012-9)、江苏省高校“信息与通信工程”优势学科建设工程、江苏省六大人才高峰项目(批准号: 2008026)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(批准号: SJZZ_0110, SJZZ_0111)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guo-yecai@163.com

的低频异常声透射特性.

2 两层媒质的低频声透射模型

如图 1 所示, 建立笛卡尔坐标系, $\mathbf{r} = (x, y, z)$, 水平坐标为 x, y , 垂直坐标为 z . 把大气和海洋作为两个均匀流体半空间 (对应 $z > 0, z < 0$), 被海-气界面 ($z = 0$) 隔开. 大气的声速和密度为 c_2, ρ_2 ; 海水的声速和密度为 c_1, ρ_1 , 且 $c_2 = c_1/n, \rho_2 = m\rho_1$, n 为大气对海水的折射率, m 为密度比. 海中静止声源位于 $\mathbf{r}_0 = (0, 0, z_0)$ 处, 其中 $z_0 < 0$.

图 1 中 z 轴上的水平线代表倏逝波, 其振幅随与分界面垂直距离的增大而呈指数式衰减; θ_1 为海中均匀平面波的入射角和反射角, θ_2 为折射角; δ 是临界角, 表示海中均匀平面波在大气中的最大折射角, 且 $\delta = \arcsin(1/n)$. 海-气界面入射波由海中 z_0 处声源发射, 入射波声压 p_1 , 反射波声压 p_2 和透射波声压 p_3 分别为

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{i}{2\pi} \int \frac{d^2\mathbf{q}}{k_{z1}} e^{i\mathbf{q}\mathbf{r} - ik_{z1}z_0} S_1(\mathbf{q}) e^{ik_{z1}(2z_0 - z)}, \\ & \quad z < z_0, \\ p_1 &= \frac{i}{2\pi} \int \frac{d^2\mathbf{q}}{k_{z1}} e^{i\mathbf{q}\mathbf{r} - ik_{z1}z_0} S_2(\mathbf{q}) e^{ik_{z1}z}, \\ & \quad z_0 < z < 0, \\ p_2 &= \frac{i}{2\pi} \int \frac{d^2\mathbf{q}}{k_{z1}} e^{i\mathbf{q}\mathbf{r} - ik_{z1}z_0} S_2(\mathbf{q}) V(\mathbf{q}) e^{-ik_{z1}z}, \\ & \quad z < 0, \\ p_3 &= \frac{i}{2\pi} \int \frac{d^2\mathbf{q}}{k_{z1}} e^{i\mathbf{q}\mathbf{r} - ik_{z1}z_0} S_2(\mathbf{q}) W(\mathbf{q}) e^{ik_{z2}z}, \\ & \quad z > 0. \end{aligned} \quad (1)$$

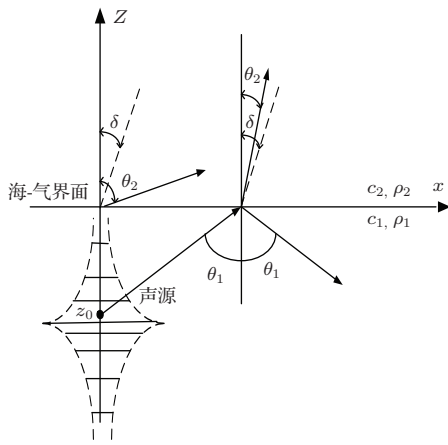


图 1 声波在海-气界面的反射与折射示意图

Fig. 1. Schematic of sound reflection and refraction at the sea-air interface.

海水中声压 $p(z < 0)$ 等于入射波声压 p_1 与反射波声压 p_2 之和, 大气中声压 $p(z > 0)$ 等于透射波声压 p_3 . 由 (1) 式得

$$\begin{cases} p = \frac{i}{2\pi} \int \frac{d^2\mathbf{q}}{k_{z1}} S_2(\mathbf{q}) W e^{i\mathbf{q}\mathbf{r} - ik_{z1}z_0 + ik_{z2}z}, \\ \quad z > 0, \\ p = \frac{i}{2\pi} \int \frac{d^2\mathbf{q}}{k_{z1}} e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}} (S_2(\mathbf{q}) e^{ik_{z1}|z - z_0|} \\ \quad + S_2(\mathbf{q}) V e^{-ik_{z1}(z + z_0)}), \\ \quad z_0 < z < 0, \\ p = \frac{i}{2\pi} \int \frac{d^2\mathbf{q}}{k_{z1}} e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}} (S_1(\mathbf{q}) e^{ik_{z1}|z - z_0|} \\ \quad + S_2(\mathbf{q}) V e^{-ik_{z1}(z + z_0)}), \quad z < z_0, \end{cases} \quad (2)$$

$$k_\beta = \frac{\omega}{c_\beta}, \quad k_{z\beta} = \sqrt{k_\beta^2 - q^2} \quad \beta = 1, 2, \quad (3)$$

$$V = \frac{mk_{z1} - k_{z2}}{mk_{z1} + k_{z2}}, \quad W = \frac{2mk_{z1}}{mk_{z1} + k_{z2}}. \quad (4)$$

式中, V 和 W 是海-气界面的反射系数和透射系数; ω 是声源的角频率; \mathbf{q} 是水平面波数 ($q_x, q_y, 0$), $q \equiv |\mathbf{q}|$; k_β 是波数, $k_{z\beta}$ 是垂直波数, 下标 β 分别表示海洋和大气媒质; 函数 $S_1(\mathbf{q}), S_2(\mathbf{q})$ 分别是声源向下和向上发射的平面波频谱, 由声源类型决定. 对单极子声源, 有 $S_1(\mathbf{q}) = S_2(\mathbf{q}) = 1$; 对水平偶极子声源, 有 $S_1(\mathbf{q}) = S_2(\mathbf{q}) = iq_x/k_1$, 对垂直偶极子声源, 有 $S_1(\mathbf{q}) = -S_2(\mathbf{q}) = -ik_{z1}/k_1$; q 与 k_1 和 k_2 大小之间的关系, 决定了波类型^[3]. 当 $0 \leq q \leq k_1$ 时, 海中均匀平面波透射到大气中仍为均匀平面波, 折射角 $0 \leq \theta_2 \leq \delta$; 当 $k_1 < q \leq k_2$ 时, 海中产生倏逝波, 透射到大气中形成均匀平面波, 折射角 $\delta < \theta_2 \leq \pi/2$; 当 $q > k_2$ 时, 海中倏逝波透射到大气中形成倏逝波. 声强也称为平均声能量流密度, 即

$$I = (2\omega\rho)^{-1} \text{Im}(p^* \nabla p), \quad (5)$$

式中, $*$ 代表共轭复数. 计算声能量流密度的法向分量在海-气界面 $z = 0$ 以上和 $z = z_0$ 以下的积分 $\iint I_z dS$, 得到声波透射到大气中和进入海中平均声功率 J_a 和 J_w 分别为

$$\begin{aligned} J_a &= \frac{J_0}{4\pi k_1} \int_{q < k_2} d^2\mathbf{q} |S_2|^2 e^{2z_0 \text{Im}k_{z1}} \\ & \quad \times \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im}V}{k_{z1}} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

$$J_w = \frac{J_0}{4\pi k_1} \int_{q < k_1} \frac{d^2\mathbf{q}}{k_{z1}} |S_1 + V S_2 e^{-2ik_{z1}z_0}|^2, \quad (7)$$

式中, J_0 是无界海洋中单极子声源发射的声功率, 无界海洋中偶极子声源发射的声功率 $J_d = J_0/3$.

将辐射到大气中、海洋中归一化声功率及归一化总声功率分别记为 J_A , J_W 及 J_T , 其中 $J_T = J_A + J_W$; 海中声源辐射的均匀平面波和倏逝波透射到大气

中的归一化声功率分别记为 J_{Ah} 与 J_{Ae} .
对单极子声源, 有

$$\begin{cases} J_A = \frac{J_a}{J_0} = \frac{1}{4\pi k_1} \int_{q < k_2} d^2 \mathbf{q} e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}} \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right), \\ J_W = \frac{J_w}{J_0} = \frac{1}{4\pi k_1} \int_{q < k_1} \frac{d^2 \mathbf{q}}{k_{z1}} \left| 1 + V e^{-2i k_{z1} z_0} \right|^2, \\ J_{Ah} = \frac{J_{ah}}{J_0} = \frac{1}{4\pi k_1} \int_{q < k_1} d^2 \mathbf{q} e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}} \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right), \\ J_{Ae} = \frac{J_{ae}}{J_0} = \frac{1}{4\pi k_1} \int_{k_1 < q < k_2} d^2 \mathbf{q} e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}} \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right). \end{cases} \quad (8)$$

对水平偶极子声源, 有

$$\begin{cases} J_A = \frac{J_a}{J_d} = \frac{3}{4\pi k_1} \int_{q < k_2} d^2 \mathbf{q} \left| i \frac{q_x}{k_1} \right|^2 e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}} \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right), \\ J_W = \frac{J_w}{J_d} = \frac{3}{4\pi k_1} \int_{q < k_1} d^2 \mathbf{q} \frac{1}{k_{z1}} \left| i \frac{q_x}{k_1} (1 + V e^{-2i k_{z1} z_0}) \right|^2, \\ J_{Ah} = \frac{J_{ah}}{J_d} = \frac{3}{4\pi k_1} \int_{q < k_1} d^2 \mathbf{q} \left| i \frac{q_x}{k_1} \right|^2 e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}} \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right), \\ J_{Ae} = \frac{J_{ae}}{J_d} = \frac{3}{4\pi k_1} \int_{k_1 < q < k_2} d^2 \mathbf{q} \left| i \frac{q_x}{k_1} \right|^2 e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}} \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right). \end{cases} \quad (9)$$

