

doi: 10.11720/wtyht.2023.1366

杜焱镜,孙成禹,王志农,等.海水层对地震反射特征的影响研究[J].物探与化探,2023,47(3):757-765. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1366>

Du Y J, Sun C Y, Wang Z N, et al. Effects of seawater layer on seismic reflection characteristics[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 757-765. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1366>

海水层对地震反射特征的影响研究

杜焱镜,孙成禹,王志农,蔡瑞乾,王升荣,焦峻峰

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580)

摘要:在海洋地震勘探中,地震反射特征对于 AVO 分析、海底参数反演以及构造分析等具有重要作用。地震波在海洋中传播,其产生的地震反射特征受到海水层和海底以下沉积物的综合影响,但目前业界主要针对海底以下沉积物对地震反射特征的影响开展研究,关于海水层对地震反射特征影响的研究较少。本文主要研究地震波在海水层中传播时地震波场的变化特征,首先从流体—固体分界面和自由界面的边界条件出发,推导出弹性界面入射和反射时的 P-P 振幅比,得到海水层效应的数学表达式。然后分析入射波频率、海水层深度、海底阻抗差和入射角等因素对海水层滤波效应的影响,分析结果表明:海水层对于地震 P 波具有周期性的选频滤波效应;选频滤波效应的周期与入射波频率和海水层深度成反比,与入射角成正比;入射角越大,地震 P 波衰减越严重;阻抗差对振幅的影响与入射波频率和海水层深度有关。最后利用数值模拟验证了海水层对地震反射特征的影响。

关键词:海水层;地震反射特征;P-P 波反射系数;选频滤波

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)03-0757-09

0 引言

近年来,随着能源需求的增大,海洋油气资源的勘探和开发得到学界和工业界的重视^[1-2],海洋地震勘探也随之发展。地震波在海水层中传播时,海水层和海底沉积物会对其反射、透射、折射产生一定的影响,具体表现在地震反射特征上。

在海洋地震勘探中,由于海水层不能传播剪切波,地下反射回来的转换 S 波又转换成 P 波,使得海水层中检波器接收到的地震波场与陆上地震波场存在差异。鉴于此,学者们对于海洋勘探中的地震反射做了很多研究。Amundsen 等^[3-4]基于矩阵的特征值分析方法提出了一种将地震波场分解成上行波和下行波的算法,并用于海底 S 波速度估计。Badiery 等^[5-6]将海底平面波的传播矩阵方法与蒙特卡罗模拟相结合,研究了海底沉积物对反射系数的影

响。Denneman 等^[7]通过反射系数和透射系数的表达式研究了多孔介质界面处的波特性。阮爱国等^[8]对海底天然气水合物层状结构进行分析,模拟海底反射层的地震反射特征。Chen 等^[9]基于多相孔隙弹性理论研究了含气海洋沉积层界面上的反射特征。郑广学等^[10]利用非线性反演方法的贝叶斯反演获取海底声学参数。学者们对于海底沉积物对地震反射特征的影响做了很多研究,为海底弹性参数的反演奠定了理论基础。

海底界面对于地震反射特征同样有着重要影响,张海刚^[11]基于海底界面得到了声波传播模拟的统一抛物方程表示,并利用有限差分法进行了数值求解。Liu 等^[12]通过级数截断方法推导出 P 波反射系数的近似值。Liu 等^[13]推导了海底界面 P 波反射系数的非线性解析表达式,但表达式在入射角为临界角时不可用。Zhang 等^[14]着眼于海底临界角,研究了反射和透射系数的变化特点,丰富了深海勘探

收稿日期:2022-08-02;修回日期:2023-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目“基于石油勘探面波与 P—导波的近地表纵横波速度一体化反演”(42174140)、“深度偏移地震数据特征剖析与深度域直接反演方法研究”(41874153)

第一作者:杜焱镜(1998-),女,硕士在读,主要研究方向为地震波传播理论研究、面波正演及参数反演。Email:732744916@qq.com

通讯作者:孙成禹(1968-),男,教授,博士生导师,主要从事地震勘探方面的教学和科研工作。Email:suncy@upc.edu.cn

的理论依据。刘洋廷^[15]主要着眼于海水与海底交界面,推导出了求取海底反射系数与透射系数的公式,完成了海底固体弹性参数反演。

此外,对于海底多分量记录中的地震反射特征,学者们也做了很多工作。王维佳^[16]研究了海底多分量对弹性波的接收特性,为海洋勘探中的弹性波分析提供了基础。顾汉明等^[17]在频率—波数域递推计算了海底多分量地震记录中的反射系数,为弹性参数的反演提供了基础数据。

考虑到海水层对波传播过程的影响,罗夏云等^[18]基于 Pekeris 海洋声场模型给出了 Scholte 波频散特征的求解方法,探究环境参数的变化对 Scholte 波传播特性的影响。Chanda 等^[19]研究了弹性海底和多孔板结构对反射透射系数的影响,发现波的反射表现出震荡行为。学者们的研究点主要集中于海底以下地层和海底与海水交界面,对于海水层对地震反射特征的影响常常不被注意。

在勘探过程中,因为存在海水层、海平面以及海底面,会产生多次波,如层间多次波、鸣震、全程多次波、鬼波等^[20-21]。这些干扰波严重影响了地震资料的质量,为海洋勘探带来不便。研究海水层对地震反射特征的影响有利于地震资料的处理,提高信噪比。同时,地震反射特征对于 AVO 分析、海底参数反演、构造分析、油层地震检测和定量解释以及天然气水合物的勘探等具有重要作用^[22]。因此,为了更精确地描述实际地震波的反射特征,充分利用地震数据中的有用信息,研究海水层对地震反射特征的影响具有重要意义。