对垂直偶极子声源, 有

$$\begin{cases} J_A = \frac{J_a}{J_d} = \frac{3}{4\pi k_1} \int_{q < k_2} d^2 \mathbf{q} \left| i \frac{k_{z1}}{k_1} \right|^2 e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}} \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right), \\ J_W = \frac{J_w}{J_d} = \frac{3}{4\pi k_1} \int_{q < k_1} d^2 \mathbf{q} \frac{1}{k_{z1}} \left| i \frac{k_{z1}}{k_1} (1 - V e^{-2i k_{z1} z_0}) \right|^2, \\ J_{Ah} = \frac{J_{ah}}{J_d} = \frac{3}{4\pi k_1} \int_{q < k_1} d^2 \mathbf{q} \left| i \frac{k_{z1}}{k_1} \right|^2 e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}} \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right), \\ J_{Ae} = \frac{J_{ae}}{J_d} = \frac{3}{4\pi k_1} \int_{k_1 < q < k_2} d^2 \mathbf{q} \left| i \frac{k_{z1}}{k_1} \right|^2 e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}} \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right). \end{cases} \quad (10)$$

为了进一步研究海中声波经海-气界面低频声透射的性能, 透射率 T 定义为声源透射到大气中归一化声功率与归一化总声功率之比

$$T = J_A / J_T = J_A / (J_A + J_W). \quad (11)$$

声功率比 E 定义为海中倏逝波声功率与均匀平面波透射到大气中声功率之比

$$E = J_{Ae} / J_{Ah}. \quad (12)$$

在球面坐标系下, 令 $q_x = k_2 \sin \theta_2 \cos \varphi$, $q_y = k_2 \sin \theta_2 \sin \varphi$, $k_{z\beta} = \sqrt{k_\beta^2 - k_2^2 \sin^2 \theta_2}$.

对单极子声源, 将 (8) 式的第一式改写为

$$J_A = \frac{1}{4\pi k_1} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}}$$

$$\begin{aligned} & \times \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right) k_2^2 \sin \theta_2 \cos \theta_2 d\theta_2 \\ & = \int_0^{\frac{\pi}{2}} D(\theta_2) d\theta_2, \end{aligned}$$

式中, $D(\theta_2)$ 是声源在大气中声能量辐射的指向性, 且

$$\begin{aligned} D(\theta_2) &= \frac{1}{2k_1} e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}} \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right) \\ & \times k_2^2 \sin \theta_2 \cos \theta_2. \end{aligned} \quad (13)$$

同理, 对水平偶极子声源, 有

$$D(\theta_2) = \frac{3}{4k_1^3} e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}} \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right)$$

$$\times k_2^4 \sin^3 \theta_2 \cos \theta_2, \quad (14)$$

对垂直偶极子声源, 有

$$D(\theta_2) = \frac{3 |k_{z1}^2|}{2k_1^3} e^{2z_0 \text{Im} k_{z1}} \text{Re} \left(\frac{1 - |V|^2 + 2i \text{Im} V}{k_{z1}} \right) \times k_2^2 \sin \theta_2 \cos \theta_2. \quad (15)$$

为了对单极子、水平偶极子、垂直偶极子声源的低频声透射特性参数加以区别, 在各特性参数上分别加下标 a, b, c , 以示区别.

3 大气和海洋中的声速

媒质声特性阻抗与声速及媒质密度有关, 声速或密度变化对特性阻抗有影响, 进而影响声传播特性, 因此本节讨论大气与海中的声速特性.

3.1 大气中的声速

假设大气为理想气体, 其小振幅声波声速为 $c_2 = \sqrt{\gamma P_2 / \rho_2}$, 其中 γ 是比热容比; ρ_2 为大气密度; $P_2 = \rho_2 R^* T^* / \mu$ 为大气压; R^*, T^*, μ 分别为普适气体常数、绝对温度、气体摩尔质量; $T^* = 273.15 + t_2$, t_2 为摄氏温标; $R = R^* / \mu$, 表示比气体常数. 大气中绝热声速和密度为

$$c_2 = \sqrt{\gamma R T^*}, \quad \rho_2 = \frac{P_2}{R T^*}. \quad (16)$$

水汽与干空气混合后是湿空气, 湿空气中的水汽含量可以用比湿、相对湿度等物理量表示, 统称为空气湿度. 干空气时, $R = R_d = 287.04 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ [16], 空气摩尔质量在 80 km 以下的大气中 $\mu = \mu_d = 28.966 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ [17], $\gamma = \gamma_d = 1.402$. 考虑空气湿度时, 引入虚温 $T_v = (1 + 0.378 P_w / P_2) T^*$, P_w 为水汽压, 是湿空气中的水汽分压强, 此时 $P_2 = \rho_2 R_d T_v$ 为湿空气的总压强, 湿空气密度 $\rho_2 = P_2 / R_d T_v$, 湿空气比热容比 γ 和气体摩尔质量 μ 以及比湿 q^* 分别为 [23]

$$\gamma = \gamma_d \frac{1 + 0.863 q^*}{1 + 0.967 q^*}, \quad \mu = \frac{\mu_d}{1 + 0.608 q^*},$$

$$q^* = \frac{\varepsilon P_w}{P_2 - 0.378 P_w}, \quad (17)$$

式中, ε 是水汽和干空气的气体摩尔质量比, $\varepsilon = 0.622$. 将 (17) 式代入 (16) 式即得湿空气声速. 令 $P_w = e_{sw} H$, H 是相对湿度, e_{sw} 是湿空气饱和和水汽压. 相对湿度为 100% 时, $P_w = e_{sw}$. 对于平面水面, 纯水汽饱和和水汽压是 e_{sw0} , 采用 Goff-Gratch 公式计算得纯水平液面下的饱和水汽压为

$$\lg e_{sw0}$$

$$= 10.79574 \left(1 - \frac{T_0^*}{T^*} \right) - 5.02800 \lg \left(\frac{T^*}{T_0^*} \right) + 1.50475 \times 10^{-4} \left[1 - 10^{-8.2969} \left(\frac{T^*}{T_0^*} - 1 \right) \right] + 0.42873 \times 10^{-3} \left[10^{4.76955} \left(1 - \frac{T_0^*}{T^*} \right) - 1 \right] + 0.78614, \quad (18)$$

式中, 温度范围 t_2 是 $-49.9 \sim 49.9 \text{ }^\circ\text{C}$, 水的三相点温度 $T_0^* = 273.16 \text{ K}$. e_{sw} 也称为有效饱和水汽压, 世界气象组织在《气象仪器和观测方法指南》中推荐计算 e_{sw} 的公式为

$$\begin{cases} e_{sw}(P_2, t_2) = L(P_2) \cdot e_{sw0}(t_2), \\ L(P_2) = 1.0016 + 3.15 \times 10^{-6} P_2 - 0.074 / P_2, \end{cases} \quad (19)$$

(18) 与 (19) 式中, e_{sw0} 与 P_2 的单位为 hPa.

3.2 海水中的声速

对于海洋表层水的密度, 在一标准大气压 (海压为 0) 下, 海水密度 ρ_1 与盐度 S 、海温 t_1 的关系式为 [24]

$$\rho_1(S, t_1, 0) = \rho_w + (8.24493 \times 10^{-1} - 4.0899 \times 10^{-3} t_1 + 7.6438 \times 10^{-5} t_1^2 - 8.6427 \times 10^{-7} t_1^3 + 5.3875 \times 10^{-9} t_1^4) S + (-5.72466 \times 10^{-3} + 1.0227 \times 10^{-4} t_1 - 1.6546 \times 10^{-6} t_1^2) S^{3/2} + 4.8314 \times 10^{-4} S^2, \quad (20)$$

$$\rho_w = 999.842594 + 6.793952 \times 10^{-2} t_1 - 9.095230 \times 10^{-3} t_1^2 + 1.001685 \times 10^{-4} t_1^3 - 1.120083 \times 10^{-6} t_1^4 + 6.536332 \times 10^{-9} t_1^5, \quad (21)$$

式中, 温度范围为 $-2 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$, 盐度为 $0 \sim 42\text{‰}$, ρ_w 是基准纯水密度.

高压下由国际海水状态方程给出海水密度与盐度 S 、温度 t_1 、海压 P_1 的关系式为 [24]

$$\rho_1(S, t_1, P_1) = \rho_1(S, t_1, 0) \cdot \left[1 - \frac{(n_0 P_1)}{K(S, t_1, P_1)} \right]^{-1}, \quad (22)$$

$$K(S, t_1, P_1) = K(S, t_1, 0) + A_1(n_0 P_1) + B_1(n_0 P_1)^2, \quad (23)$$

$$K(S, t_1, 0) = 19652.21 + 148.4206 t_1 - 2.237105 t_1^2$$

$$\begin{aligned}
 &+ 1.360477 \times 10^{-2}t_1^3 - 5.155288 \times 10^{-5}t_1^4 \\
 &+ (54.6746 - 0.603459t_1 + 1.09987 \times 10^{-2}t_1^2 \\
 &- 6.1670 \times 10^{-5}t_1^3)S + (7.944 \times 10^{-2} \\
 &+ 1.6483 \times 10^{-2}t_1 - 5.3009 \times 10^{-4}t_1^2)S^{3/2}, \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_1 = &3.239908 + 1.43713 \times 10^{-3}t_1 \\
 &+ 1.16092 \times 10^{-4}t_1^2 \\
 &- 5.77905 \times 10^{-7}t_1^3 + (2.2838 \times 10^{-3} \\
 &- 1.0981 \times 10^{-5}t_1 - 1.6078 \times 10^{-6}t_1^2)S \\
 &+ 1.91075 \times 10^{-4}S^{3/2}, \quad (25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_1 = &8.50935 \times 10^{-5} - 6.12293 \times 10^{-6}t_1 \\
 &+ 5.2787 \times 10^{-8}t_1^2 + (-9.9348 \times 10^{-7} \\
 &+ 2.0816 \times 10^{-8}t_1 + 9.1697 \times 10^{-10}t_1^2)S, \quad (26)
 \end{aligned}$$

式中, $K(S, t_1, P_1)$ 为割线体积模量, 温度范围是 $-2-40\text{ }^\circ\text{C}$, 盐度为 $0-42\%$, 海压为 $0-10^8\text{ Pa}$, 压力匹配系数 $n_0 = 10^{-5}$ [24]. 海压 $P_1 = 0.1028 \times 10^4 gh$, 其中 g 为重力加速度, h 为海水深度.

海水中声速经验公式有 10 种以上, 本文采用的 Chen-Millero-Li 公式 [25,26] 为

$$\begin{aligned}
 c_1 = &c_w(t_1, P_{1a}) + c_c(t_1, P_{1a}) + A_2S + B_2S^{3/2} \\
 &+ C_2S^2, \quad (27)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_w(t_1, P_{1a}) = &1402.388 + 5.03711t_1 - 5.80852 \times 10^{-2}t_1^2 \\
 &+ 3.3420 \times 10^{-4}t_1^3 - 1.4780 \times 10^{-6}t_1^4 \\
 &+ 3.1464 \times 10^{-9}t_1^5 + (0.153563 \\
 &+ 6.8982 \times 10^{-4}t_1 - 8.1788 \times 10^{-6}t_1^2 \\
 &+ 1.3621 \times 10^{-7}t_1^3 - 6.1185 \times 10^{-10}t_1^4)P_{1a} \\
 &+ (3.1260 \times 10^{-5} - 1.7107 \times 10^{-6}t_1 \\
 &+ 2.5974 \times 10^{-8}t_1^2 - 2.5335 \times 10^{-10}t_1^3 \\
 &+ 1.0405 \times 10^{-12}t_1^4)P_{1a}^2 + (-9.7729 \times 10^{-9} \\
 &+ 3.8504 \times 10^{-10}t_1 - 2.3643 \times 10^{-12}t_1^2)P_{1a}^3, \quad (28)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_c(t_1, P_{1a}) = &(0.0029 - 2.19 \times 10^{-4}t_1 + 1.4 \times 10^{-5}t_1^2)P_{1a} \\
 &+ (-4.76 \times 10^{-6} + 3.47 \times 10^{-7}t_1 \\
 &- 2.59 \times 10^{-8}t_1^2)P_{1a}^2 + 2.68 \times 10^{-9}P_{1a}^3, \quad (29)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_2 = &1.389 - 1.262 \times 10^{-2}t_1 + 7.164 \times 10^{-5}t_1^2 \\
 &+ 2.006 \times 10^{-6}t_1^3 - 3.21 \times 10^{-8}t_1^4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ (9.4742 \times 10^{-5} - 1.2580 \times 10^{-5}t_1 \\
 &- 6.4885 \times 10^{-8}t_1^2 + 1.0507 \times 10^{-8}t_1^3 \\
 &- 2.0122 \times 10^{-10}t_1^4)P_{1a} + (-3.9064 \times 10^{-7} \\
 &+ 9.1041 \times 10^{-9}t_1 - 1.6002 \times 10^{-10}t_1^2 \\
 &+ 7.988 \times 10^{-12}t_1^3)P_{1a}^2 \\
 &+ (1.100 \times 10^{-10} + 6.649 \times 10^{-12}t_1 \\
 &- 3.389 \times 10^{-13}t_1^2)P_{1a}^3, \quad (30)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_2 = &- 1.922 \times 10^{-2} - 4.42 \times 10^{-5}t_1 \\
 &+ (7.3637 \times 10^{-5} + 1.7945 \times 10^{-7}t_1)P_{1a}, \quad (31)
 \end{aligned}$$

$$C_2 = 1.727 \times 10^{-3} - 7.9836 \times 10^{-6}P_{1a}, \quad (32)$$

式中, 温度范围 t_1 为 $0-40\text{ }^\circ\text{C}$, 盐度 S 为 $0-40\%$, 海压 P_{1a} 为 $0-1000\text{ bar}$, 其适用范围覆盖了除冰层下高盐水之外的所有海水和淡水, 被联合国教科文组织推荐为国际标准水下计算公式.

在两层媒质模型中, 为了研究影响大气和海中声速的环境因素对海中声源低频声透射特性的影响, 现做如下假设: 1) 大气空间为无限大、海洋区域无限广、深度无限深; 2) 位于海中 $z_0 = -10\text{ m}$ 处声源发射的声波经海-气界面透射到大气时, 海-气界面一次反射到海中及直接在海中传播的声波不再考虑任何反射, 没有衰减; 3) 声源发射声波的角频率范围为 $[0, 2000\text{ rad/s}]$, 其中 $[0, 20\text{ rad/s}]$ 称为低频段, 而大于 20 rad/s 小于等于 2000 rad/s 的范围称为高频段.

4 海-气界面低频声透射受温度的影响

4.1 单极子声源低频声透射受温度的影响

在干空气、标准大气压、海水平均盐度为 35% 时, 研究海温 $t_1 \in [0, 30\text{ }^\circ\text{C}]$ 、气温 $t_2 \in [0, 40\text{ }^\circ\text{C}]$ 内变化时单极子声源低频声透射受温度的影响. 低频声透射特性参数加下标 1, 2, 3 或 4 分别表示 $t_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}, t_2 = 0\text{ }^\circ\text{C}$; $t_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}, t_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$; $t_1 = 30\text{ }^\circ\text{C}, t_2 = 0\text{ }^\circ\text{C}$; $t_1 = 30\text{ }^\circ\text{C}, t_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$ 4 种情况. 图 2—图 4 给出了单极子声源低频声透射特性参数在不同温度下随角频率的变化关系. 图 5 给出了不同温度下声透射参数随海中波数 k_1 的变化关系.

图 2(a) 表明, 海中均匀平面波透射到大气中的声功率级 J_{Ah} 不随频率变化, J_{Ah} 与温度负相关; 在低频段, 海中声波透射到大气中声功率级 J_A 与海中倏逝波透射到大气中声功率级 J_{Ae} 随着频率

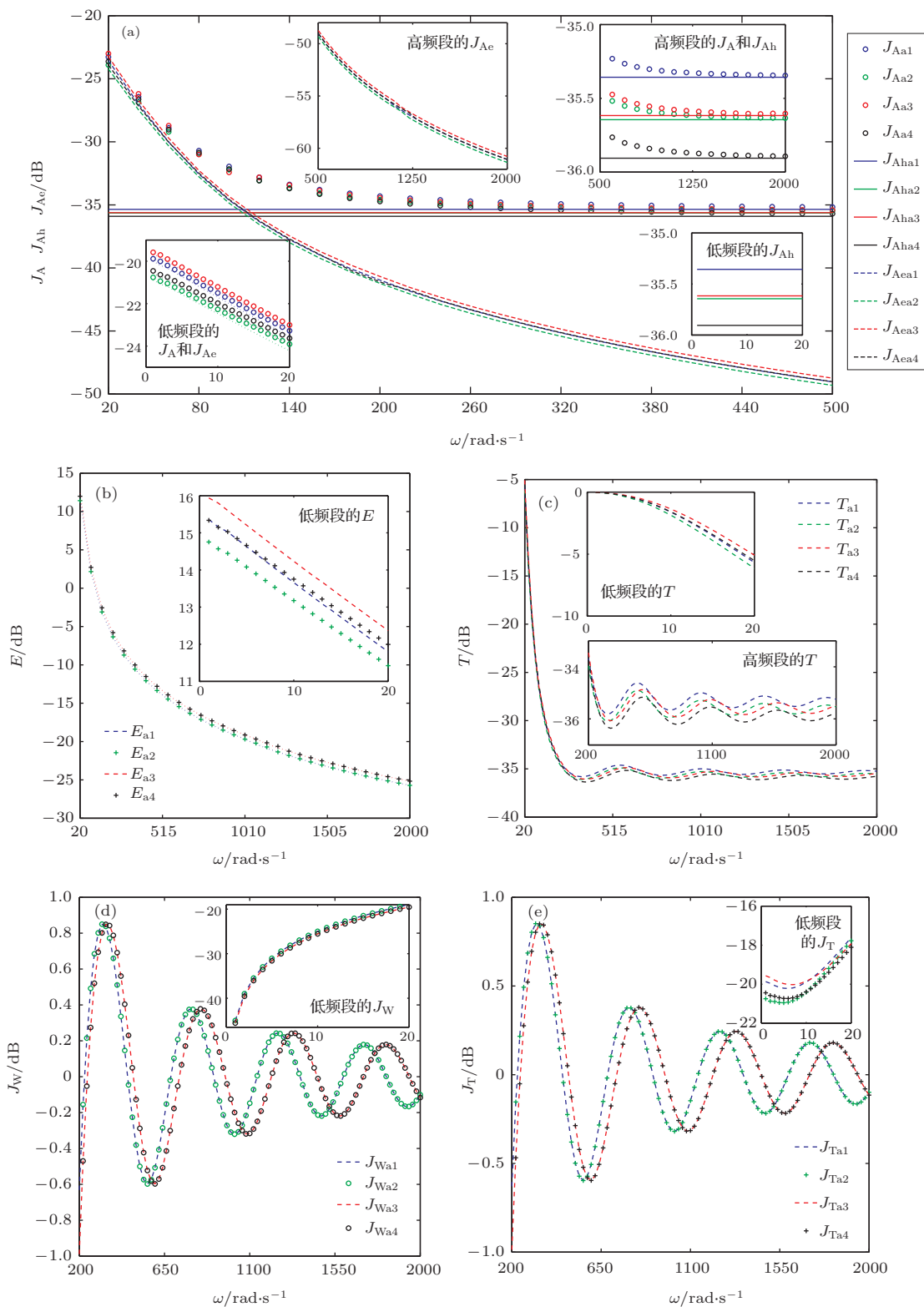


图2 (网刊彩色) 不同温度下低频声透射参数随角频率的变化关系

Fig. 2. (color online) Variation of low frequency sound transmission parameter with angular frequencies and temperatures.