本文主要研究海水层对 P 波地震反射特征的影响,采用真空—海水层—弹性固体基底海洋模型,推导出地震波由海水中的激发点传到海底以下和反射波向上透过海底进入海水 2 种情况下的位移振幅方程,得到海水层滤波效应的数学表达式。在此基础上分析了海水层滤波效应的影响因素,并利用数值模拟验证了海水层对地震反射特征的影响。

1 海水层对 P 波反射特征影响的理论研究

本滤波效应,是指海水层以及海面自由面的存在,使得来自地下某界面的反射波在海水中被记录到的结果相对于地下界面真实反射系数而产生的变化。由于海水对入射波和出射波都存在多次反射效应,致使接收到的反射波场振幅和波形都发生变化,产生滤波效应。

地震波在海洋中的传播可以分为 3 个过程:①

由水中的激发点传到海底以下;②在海底以下的固体层中某个界面上完成反射;③反射波向上透过海底进入海水中被接收到。本文主要研究第①和③个问题对地震波传播的滤波效应,从“海水层对下传波场的影响”和“海水层对上传波场的影响”2 个方面展开,以海水面和海底面两界面处的边界条件为基础,推导出这 2 种情况下的位移振幅方程,最后得到海水层滤波效应的数学表达式。

1.1 海水层对下传波场的影响

建立海洋模型,如图 1 所示。假设海平面以上为真空,海平面与海底界面之间为海水层,海底以下为弹性固体。设有来自海面的入射平面 P 波 φ_1 ,入射角为 θ_1 ,在海水层产生反射 P 波 φ_2 和 φ_3 ,反射角分别为 θ_2 和 θ_3 ;在弹性半空间产生透射 P 波 φ_4 和透射 SV 波 ψ_5 ,透射角分别为 θ_4 和 θ_5 。模型中 v_{p1} 为海水中的纵波速度, ρ_1 为海水密度, v_{p2} 为海底固体中的纵波速度, v_{s2} 为海底固体中的横波速度, ρ_2 为海底固体密度。

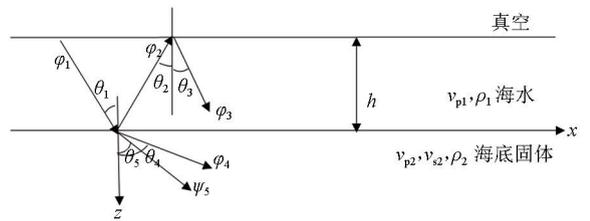


图 1 下传波场的海洋模型

Fig. 1 Ocean model of downstream wavefield

建立坐标系,以海底向右为 x 轴,垂直向下为 z 轴。各层中波函数为:

$$\begin{cases} \varphi^{(1)} = (A_{01}e^{i\omega z r_{p1}} + e^{-i\omega z r_{p1}}) \cdot e^{i\omega(t-px)} \\ \varphi^{(2)} = A_3 e^{-i\omega z r_{p2}} \cdot e^{i\omega(t-px)} \\ \psi^{(2)} = B_3 e^{-i\omega z r_{s2}} \cdot e^{i\omega(t-px)} \end{cases} \quad (1)$$

式中:上标(1)表示海水层,上标(2)表示海底固体层, A_{01} 为上行 P 波的位移振幅,下行入射 P 波的位移振幅为 1, A_3 和 B_3 分别为下行 P 波和 SV 波的位移振幅。以上各式中, ω 为入射波频率, p 为水平慢度; s_{p1} 、 s_{p2} 、 s_{s2} 为水平慢度; r_{p1} 、 r_{p2} 、 r_{s2} 为垂直慢度。

1) 首先考虑海底界面的影响,此界面可以看作是流体—固体分界面,该界面处满足法向应力连续、法向位移连续、切向应力为零的边界条件:

$$\begin{cases} \sigma_{zz}^{(1)}|_{z=0} = \sigma_{zz}^{(2)}|_{z=0}, \\ w^{(1)}|_{z=0} = w^{(2)}|_{z=0}, \\ \tau_{zx}^{(2)}|_{z=0} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

将海水层和海底固体层中的法向应力、法向位移和切向应力^[23]代入边界条件,整理为矩阵形式:

$$P_1 X_1 = B_1, \quad (3)$$

其中:

$$P_1 = \begin{bmatrix} \rho_1 & -\rho_2(1 - 2v_{s_2}^2 p^2) & -2\rho_2 v_{s_2}^2 p r_{s_2} \\ r_{p_1} & r_{p_2} & p \\ 0 & 2v_{s_2}^2 r_{p_2} p & -(1 - 2v_{s_2}^2 p^2) \end{bmatrix}$$

$$X_1 = \begin{bmatrix} A_{01} \\ A_3 \\ B_3 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} -\rho_1 \\ r_{p_1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2)然后再考虑海面的影响,由于海面为自由表面,其边界条件正应力为0,即 $\sigma_{zz}^{(1)}|_{z=-h} = 0$ 。设海水中的波函数为 $\varphi^{(1)} = (A'e^{i\omega z r_{p_1}} + e^{-i\omega z r_{p_1}}) \cdot e^{i\omega(t-px)}$,代入上式边界条件有:

$$A' = -e^{2i\omega h r_{p_1}}, \quad (5)$$

这说明自由界面的反射系数为-1,相位与入射波相差 $e^{-2i\omega h r_{p_1}}$ 。

假设在海平面激发地震波,考虑多次反射波效应,利用上文得到的海底反射系数 A_{01} ,入射波由1变为:

$$1 - A_{01}e^{-2i\omega h r_{p_1}} + A_{01}^2 e^{-4i\omega h r_{p_1}} - A_{01}^3 e^{-6i\omega h r_{p_1}} + \dots =$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ \rho_1 a_{p_1}^{-1} & \rho_1 a_{p_1} & \rho_2(2v_{s_2}^2 p^2 - 1) a_{p_2} & -2\rho_2 v_{s_2}^2 p r_{s_2} a_{s_2} \\ r_{p_1} a_{p_1}^{-1} & -r_{p_1} a_{p_1} & r_{p_2} a_{p_2} & p a_{s_2} \\ 0 & 0 & 2v_{s_2}^2 r_{p_2} p a_{p_2} & (2v_{s_2}^2 p^2 - 1) a_{s_2} \end{bmatrix}$$

$$X_2 = \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_2 \\ B_2 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho_2(1 - 2v_{s_2}^2 p^2) a_{p_2}^{-1} \\ r_{p_2} a_{p_2}^{-1} \\ 2v_{s_2}^2 r_{p_2} p a_{p_2}^{-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: A_{11} 和 A_{12} 分别为上、下行P波的位移振幅, A_2 和 B_2 分别为下行P波和下行SV波的位移振幅,入射P波的位移振幅为1, $a_j = e^{-i\omega h r_j} (j = p_1, p_2, s_2)$ 为延迟因子。

2)然后再考虑海面的影响,由海水层的自由表面效应可知, $\sigma_{zz}^{(1)}|_{z=0} = 0$,即

$$A_{11} + A_{12} = 0, \quad (10)$$

海水中激发和接收均为压力振幅:

$$p = -\rho_1 \omega^2 (A_{11} e^{i\omega z r_{p_1}} + A_{12} e^{-i\omega z r_{p_1}}) e^{i\omega(t-px)}, \quad (11)$$

考虑到入射波和接收波均在同一水层中,系数

$$\frac{1}{1 + A_{01} e^{-2i\omega h r_{p_1}}}, \quad (6)$$

于是,透射振幅变为:

$$t_1 = \frac{A_3}{1 + A_{01} e^{-2i\omega h r_{p_1}}}. \quad (7)$$

1.2 海水层对上传波场的影响

建立海洋模型,如图2所示。来自海底的地震P波 φ_5 ,入射角为 θ_5 ,在弹性半空间产生反射P波 φ_3 和反射SV波 ψ_4 ,反射角分别为 θ_3 和 θ_4 ,在海水层产生透射P波 φ_1 和反射P波 φ_2 ,透射角和反射角分别为 θ_1 和 θ_2 。

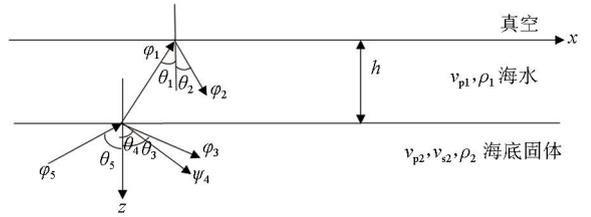


图2 上传波场的海洋模型

Fig. 2 Ocean model of upload wavefield

1)首先考虑海底界面的影响,将海水层和海底固体层中的法向应力、法向位移和切向应力代入边界条件式(2),经过一系列推导,整理为:

$$P_2 X_2 = B_2, \quad (8)$$

式中:

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ \rho_1 a_{p_1}^{-1} & \rho_1 a_{p_1} & \rho_2(2v_{s_2}^2 p^2 - 1) a_{p_2} & -2\rho_2 v_{s_2}^2 p r_{s_2} a_{s_2} \\ r_{p_1} a_{p_1}^{-1} & -r_{p_1} a_{p_1} & r_{p_2} a_{p_2} & p a_{s_2} \\ 0 & 0 & 2v_{s_2}^2 r_{p_2} p a_{p_2} & (2v_{s_2}^2 p^2 - 1) a_{s_2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho_2(1 - 2v_{s_2}^2 p^2) a_{p_2}^{-1} \\ r_{p_2} a_{p_2}^{-1} \\ 2v_{s_2}^2 r_{p_2} p a_{p_2}^{-1} \end{bmatrix}$$

$-\rho_1 \omega^2$ 相等,同一层中的位移振幅比就等于其压力振幅比。若在水中某一深度 z 接收,振幅为:

$$t_2 = A_{11} (e^{i\omega z r_{p_1}} - e^{-i\omega z r_{p_1}}). \quad (12)$$

1.3 海水层滤波效应

滤波效应需同时考虑上传波场与下传波场的影响,即:

$$H = t_1 t_2, \quad (13)$$

代入 t_1 和 t_2 的表达式,有:

$$H = \frac{2i \sin(\omega z r_{p_1}) A_3 A_{11}}{1 + A_{01} e^{-2i\omega h r_{p_1}}}, \quad (14)$$

上述因子中, $\frac{1}{1 + A_{01}e^{-2i\omega hr_{p1}}}$ 为激发混响效应, A_3 为海底向下透射效应, A_{11} 为海底向上透射效应, $2i\sin(\omega z r_{p1})$ 为接收混响效应。