增加迅速减小, J_A 和 J_{Ae} 与海温正相关、气温负相关, J_A 逼近 J_{Ae} ; 在高频段 J_A 与温度负相关, 并逼近 J_{Ah} . 图2(b)—图2(c)表明, 在低频段, 声功率比 E 和透射率 T 与气温负相关、海温正相关; 在高

频段, E 随频率增加而减小, 受气温影响不显著、与海温正相关, T 随频率增加在 -35.5 dB 左右波动, 与海温、气温负相关. 图2(d)—图2(e)表明, 在低频段, J_W 随频率增加而增大, 受温度影响不明

显; J_T 随频率升高先减小后增大, J_T 与气温负相关、与海温正相关; 在高频段, J_W 和 J_T 随频率增加在 0 dB 上下衰减性振荡, 受气温影响不显著, 与海温的关系随着频率增加在正负相关间近似周期性变化.

图 3(a)—图 3(c) 表明, 海中声波透射到大气中的声功率 J_A 、声功率比 E 、透射率 T 随海温升高而增大、随气温升高而减小; 图 3(d) 表明, 海中声传播功率 J_W 随海温升高而减小, 受气温变化影响不显著.

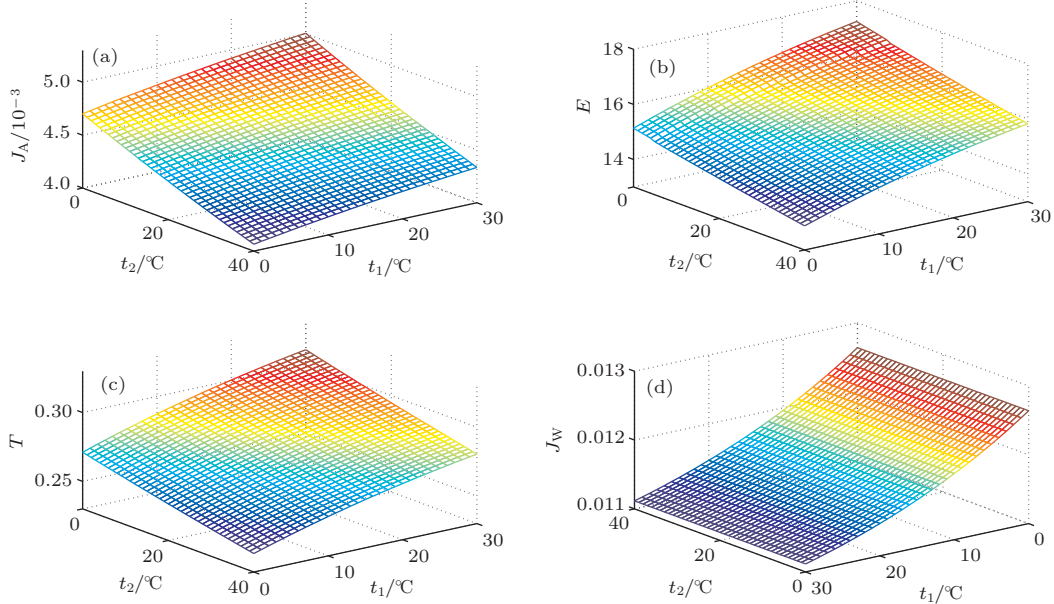


图 3 (网刊彩色) $\omega = 20 \text{ rad/s}$ 时, 低频声波透射参数随温度变化

Fig. 3. (color online) Low frequency sound transmission parameters in different temperatures at $\omega = 20 \text{ rad/s}$.

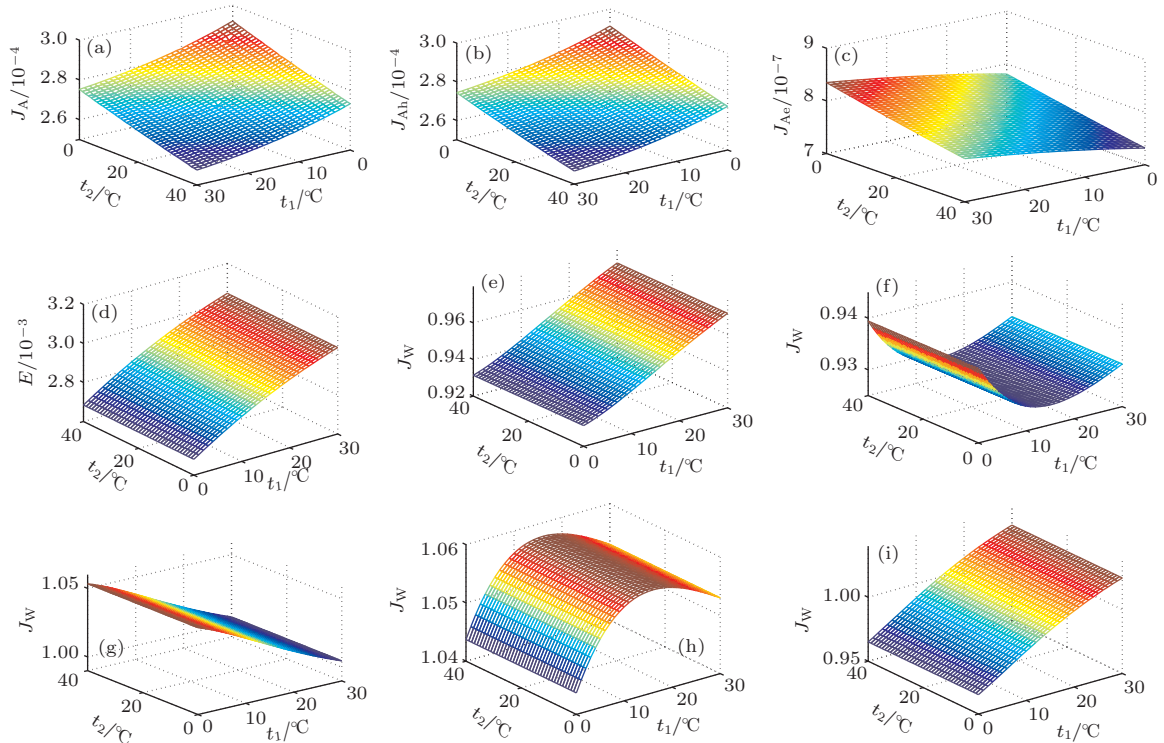


图 4 (网刊彩色) 不同温度高频下声波透射规律 (a)—(d) $\omega = 2000 \text{ rad/s}$; (e) $\omega = 1000 \text{ rad/s}$; (f) $\omega = 1060 \text{ rad/s}$; (g) $\omega = 1220 \text{ rad/s}$; (h) $\omega = 1300 \text{ rad/s}$; (i) $\omega = 1420 \text{ rad/s}$

Fig. 4. (color online) Higher frequency sound transmission rule in different temperatures: (a)—(d) $\omega = 2000 \text{ rad/s}$; (e) $\omega = 1000 \text{ rad/s}$; (f) $\omega = 1060 \text{ rad/s}$; (g) $\omega = 1220 \text{ rad/s}$; (h) $\omega = 1300 \text{ rad/s}$; (i) $\omega = 1420 \text{ rad/s}$.

图 4(a)—图 4(c) 表明, 海中声波透射到大气中的声功率 J_A 与海中平面波透射到大气中的声功率 J_{Ah} 与温度负相关, J_A 与 J_{Ah} 接近; 海中倏逝波透射到大气中的声功率 J_{Ae} 与气温负相关、海温正相关; 图 4(d) 表明, 海中倏逝波与平面波透射到大气中声功率比 E 与海温正相关、受气温变化影响不显著; 图 4(e)—图 4(i) 表明, 海中声传播功率 J_W 受气温影响不显著, 与海温的正负相关性随频率增加而呈近似周期性转换。

图 5(a) 和图 5(b) 表明, 透射到大气中的声

功率级 J_A 、透射率 T 和声功率比 E 随波数增加而减小, 但 T 有不稳定的波动; 波数 k_1 很小 ($-k_1 z_0 < 0.1$) 时, J_A , T , E 与海温正相关、气温负相关; 波数 k_1 较大 ($-k_1 z_0 \geq 0.1$) 时, J_A , T 与温度负相关, E 受温度影响不显著. 图 5(c) 和图 5(d) 表明, 海中声传播功率 J_W 和总声功率 J_T 随波数增加迅速上升到 0 dB 附近维持微幅波动, 受温度影响不显著, 但 J_T 在波数 k_1 很小 ($-k_1 z_0 < 0.1$) 时随波数增加先减小后增大, 与气温负相关、海温正相关。