若不考虑检波器水深,即可以不考虑接收混响效应,海水层滤波效应为:

$$H = \frac{A_3 A_{11}}{1 + A_{01}e^{-2i\omega hr_{p1}}} \quad (15)$$

2 海水层滤波效应的影响因素分析

地震 P 波在海洋中的传播受多种因素的影响,既与海底底质的物性有关,又与海水层有关,传播过程中既会产生干扰波,也会对能量造成衰减,这都会影响地震记录的质量以及后续的工作。因此研究海水层对地震 P 波的滤波效应,分析其影响因素,有利于海洋勘探资料的分析 and 处理,更好地进行海底参数反演和构造分析等工作^[24]。

从海水层效应的表达式中可以看出,海水层滤波效应受很多因素影响,包括入射波频率、海水层深度、海底阻抗差和入射角等,为了深入探讨海水层滤波效应的影响因素,下面针对不同的参数模型绘制其变化曲线并分析。

2.1 入射波频率的影响

为了测试入射波频率对海水层效应的影响,以垂直入射为例,设置入射波频率变化范围为 0~60 Hz,模型参数见表 1,其中 $\rho = 1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $h = 5, 10, 50, 200 \text{ m}$,绘制振幅频率响应随入射波频率的变化曲线,如图 3 所示。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

深度/m	纵波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	横波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
海水层 h	1 500	0	1
海底	1 800	800	ρ

图 3 表明:振幅频率响应随频率的增大呈周期性变化,不同频率处的振幅频率响应大小不同,且海水层深度越大,振幅频率响应变化越快,这说明海水层对地震 P 波具有周期性的选频滤波效应,且周期与海水层深度成反比。

2.2 海水层深度的影响

在海面上布置检波器,对于不同深度的海水,接收到的地震记录不同。为了研究海水层深度对海水层滤波效应的影响,以垂直入射为例,设置海水层深度变化范围为 0~100 m,模型参数见表 1,其中 $\rho =$

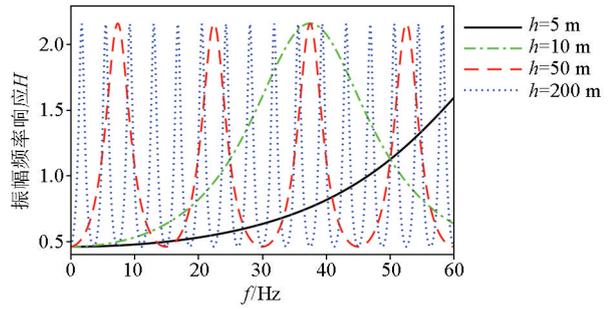


图 3 振幅频率响应随入射波频率变化曲线

Fig. 3 Amplitude frequency response curve with incident wave frequency

$1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $f = 5, 15, 30, 60 \text{ Hz}$,绘制振幅频率响应随海水层深度的变化曲线,如图 4 所示。

分析图 4 可知:振幅频率响应随海水层深度的增大呈周期性变化,且随着入射波频率的增大,周期越来越小。说明在不同的海水层深度下,因调谐频率不同,选频滤波效应不同,海水层的选频滤波效应具有周期性,且入射波频率越大,周期越小,即周期与入射波频率成反比。

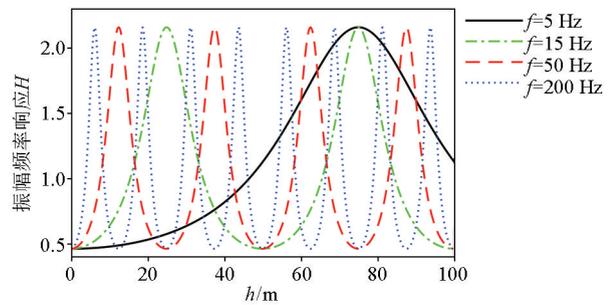


图 4 振幅频率响应随海水层深度变化曲线

Fig. 4 Amplitude frequency response curve with seawater depth

2.3 海底阻抗差的影响

为了分析海底阻抗差对海水层滤波效应的影响,以垂直入射为例,设置海底固体层的密度变化范围为 $1.5 \sim 2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,模型参数见表 1,其中 $f = 5, 15, 30, 60 \text{ Hz}$,绘制振幅频率响应随海底阻抗差的变化曲线,如图 5 所示。

由图 5 可知:浅海低频时,振幅频率响应随阻抗差的增大而减小;浅海中高频和深海低频时,振幅频率响应随阻抗差的增大而增大;深海中高频时,振幅频率响应随阻抗差的增大基本不变。在图 5a 中入射波频率为 15、60 Hz 时振幅频率响应变化曲线重合,在图 5b 中入射波频率为 15、30、60 Hz 时振幅频率响应变化曲线重合,这是因为振幅频率响应随入射波频率的增大呈周期性变化,由图 3 可见, $h = 10 \text{ m}$ 时,振幅频率响应在 $f = 15 \text{ Hz}$ 和 $f = 60 \text{ Hz}$ 时的值相同; $h = 200 \text{ m}$ 时,振幅频率响应在 $f = 15 \text{ Hz}$ $f = 30$

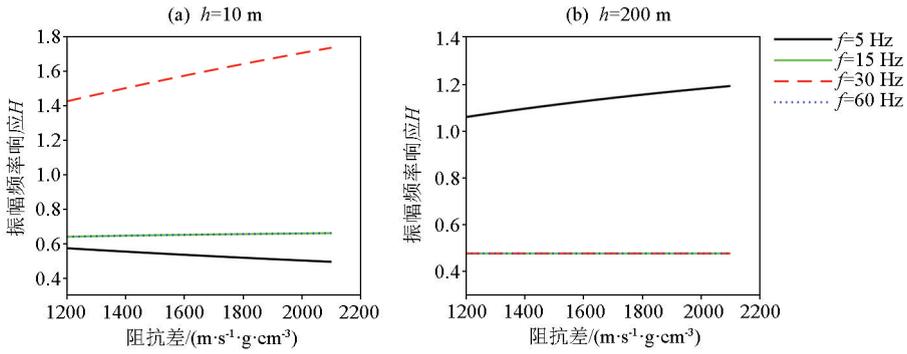


图 5 振幅频率响应随海底阻抗差变化曲线

Fig. 5 Amplitude frequency response curve with seafloor impedance difference

Hz 和 $f=60$ Hz 时的值相同。

2.4 入射角的影响

为了研究入射角对海水层滤波效应的影响,设

置入射角变化范围为 $0^\circ \sim 50^\circ$, 模型参数见表 1, 其中 $\rho = 1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $f = 5, 10, 30, 60$ Hz, 绘制振幅频率响应随入射角的变化曲线, 如图 6 所示。

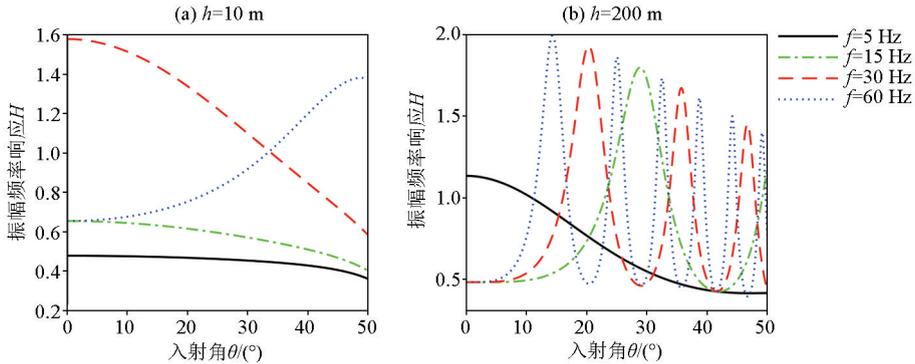


图 6 不同入射波频率振幅频率响应随入射角变化曲线

Fig. 6 Amplitude frequency response curve of different incident wave frequencies with incident angle

设置入射角变化范围为 $0^\circ \sim 50^\circ$, 模型参数见表 1, 其中 $\rho = 1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $h = 5, 10, 50, 200$ m, 绘制振幅频率响应随入射角的变化曲线, 如图 7 所示。

设置入射角变化范围为 $0^\circ \sim 50^\circ$, 模型参数见表 1, 其中 $\rho = 1.7, 1.8, 1.9, 2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 绘制振幅频率响应随入射角的变化曲线, 如图 8 所示。

由图 6a 可知, 浅海情况下, 中低频地震波的振幅频率响应随入射角的增大而减小, 高频地震波的振幅频率响应随入射角的增大而增大; 在入射角为

0° 即垂直入射时, 频率为 15 Hz 和 60 Hz 的振幅频率响应大小相等, 这与图 3、图 5 中的现象相符。由图 6b 可知, 深海情况下, 低频地震波的振幅频率响应随入射角的增大而减小, 中高频地震波的振幅频率响应随入射角的增大呈现周期性, 波峰的值越来越小, 且频率越高, 周期越小; 在入射角为 0° 即垂直入射时, 频率为 15、30、60 Hz 的振幅频率响应大小相等, 这与图 3、图 5 中的现象相符。

由图 7a 可知, 低频情况下, $h = 5$ m 和 $h = 10$ m

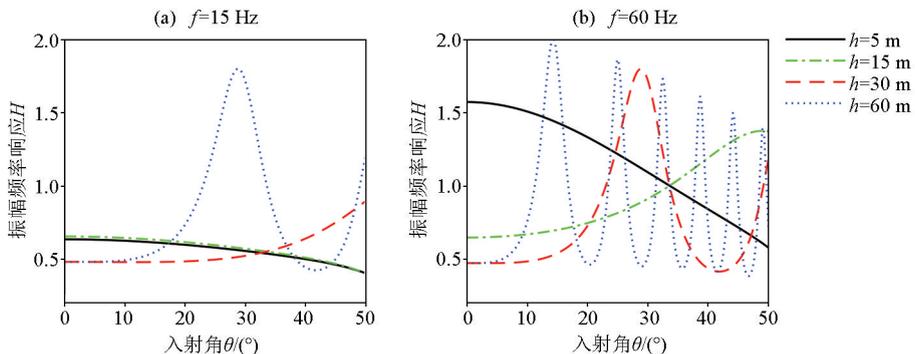


图 7 不同海水层深度振幅频率响应随入射角变化曲线

Fig. 7 Amplitude frequency response curve of different seawater depths with incident angle