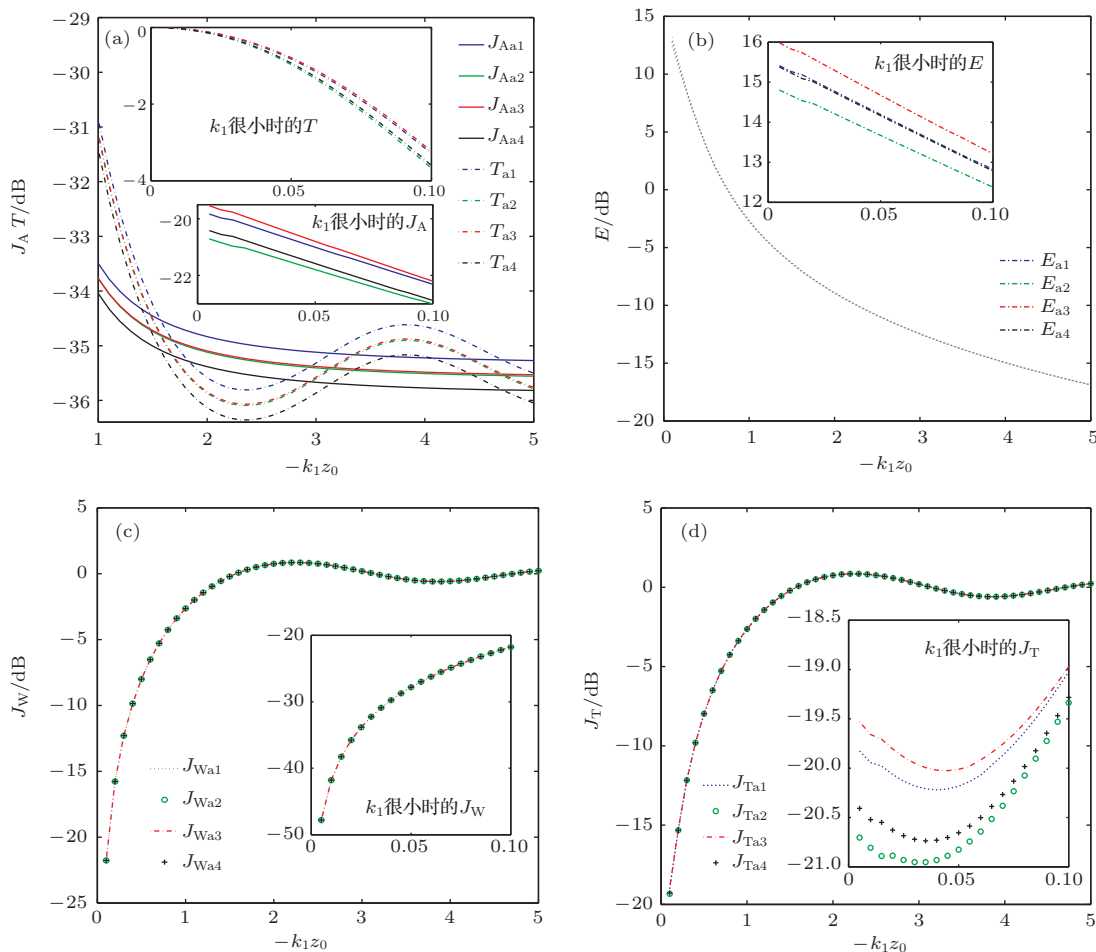


图 5 (网刊彩色) 不同温度下声透射参数随波数 k_1 变化关系

Fig. 5. (color online) The relationship between the sound transmission parameters under different temperatures with the wave number k_1 .

4.2 偶极子声源低频声透射受温度的影响

类似单极子声源, 海中水平偶极子和垂直偶极子声源的声透射也有类似的规律, 如图 6 所示。

图 6(a) 和图 6(b) 表明, 海中声波透射到大气中的声功率 J_A 和声功率比 E 随着频率增加而减小, 在低频段内与海温正相关、气温负相关, 在高频段内 J_A 与温度负相关, E 与海温正相关、受气温影

响不明显; 垂直偶极子声源的 J_A 略高于水平偶极子, 垂直偶极子声源的 E 小于水平偶极子. 图 6(c) 表明, 水平偶极子声源的透射率 T 随着频率增加而下降至 -36 — -37 dB 间保持稳定, 而垂直偶极子声源的 T 随着频率增加而下降到 -33 dB 左右呈波动状态; 在低频段内 T 与气温负相关、海温正相关, 水平偶极子声源的 T 略高于垂直偶极子; 在高频段内

水平偶极子声源的 T 与温度负相关, 垂直偶极子声源的 T 与气温负相关、与海温在正负相关间转换, 垂直偶极子声源的 T 略高于水平偶极子. 图 6(d) 表明, 水平偶极子声源的 J_W 随频率增加迅速上升到 0 dB 保持一定, 垂直偶极子声源的 J_W 随频率增加先下降后上升保持在 0 dB 左右, 但有较大波动;

低频段水平偶极子声源的 J_W 受气温影响不显著、与海温负相关, 垂直偶极子声源的 J_W 受气温影响不显著、与海温正相关; 在高频段内垂直与水平偶极子的 J_W 保持在 0 dB 上下波动, 受气温影响不显著, 但随着频率增加 J_W 与海温在正负相关间近似周期性变化.

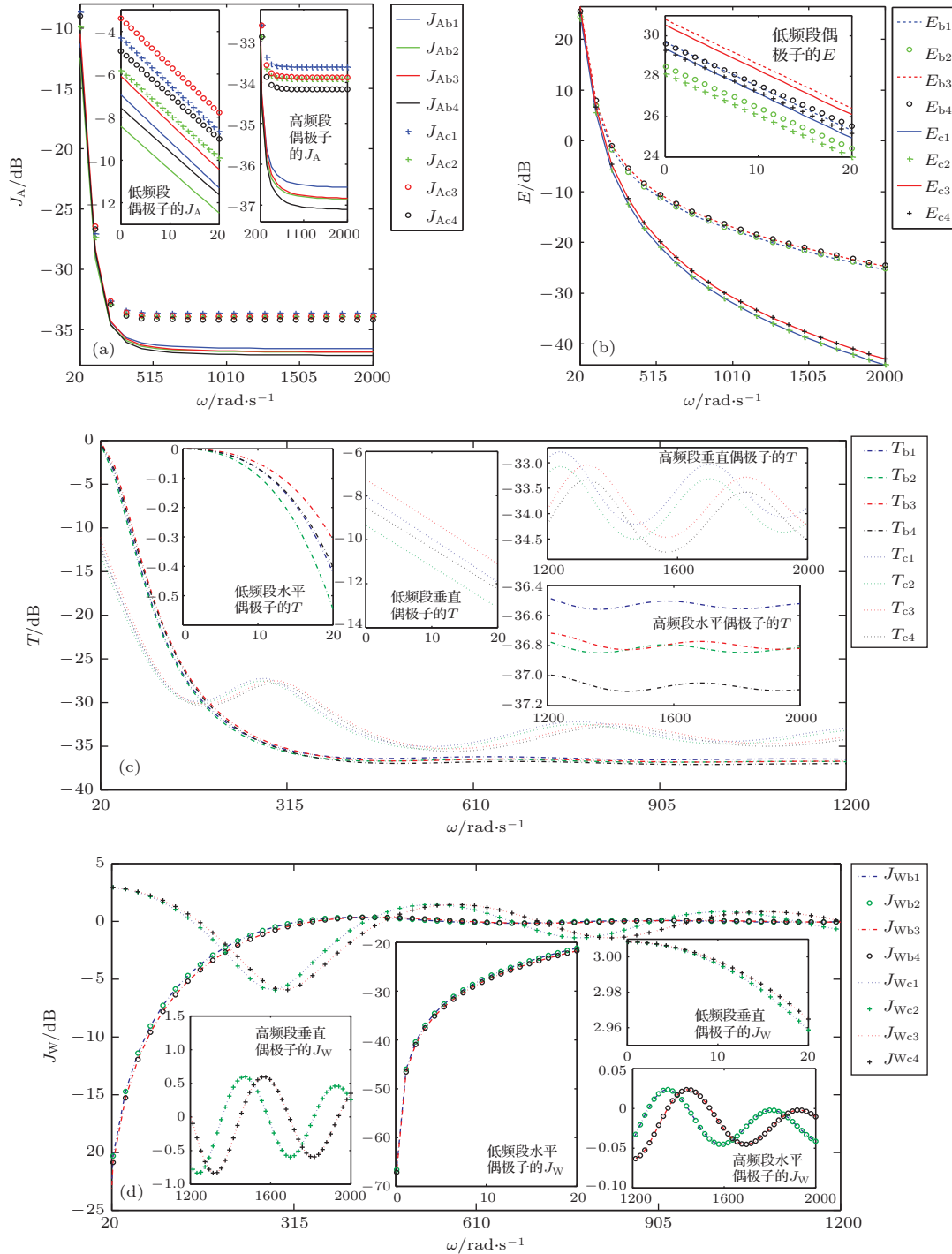


图 6 (网刊彩色) 不同温度下不同声源的低频声透射参数与频率关系

Fig. 6. (color online) Relationship between low frequency sound transmission parameters under different temperatures and frequencies.

4.3 声透射指向性受温度的影响

海中均匀平面波在海-气界面折射区间为 $[0, \delta]$ 、倏逝波折射区间为 $[\delta, \pi/2]$. 海中声波向大气中透射指向性 $D(\theta_2)$ 与海中声波在海-气界面折射角 θ_2 有关, $\theta_2 \in [0, \pi/2]$; 单极子、水平偶极

子、垂直偶极子声源的指向特性分别记为 $D_{aj}(\theta_2)$, $D_{bj}(\theta_2)$, $D_{cj}(\theta_2)$, $j = 1, 2, 3, 4$ 分别表示第 4.1 节所述四种温度情况, 且 $\delta_3 < \delta_1 < \delta_4 < \delta_2$. 不同温度大气中声透射指向性 D 和折射角 θ_2 的关系, 如图 7 所示.