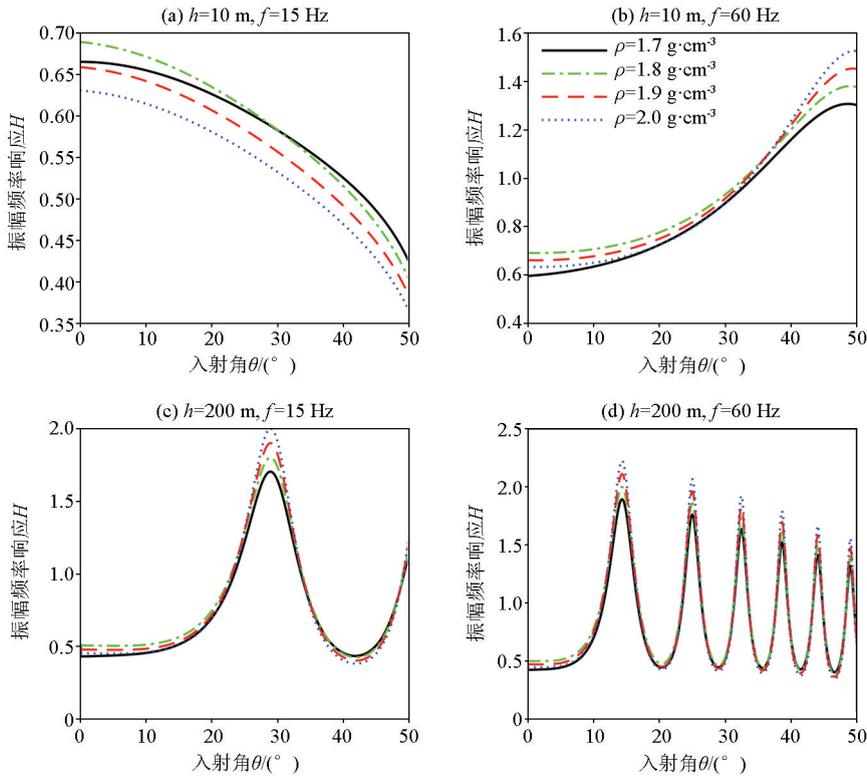


图 8 不同海底阻抗差振幅频率响应随入射角变化曲线

Fig. 8 Amplitude frequency response curve of different seafloor impedance differences with incident angle

时,振幅频率响应随入射角的增大而减小; $h=50\text{ m}$ 时,振幅频率响应随入射角的增大而增大; $h=200\text{ m}$ 时,振幅频率响应随入射角的增大呈周期性变化; $h=5\text{ m}$ 和 $h=10\text{ m}$ 时的振幅频率响应几乎重合,入射角为 0° 即垂直入射时, $h=50\text{ m}$ 和 $h=200\text{ m}$ 的振幅频率响应相等,这与振幅频率响应的周期性相关。由图 7b 可知,高频情况下, $h=5\text{ m}$ 时,振幅频率响应随入射角的增大而减小, $h=10\text{ m}$ 、 $h=50\text{ m}$ 和 $h=200\text{ m}$ 时,振幅频率响应随入射角的增大呈现周期性,波峰的值越来越小,且海水层深度越大,周期越小;在入射角为 0° 即垂直入射时,海水层深度为 50 m 和 200 m 的振幅频率响应大小相等,体现了振幅频率响应的周期性。

由图 8 可知,浅海低频地震波的振幅频率响应随着入射角的增大而减小,且阻抗差越大,振幅频率响应越小;浅海高频地震波的振幅频率响应随着入射角的增大而增大,且阻抗差越大,变化范围越大;深海时,振幅频率响应随着入射角的增大呈振荡变化,阻抗差越大,振荡范围越大。

3 数值模拟

为了进一步验证海水层效应的影响因素及其特征,对海水层滤波效应进行数值模拟,合成地震记录

频谱。在时间域中,地震记录可表示为地震反射系数与震源子波的卷积,在频率域中,地震信号的频谱可表示为两者频谱的乘积。本文选用主频为 30 Hz 的雷克子波作为震源子波,海水层效应即式(15)看作地震反射系数的频谱表达式,将 $0^\circ\sim 30^\circ$ 入射角情况下的频率曲线按入射角从小到大的顺序叠加起来即可得到地震记录的频谱。

模型参数如表 1 所示,图 9 和图 10 分别为 $\rho=1.7\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $\rho=2.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,即弱阻抗差海底和强阻抗差海底情况下的地震记录频谱,其中图 9a 为 $h=10\text{ m}$,图 9b 为 $h=50\text{ m}$ 。对 P-P 波地震记录频谱分析结果如下:

1) 入射波频率的影响。由图 9a 可见, 30 Hz 左右处的振幅比其他频率处的振幅大,由图 9b 可见, 30 Hz 、 40 Hz 左右处的振幅比其他频率处的振幅大,且频谱呈现周期性,这说明海水层具有周期性的选频滤波效应。

2) 海水层深度的影响。由图 9、图 10 可知,海水层深度不同时,不同频率处的振幅大小不同, $h=10\text{ m}$ 的频带比 $h=50\text{ m}$ 的频带宽,频谱具有周期性,且海水层深度越大,周期越小,这说明海水层效应的周期与海水层深度成反比。

3) 海底阻抗差的影响。由图 9、图 10 可知,强阻抗差海底与弱阻抗差海底相比振幅总体上相差不

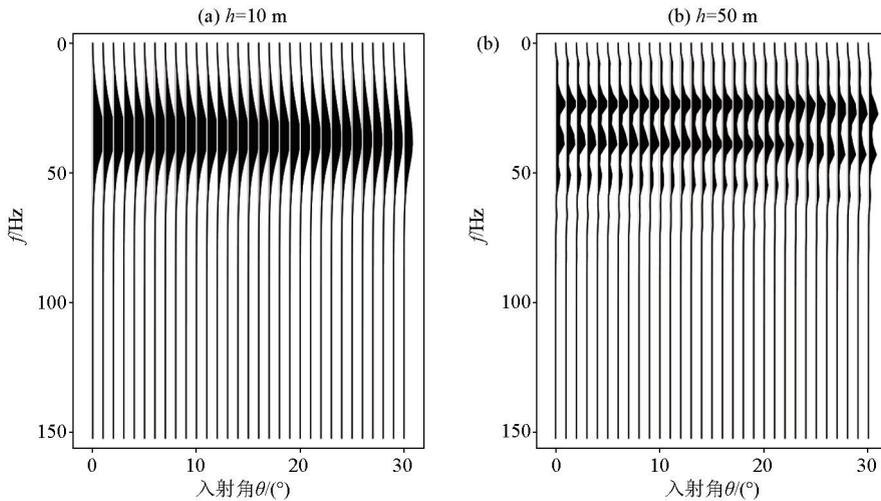


图 9 弱阻抗差海底情况下的地震记录频谱

Fig. 9 Seismic recording spectrum with weak impedance difference

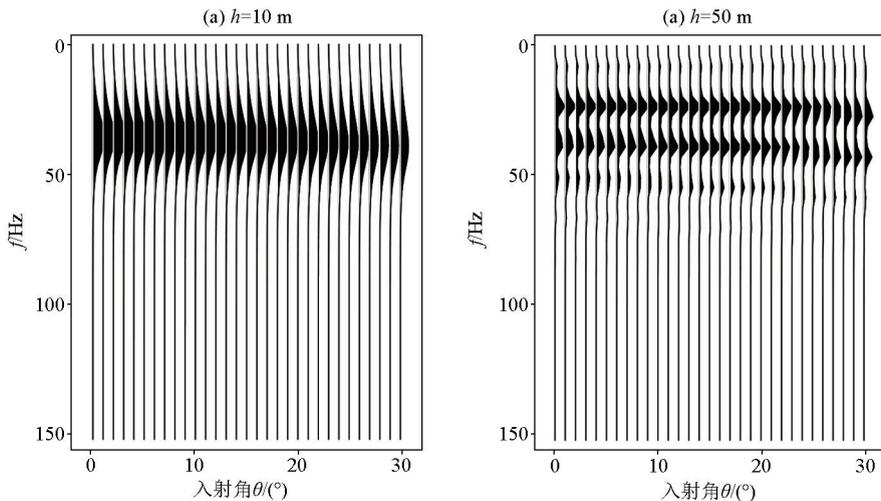


图 10 强阻抗差海底情况下的地震记录频谱

Fig. 10 Seismic recording spectrum with strong impedance difference

大,随着入射角的增大,振幅逐渐减小。

4) 入射角的影响。由图 9b 和图 10b 可见,入射角越大,周期越大,振幅频率响应越小,这说明海水层选频滤波效应的周期与入射角成正比,且随着入射角的增大振幅越来越小。

4 结论

本文围绕海水层对地震反射特征的影响展开研究。根据海水层界面处和海底界面处的边界条件推导了海水层效应的数学表达式。之后建立数值模型,分析入射波频率、海水层深度、海底阻抗差以及入射角对海水层滤波效应的影响,并合成 P-P 波地震记录频谱进行验证,得出如下几点认识:

1) 海水层对于地震 P 波具有周期性的选频滤波效应;

2) 选频滤波效应的周期与入射波频率和海水层深度成反比,在不同的入射波频率和海水层深度下,某些频率被加强,某些频率被减弱;

3) 浅海低频时振幅频率响应随阻抗差的增大而减小,浅海中高频和深海低频时振幅频率响应随阻抗差的增大而增大,深海中高频时,振幅频率响应基本不变;

4) 选频滤波效应的周期与入射角成正比,且入射角越大,地震 P 波衰减越严重。

参考文献 (References):

- [1] 孟祥羽. 复杂海洋声学环境下的反射地震响应及相关处理方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
Meng X Y. Research on reflection seismic data's response and related processing methods in complicated ocean acoustic environment[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [2] 戚宾, 王祥春, 赵庆献. 海洋电火花震源地震勘探研究进展