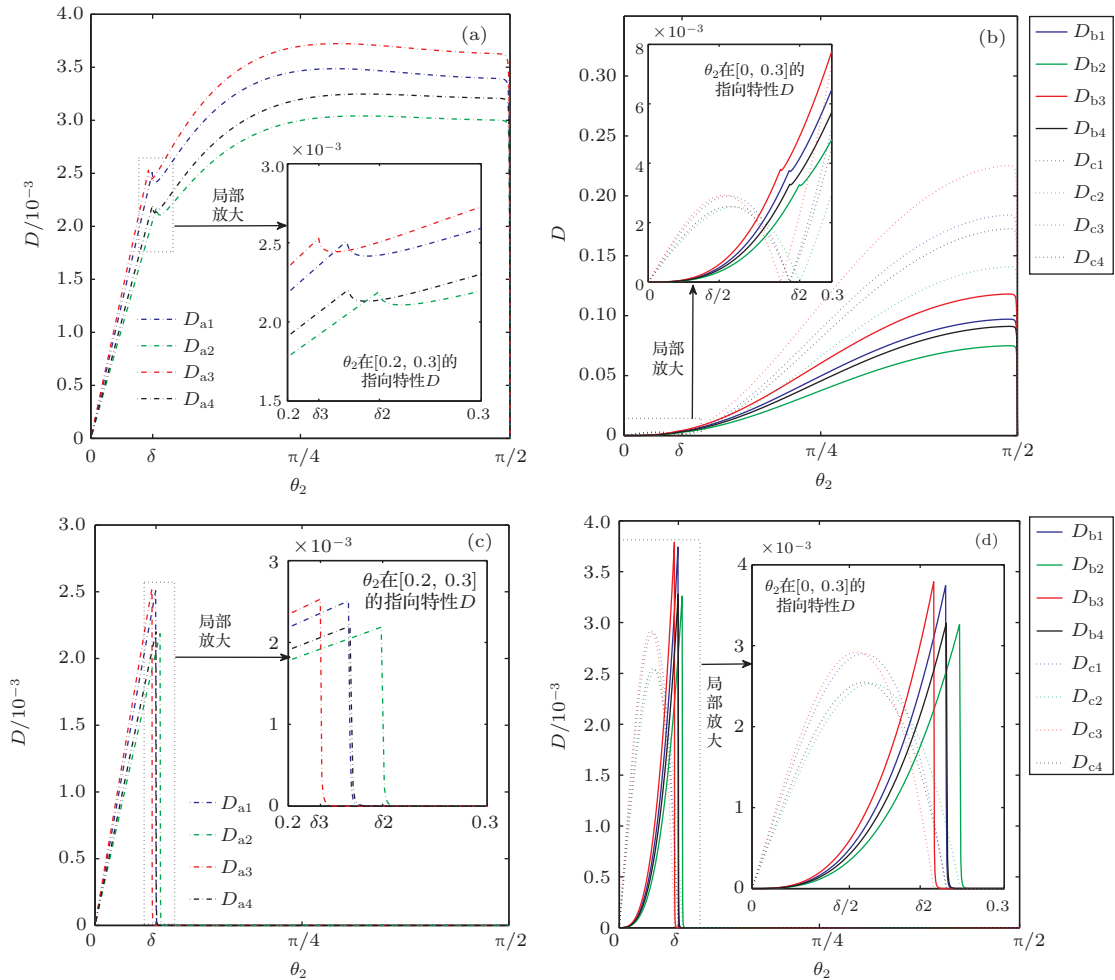


图 7 (网刊彩色) 不同温度大气中声传输指向性 D 和折射角 θ_2 的关系 (a), (b) $\omega = 20$ rad/s; (c), (d) $\omega = 2000$ rad/s
 Fig. 7. (color online) The relationship between sound transmission directivity D at different temperatures and the refraction angle θ_2 in the atmosphere: (a), (b) $\omega = 20$ rad/s; (c), (d) $\omega = 2000$ rad/s.

图 7(a) 表明, 在 $\omega = 20$ rad/s 时海中单极子声源的平面波透射指向性随折射角 θ_2 的增大而增强, 但在临界角 δ 处局部极大; 而海中倏逝波透射指向性在 $\theta_2 = \delta^+$ 处小于平面波在 $\theta_2 = \delta$ 处的指向性, 随后随 θ_2 的增大而增强, 在 $\theta_2 = \pi/2$ 处, 指向性为零, 表明此处无声波透射到大气; 声波透射指向性与海温正相关、气温负相关. 图 7(b) 表明, 在 $\omega = 20$ rad/s 时海中水平偶极子声源与单极子声源的声透射指向性随 θ_2 的变化关系类似, 而垂直偶极子声源的平面波透射指向性在临界角 δ 处为零, 在约 $\delta/2$ 处达最大值, 与温度的正负相关性是交替

变化的; 垂直偶极子声源的倏逝波透射指向性在 $\theta_2 = \delta$ 处也为零, 在 $[\delta, \pi/2]$ 随 θ_2 的增大而增强, 在 $\theta_2 = \pi/2$ 处, 指向性为零, 此时无声波透射至大气中, 且倏逝波透射指向性与海温正相关、气温负相关. 图 7(c) 表明, 在 $\omega = 2000$ rad/s 时海中单极子声源的平面波透射指向性在 $[0, \delta]$ 内随 θ_2 的增大而增强, 在临界角 δ 处达到最大, 与海温正相关、气温负相关; 而倏逝波透射指向性在 $\theta_2 > \delta$ 时变为零, 表明此时已无声波透射到大气中. 图 7(d) 表明, 海中水平偶极子声源与单极子声源的平面波透射指向性随 θ_2 的变化关系类似, 垂直偶极子声源的平

面波透射指向性 $\theta_2 = \delta/2$ 处达最大值, 在 $\theta_2 = \delta$ 处等于零. 与温度正负相关性是交替变化的; 而垂直偶极子声源的声波透射指向性在 $[\delta, \pi/2]$ 内指向性为零, 表明已无倏逝波透射到大气中.

5 海-气界面声透射受湿度、气压与盐度的影响

5.1 海-气界面声透射受湿度的影响

在考虑海洋中声波通过海-气界面透射到大气中声功率受湿度的影响时, 设湿空气的气压为标准大气压, 海温 $t_1 = 10\text{ }^\circ\text{C}$, 盐度 $S = 35\text{‰}$. 将一定气温下低湿度时声透射参数与高湿度时声透射参数之比定义为湿度声透射参数, 这里以湿度声功率 J_{AH} 、湿度声透射率 T_H 与湿度声功率比 E_H 作为

衡量湿度对声透射影响的参数. 气温 t_2 和湿度 H 依次为 $t_2 = 0\text{ }^\circ\text{C}, H = 0$; $t_2 = 0\text{ }^\circ\text{C}, H = 100\%$; $t_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}, H = 0$; $t_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}, H = 100\%$; J_{AH}, T_H, E_H 在湿度减小时与频率的关系, 如图 8 所示.

图 8(a)—图 8(c) 与图 8(d)—图 8(f) 分别对应气温为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 与 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时的数值模拟. 由图可知: 1) 在 $\omega = 0\text{--}200\text{ rad/s}$ 内 J_{AH}, T_H 值均大于 0 dB , 透射到大气中的声功率、透射率与湿度负相关, 但单极子与水平偶极子声源的 T_H 随频率增加先从 0 dB 很快上升到某一极大值后缓慢下降, 并保持稳定值; E_H 值在很低频段内大于 0 dB , 随着频率增加 E_H 略小于 0 dB , 且保持稳定值; 2) 在相同空气湿度的条件下, 高气温时 J_{AH}, T_H, E_H 的值大于低气温时的值, 也就是高气温时透射到大气中的声功率受湿度影响更大.

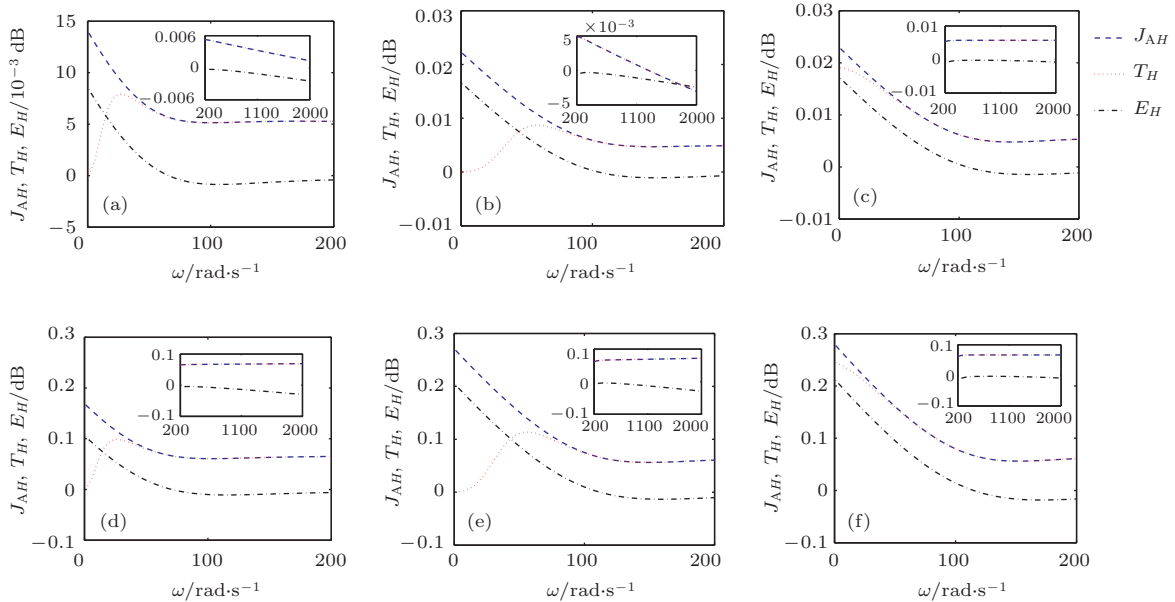


图 8 J_{AH}, T_H, E_H 在湿度减小时与频率的关系 (a) 单极子; (b) 水平偶极子; (c) 垂直偶极子; (d) 单极子; (e) 水平偶极子; (f) 垂直偶极子

Fig. 8. J_{AH}, T_H and E_H with the frequency relationship in the humidity decreases: (a) monopole; (b) horizontal dipole; (c) vertical dipole; (d) monopole; (e) horizontal dipole; (f) vertical dipole.

5.2 海-气界面声透射受大气压的影响

在考虑海中声波通过海-气界面透射到大气中的声功率受大气压的影响时, 假定气温与海温均为 $10\text{ }^\circ\text{C}$, 海洋盐度 $S = 35\text{‰}$, 大气为干空气 ($H = 0$). 在温湿度和盐度一定时, 将高气压时声透射参数与低气压时声透射参数之比定义为气压声透射参数, 这里分别用气压声功率 J_{AP} 、气压声透射率 T_P 与气压声功率比 E_P 表示大气压变化对

声透射的影响. 现考虑大气压由 $P_2 = 970\text{ hPa}$ 上升为 $P_2 = 1050\text{ hPa}$ 时对声透射的影响. 单极子与偶极子声源的 J_{AP}, T_P, E_P 在大气压升高时与频率的关系如图 9 所示.

图 9 表明, 海中声波透射到大气中的声功率 J_A 、透射率 T 与气压正相关; 在低频段内 T 与气压正相关性随频率增加而变强, 在高频段内保持恒定; 声功率比 E 受气压影响不显著.

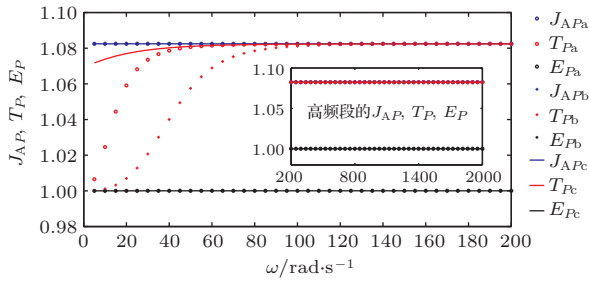


图9 (网刊彩色) J_{AP} , T_P , E_P 在大气压升高时与频率的关系

Fig. 9. (color online) The relationship between J_{AP} , T_P , E_P and the frequency at atmospheric pressure increases.

5.3 海-气界面声透射受盐度的影响

现模拟海中声波通过海-气界面透射到大气中的声功率受盐度的影响. 在干空气、标准大气压、气温 $t_2 = 15\text{ }^\circ\text{C}$ 下, 将低盐度时声透射参数与高盐度时声透射参数之比定义为盐度声透射参数, 这里分别用盐度声功率 J_{AS} 、盐度声透射率 T_S 、盐度声功率比 E_S 与海中盐度声功率 J_{WS} 来衡量表示盐度变化对声透射的影响. 在海温 t_1 和盐度 S 依

次为 $t_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}$, $S = 0\text{‰}$; $t_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}$, $S = 40\text{‰}$; $t_1 = 30\text{ }^\circ\text{C}$, $S = 0\text{‰}$; $t_1 = 30\text{ }^\circ\text{C}$, $S = 40\text{‰}$ 时; J_{AS} , T_S , E_S 和 J_{WS} 在海水盐度降低时与频率的关系如图 10 所示.

图 10 (a)—图 10 (c) 和图 10 (d)—图 10 (f) 分别是海温 $t_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ 和海温 $t_1 = 30\text{ }^\circ\text{C}$ 时 J_{AS} , T_S , E_S 和 J_{WS} 在海水盐度降低时与频率的关系. 图 10 表明, 海中单极子声源透射到大气中声功率 J_A 与盐度负相关, 透射率 T 在低频段与盐度正相关、高频段与盐度负相关, 水平偶极子声源的 J_A , T 在低频段与盐度正相关、高频段内与盐度负相关, 但高频段单极子与水平偶极子的 T 随频率增加与盐度的负相关呈波动状态; 垂直偶极子声源的 T 和 J_A 与盐度的正负相关性随频率增加而波动; 海中单极子和水平偶极子声源的海中声传播功率 J_W 在低频段与盐度负相关, 在高频段时与盐度的正负相关性随频率增加而波动, 而垂直偶极子声源的 J_W 在低频段与盐度正相关, 在 $\omega = 0\text{—}2000\text{ rad/s}$ 内与盐度的正负相关性随频率增加而波动; 声功率比 E 在 $\omega = 0\text{—}2000\text{ rad/s}$ 内与盐度正相关; 海温升高时, 声透射受盐度的影响减弱.

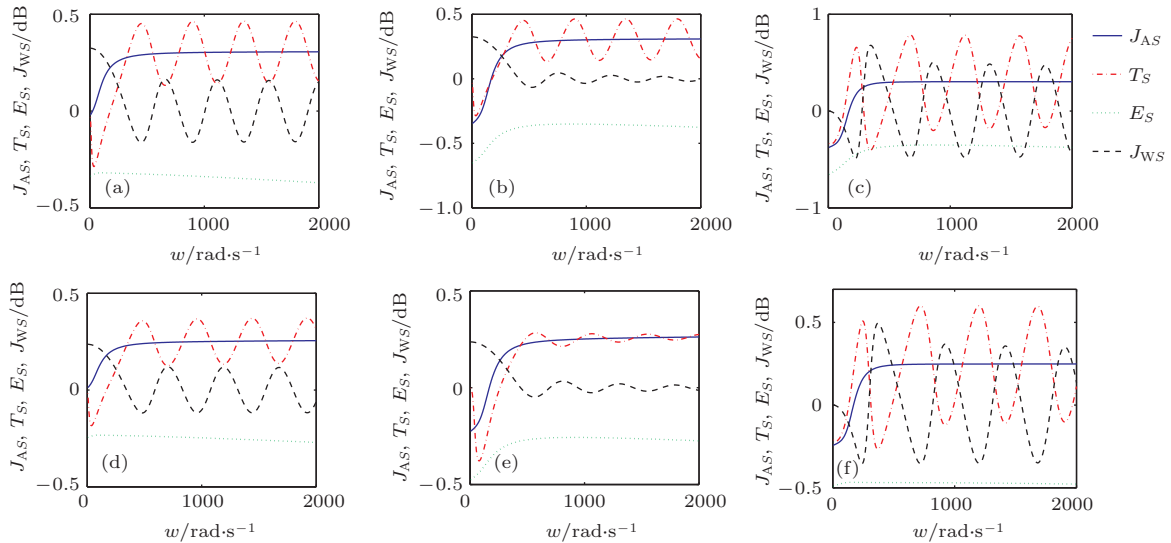


图 10 (网刊彩色) J_{AS} , T_S , E_S 和 J_{WS} 在海水盐度降低时与频率的关系 (a) 单极子; (b) 水平偶极子; (c) 垂直偶极子; (d) 单极子; (e) 水平偶极子; (f) 垂直偶极子

Fig. 10. (color online) The relationship between J_{AS} , T_S , E_S and J_{WS} in sea water salinity decreases and frequency: (a) monopole; (b) horizontal dipole; (c) vertical dipole; (d) monopole; (e) horizontal dipole; (f) vertical dipole.

6 各种环境因素对低频声透射影响的比较

为比较各种环境因素对海-气界面低频声透射的影响程度, 以海中声波透射到大气中的声功率、

透射率和声功率比为衡量指标, 以气温 $t_2 = 15\text{ }^\circ\text{C}$ 、海温 $t_1 = 15\text{ }^\circ\text{C}$ 、大气压 $P_2 = 1013.25\text{ hPa}$ 、湿度 $H = 50\%$ 、盐度 $S = 25\text{‰}$ 为参照系, 气温、或海温、或气压、或湿度、或盐度增到某一值, 海中声波透射到大气中的声功率 J_A 、透射率 T 和声功率比 E 的相对增量 (绝对值) 分别用 J_{AR} , T_R , E_R 表示.

J_{AR}, T_R, E_R 加下标 1, 2, 3, 4, 5 分别表示气温上升 10 °C、海温上升 10 °C、气压上升 10 hPa、相对湿度增加 10%、盐度增加 10‰ 时的相对增量. 在 5 种环境因素中, 其中 4 个因素不变, 一个增大 10 个单位时, 在给定频段内的平均相对增量值 $\bar{J}_{AR}, \bar{T}_R, \bar{E}_R$, 如表 1 所列.

表 1 表明, 在低频段内, 海中声波辐射到大气中的声功率 J_A 受气温影响后平均相对增量最大, 说明 J_A 受气温影响最大; 其次是海温和盐度, 受气压和湿度影响较小, 而单极子声源的 J_A 受盐度影

响最小、偶极子声源的 J_A 受湿度影响最小; 垂直偶极子声源的 J_A 受环境因素影响最大、单极子声源的 J_A 受环境因素影响最小. 声透射率 T 受海温影响最大, 其次是气温、盐度和气压, 受湿度影响最小, 垂直偶极子的 T 受环境因素影响最大、水平偶极子的 T 受环境因素影响最小. 声功率比 E 受海温影响最大, 其次是气温、盐度和湿度, 受气压影响最小; 垂直偶极子声源的 E 受环境因素影响最大、单极子声源的 E 受环境因素影响最小.