- [J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 107-111.
- Qi B, Wang X C, Zhao Q X. Research on the progress of marine sparker seismic exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 107-111.
- [3] Amundsen L, Reitan A. Decomposition of multicomponent sea-floor data into upgoing and downgoing P- and S-waves[J]. Geophysics, 1995, 60(2): 563-572.
- [4] Amundsen L, Reitan A. Estimation of sea-floor wave velocities and density from pressure and particle velocity by AVO analysis[J]. Geophysics, 1995, 60(5): 1575-1578.
- [5] Badiey M, Jaya I, Cheng H D. Propagator matrix for plane wave reflection from inhomogeneous anisotropic poroelastic seafloor [J]. Journal of Computational Acoustics, 1994, 2(1): 11-27.
- [6] Badiey, Mohsen. Deterministic and stochastic analyses of acoustic plane-wave reflection from inhomogeneous porous seafloor[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 99(2): 903-913.
- [7] Denneman A, Drijkoningen G G, Smeulders D, et al. Reflection and transmission of waves at a fluid/porous-medium interface[J]. Geophysics, 2002, 67(1): 282-291.
- [8] 阮爱国, 李家彪, 初凤友, 等. 海底天然气水合物层界面反射 AVO 数值模拟[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1826-1835.
- Ruan A G, Li J B, Chu F Y, et al. AVO numerical simulation of gas hydrate reflectors beneath seafloor[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1826-1835.
- [9] Chen W Y, Wang Z H, Zhao K, et al. Reflection of acoustic wave from the elastic seabed with an overlying gassy poroelastic layer [J]. Geophysical Journal International, 2015, 203: 213-227.
- [10] 郑广学, 祝捍皓, 朱军. 由贝叶斯理论和传播损失反演海底参数[C]//2018 年全国声学大会论文集, 2018: 70-71.
- Zheng G X, Zhu H H, Zhu J. Geo-acoustic parameter inversion by Bayesian theory and transmission loss [C]//Proceedings of the 2018 National Acoustics Conference, 2018: 70-71.
- [11] 张海刚. 具有弹性海底的海洋环境中声场计算研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- Zhang H G. Research on sound field computation in the ocean environment with elastic bottom[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [12] Liu Y T, Liu X W, Umberta, et al. An inversion method for seafloor elastic parameters[J]. Geophysics, 2015, 80(3): N11-N21.
- [13] Liu Y T, Liu X W. Seafloor elastic parameters estimation based on AVO inversion[J]. Marine Geophysical Research, 2015, 36(4): 335-342.
- [14] Zhang G, Hao C, Chen Y. Analytical study of the reflection and transmission coefficient of the submarine interface[J]. Acta Geophysica, 2018, 66(4): 449-460.
- [15] 刘洋廷. AVO 理论在海底弹性参数反演中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- Liu Y T. A study on the application of AVO theory in seafloor elastic parameters estimation[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2017.
- [16] 王维佳. 弹性波在海底多分量记录上的特征[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(2): 139-146.
- Wang W J. Essential characteristic of elastic waves in ocean bottom multicomponent seismograms [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2000, 35(2): 139-146.
- [17] 顾汉明, 王家映, 朱光明. 频率—波数域递推计算海底多分量地震记录中的反射系数[J]. 地球物理学报, 2002, 45(2): 255-262.
- Gu H M, Wang J Y, Zhu G M. Calculation of reflection coefficient in frequency-wave-number-domain using seafloor seismic multicomponent data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(2): 255-262.
- [18] 罗夏云, 程广利, 孟路稳, 等. 两种声场模型下环境参数对 Scholte 波传播特性的影响[J]. 海军工程大学学报, 2019, 31(3): 48-54.
- Luo X Y, Cheng G L, Meng L W, et al. Influence of environmental parameters on Scholte wave propagation characteristics under two kinds of acoustic field model[J]. Journal of Navel University of Engineering, 2019, 31(3): 48-54.
- [19] Chanda A, Bora S N. Different approaches in scattering of water waves by two submerged porous plates over an elastic sea-floor [J]. Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics, 2022: 1-28.
- [20] 马德志, 王炜, 金明霞, 等. 海上地震勘探斜缆集中鬼波产生机理及压制效果分析[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 175-181.
- Ma D Z, Wang W, Jin M X, et al. Generation mechanism of ghost wave in marine seismic exploration and ghost wave attenuation from marine seismic data [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 175-181.
- [21] 张兴岩, 朱江梅, 杨薇, 等. 海洋资料多次波组合衰减技术及应用[J]. 物探与化探, 2011, 35(4): 511-515.
- Zhang X Y, Zhu J M, Yang W, et al. Group technology of antimultiple in marine seismic data processing and its application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(4): 511-515.
- [22] 吴宝年. 油藏模型含油饱和度变化的地震振幅响应特征[J]. 物探与化探, 2015, 39(6): 1271-1277.
- Wu B N. Seismic amplitude response characteristics of oil-bearing saturability variation of the oil pool model [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(6): 1271-1277.
- [23] 孙成禹, 李振春. 地震波动力学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- Sun C Y, Li Z C. Fundamentals of seismic wave dynamics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [24] 顾汉明, 江涛, 朱培民, 等. 海底多波多分量 AVO 反演岩性参数的敏感性分析[J]. 石油物探, 1999, 38(4): 36-43.
- Gu H M, Jiang T, Zhu P M, et al. Sensitivity analysis of petrophysical parameter inversion using seabottom multiwave, multicomponent AVO data [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1999, 38(4): 36-43.

Effects of seawater layer on seismic reflection characteristics

DU Yi-Jing, SUN Cheng-Yu, WANG Zhi-Nong, CAI Rui-Qian, WANG Sheng-Rong, JIAO Jun-Feng

(School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: In marine seismic exploration, seismic reflection characteristics play an important role in AVO analysis, inversion for seabed parameters, and structural analysis. When seismic waves propagate in the ocean, their seismic reflection characteristics are affected by the seawater layer and the sediments beneath the seabed. However, previous studies mainly focus on the influence of the sediments beneath the seabed, while there is a lack of studies on the effects of the seawater layer on the seismic reflection characteristics. This study analyzed the changes in the seismic wave field during the seismic wave propagation in the seawater layer. Based on the boundary conditions of fluid-solid and free interfaces, this study derived the P-P amplitude ratio between the incident and reflected waves on an elastic interface and obtained the mathematical expression of the seawater layer effect accordingly. Then, this study analyzed the influencing factors, such as the frequency of incident waves, the depth of the seawater layer, the impedance contrast of the seabed, and the incident angle, on the filtering effect of the seawater layer. The analysis results are as follows: The seawater layer had a periodic frequency selective filtering effect on seismic P-waves; The period of the frequency selective filtering effect was inversely proportional to the frequency of incident waves and the depth of the seawater layer and was directly proportional to the incident angle; A higher incident angle corresponded to severer attenuation of seismic P-waves; The effects of impedance contrast on amplitude was related to the frequency of incident waves and the depth of the seawater layer. Finally, the study verified the effects of the seawater layer on seismic reflection characteristics through numerical simulations.

Key words: seawater layer; seismic reflection characteristics; P-P wave reflection coefficient; frequency selective filtering

(本文编辑:叶佩)