表 1 不同声源声透射受各环境因素影响的平均相对增量比较

Table 1. Average relative increment of influence of environmental factors on the different sound source sound transmission.

平均相对增量	单极子		水平偶极子		垂直偶极子	
	$\omega = 0 -$	$\omega = 20 -$	$\omega = 0 -$	$\omega = 20 -$	$\omega = 0 -$	$\omega = 20 -$
	20 rad/s	2000 rad/s	20 rad/s	2000 rad/s	20 rad/s	2000 rad/s
\bar{J}_{AR1}	0.0457	0.0177	0.0786	0.0178	0.0814	0.0190
\bar{J}_{AR2}	0.0206	0.0149	0.0603	0.0165	0.0637	0.0183
\bar{J}_{AR3}	0.0099	0.0099	0.0099	0.0099	0.0099	0.0099
\bar{J}_{AR4}	0.0008	0.0006	0.0013	0.0014	0.0013	0.0004
\bar{J}_{AR5}	0.0003	0.0140	0.0155	0.0133	0.0168	0.0143
\bar{T}_{R1}	0.0141	0.0176	0.0020	0.0172	0.0737	0.0190
\bar{T}_{R2}	0.0187	0.0190	0.0023	0.0200	0.0567	0.0373
\bar{T}_{R3}	0.0032	0.0099	0.0002	0.0097	0.0089	0.0099
\bar{T}_{R4}	0.0002	0.0006	0	0.0014	0.0012	0.0004
\bar{T}_{R5}	0.0049	0.0141	0.0007	0.0139	0.0150	0.0166
\bar{E}_{R1}	0.0294	0.0053	0.0620	0.0058	0.0645	0.0030
\bar{E}_{R2}	0.0397	0.0406	0.0787	0.0461	0.0818	0.0785
\bar{E}_{R3}	0	0	0	0	0	0
\bar{E}_{R4}	0.0004	0.0001	0.0009	0.0001	0.0010	0
\bar{E}_{R5}	0.0160	0.0164	0.0314	0.0186	0.0326	0.0313

7 结 论

本文利用两层媒质声透射模型, 研究并数值模拟分析了环境因素对海洋浅层静止声源在海-气界面低频异常声透射的影响. 研究表明: 1) 低频声透射到大气中的声功率与气温、湿度负相关, 与海温、气压正相关; 偶极子声源辐射到大气中的声功率与盐度正相关, 而单极子声源辐射到大气中的声功率与盐度相关性不显著; 2) 低频声透射率和声功率比

与海温、盐度正相关, 与气温、湿度负相关; 声透射率与气压正相关, 而声功率比与气压相关性不显著; 3) 单极子与水平偶极子声源低频时在海中的声传播功率与海温、盐度负相关, 而垂直偶极子声源辐射到海中的声功率与海温、盐度正相关; 4) 低频时在折射角小于临界角的一段区间外, 声透射指向性与海温正相关、气温负相关; 而在折射角小于临界角的一段区间内, 单极子与垂直偶极子声源指向性与温度的正负相关性是变化的, 而水平偶极子声源与海温正相关、气温负相关是不变的; 5) 低频声

透射受温度影响最大,其次是盐度,受气压和湿度的影响较小,垂直偶极子声源的声透射受温度影响大于水平偶极子声源和单极子声源.

本文仅讨论了两层媒质低频异常声透射且只考虑了海洋中静止声源的声辐射,下一步将利用两层媒质低频声透射模型研究海中运动声源低频声透射特性受环境因素的影响.

参考文献

- [1] Pierce A D 1994 *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications* (New York: AIP) pp134–135
- [2] Godin O A 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **123** 1866
- [3] Godin O A 2008 *Contemp. Phys.* **49** 105
- [4] Chapman D M F 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **124** 48
- [5] Godin O A 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 117
- [6] Glushkov E V, Glushkova N V, Godin O A 2013 *Acoust. Phys.* **59** 6
- [7] Luo W Y, Yang C M, Qin J X, Zhang R H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 054301
- [8] Fuks I, Godin O A 2011 *Oceans'11 MTS/IEEE Conference Proceedings* Kona Hawaii, America, September 19–22, 2011 p1
- [9] 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]
- [10] Yang C M, Luo W Y, Zhang R H, Qin J X 2014 *Acta Acust.* **39** 295 (in Chinese) [杨春梅, 骆文于, 张仁和, 秦继兴 2014 声学学报 **39** 295]
- [11] Godin O A, Fuks I M 2012 *J. Fluid Mech.* **709** 313
- [12] Qi Y B, Zhou S H, Zhang R H, Zhang B, Ren Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 044303 (in Chinese) [戚聿波, 周士弘, 张仁和, 张波, 任云 2014 物理学报 **63** 044303]
- [13] Godin O A 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 164301
- [14] McDonald B E, Calvo D C 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **122** 3159
- [15] Godin O A 2007 *Acoust. Phys.* **53** 305
- [16] Lü J, Zhao Z Y, Zhou C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104301 (in Chinese) [吕君, 赵正予, 周晨 2011 物理学报 **60** 104301]
- [17] Zhou C, Wang X, Zhao Z Y, Zhang Y N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154302 (in Chinese) [周晨, 王翔, 赵正予, 张援农 2013 物理学报 **62** 154302]
- [18] Voloshchenko A P, Tarasov S P 2013 *Acoust. Phys.* **59** 163
- [19] Deng Y Q, Tao J C, Qiu X J 2011 *Tech. Acoust.* **30** 83 (in Chinese) [邓怡情, 陶建成, 邱小军 2011 声学技术 **30** 83]
- [20] Deng Y, Tao J, Qiu X 2012 *J. Sound. Vib.* **331** 4481
- [21] Deng Y Q 2013 *M. S. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University) (in Chinese) [邓怡情 2013 硕士学位论文 (南京: 南京大学)]
- [22] Liu Y K, Wang Y 2014 *Oceans'14 MTS/IEEE Conference Proceedings* Taipei, Taiwan, April 7–10, 2014 p1
- [23] Sheng P X, Mao J T, Li J G, Zhang A C, Sang J G, Pan N X 2003 *Atmospheric Physics* (Beijing: Peking University Press) pp19–24, 488 (in Chinese) [盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 张霭琛, 桑建国, 潘乃先 2003 大气物理学 (北京: 北京大学出版社) 第19–24, 488页]
- [24] Feng S Z, Li F Q, Li S J 1999 *An Introduction to Marine Science* (Beijing: Higher Education Press) pp67–69 (in Chinese) [冯士筌, 李凤岐, 李少菁 1999 海洋科学导论 (北京: 高等教育出版社) 第67–69页]
- [25] Chen C T, Millero F J 1977 *J. Acoust. Soc. Am.* **62** 1129
- [26] Millero F J, Li X 1994 *J. Acoust. Soc. Am.* **95** 2757

Influences of environmental factors on low frequency abnormal sound transmission through sea-air interface*

Guo Ye-Cai^{1)2)†} Lian Chen-Fang³⁾ Zhang Xiu-Zai¹⁾²⁾ Zhao Yi-Bo¹⁾²⁾

1) (*Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

2) (*Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAET), Nanjing 210044, China*)

3) (*College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

(Received 1 November 2014; revised manuscript received 19 January 2015)

Abstract

In view of low frequency abnormal sound transmission of sound source in the sea at the sea-air interface, according to the two-layer medium sound transmission model, we analyze the relationships of the sound speed and the density of the atmosphere with the atmospheric pressure, the air temperature, the humidity; we also analyze the relationships of the sound velocity and the density of seawater with the sea surface temperature (SST) and salinity; we investigate the low-frequency abnormal sound transmissions influenced by temperature, pressure, salinity, humidity and other environmental factors; we analyze the influences of various factors on the sound transmission. The obtained results are as follows. 1) the sound power in the air, obtained by the sound transmission of sound source in the shallow sea, is negatively correlated with atmospheric temperature and humidity, and positively correlated with the SST, salinity, and atmospheric pressure. 2) The sound power that is radiated into the sea by the monopole and horizontal dipole source at the sea, is negatively correlated with SST and salinity, while the sound power that is radiated into the sea by the vertical dipole sound source, is positively related to SST and salinity. 3) The sound transmission directivity is positively related to SST and negatively correlated with atmospheric temperature. 4) The air temperature and SST have the greatest influence on low-frequency abnormal sound transmission, while the effects of air pressure and humidity on them are smaller than that of salinity. The effect of temperature on the low frequency abnormal sound transmission of vertical dipole sound is greater than those of the horizontal dipole and a monopole sound source.

Keywords: abnormal low frequency sound transmission, sea-air interface, sound power, environmental factors

PACS: 43.30.Es, 43.28.Js, 43.28.+h, 43.30.+m

DOI: 10.7498/aps.64.144301

* Project supported by the Special Fund Projects of National Excellent Doctoral Dissertation of China (Grant No. 200753), the Major Project of Nature Science Foundation of Higher Education Institution of Jiangsu Province, China (Grant No. 13KJA510001), Jiangsu Scientific Research Achievements in Industrialization Project, China (Grant No. JHB 2012-9), the Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, China, “the Peak of Six Major Talents” (Grant No. 2008026), and the Cultivate Projects of Jiangsu Province, China (Grant No. SJZZ_0110, SJZZ_0111).

† Corresponding author. E-mail: guo-yecai@163.com