

周庆杰, 李西双, 刘乐军, 等. 基于 Chirp 数据和 Biot-Stoll 模型反演南海北部陆坡海底表层沉积物物理性质[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 72–82, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.03.007

Zhou Qingjie, Li Xishuang, Liu Lejun, et al. Physical properties of the seabed inverted based on Chirp data and the Biot-Stoll model in the northern continental slope of the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(3): 72–82, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.03.007

基于 Chirp 数据和 Biot-Stoll 模型反演南海北部陆坡海底表层沉积物物理性质

周庆杰^{1,2}, 李西双^{1,3*}, 刘乐军¹, 刘洋廷^{1,2}, 高珊^{1,2}, 周航¹, 王景强^{1,2}, 李天光¹

(1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 浅地层剖面是基于声学信号(频率在几百至几千赫兹)在沉积物中的传播得到可反映沉积地层结构的数据, 海底反射系数与沉积物物理性质密切相关。Biot-Stoll 声波传播理论模型可以预测海底沉积物的物理性质, 构建反射系数等声学参数与物理参数之间的关系, 但在不同的海域采用不同的参数所获得的效果不同。为此, 本文基于南海北部陆坡海底表层沉积物的实测物理参数, 利用 Biot-Stoll 模型建立研究区海底反射系数和沉积物物理性质之间的关系, 结果表明模型计算值与样品实测值吻合度总体较好, 偏差在 0.1%~4.9% 之间, 并建立了频率 3.5 kHz 时海底反射系数与沉积物孔隙度、密度、平均粒径之间的关系方程, 且方程拟合度较高, 可决系数 R^2 均大于 0.99。在对典型 Chirp 剖面数据计算其海底反射系数的基础上, 反演了海底表层沉积物的孔隙度、密度、颗粒平均粒径等物理性质, 其中反演孔隙度、密度、平均粒径与实测孔隙度、密度、平均粒径相对误差均小于 5%, 结果与实测值基本相符, 表明该反演方法在南海北部陆坡区的应用是可行的。

关键词: Chirp 浅剖数据; Biot-Stoll 模型; 海底反射系数; 沉积物物理性质; 南海北部陆坡

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)03-0072-11

1 引言

海底浅表层(海床之下小于 1 m 范围内)沉积物位于海底海水与沉积地层交界处, 主要由砂、粉砂、黏土和孔隙流体(海水)等物质组成, 承载了大量且丰富的沉积环境信息^[1]。近年来, 利用 Biot-Stoll 模型和浅剖声呐数据反演海底表层沉积物物理性质的研究正在成为一个新兴的浅剖数据应用方向。Schock^[2-3]利用 Biot-Stoll 模型和 Chirp 声呐数据反演了美国东

部 Fort Walton 海滩和南海海底沉积物的声速、密度、孔隙度等物性参数, 且与实验室测量值吻合度较高。国内也有学者应用 Biot-Stoll 模型和原位测量数据探讨声波在海底沉积物介质中的传播规律^[4-7], 并将该模型用于反演沉积物粒径、孔隙度、密度等物性参数^[8-9]。然而, Biot-Stoll 模型在不同的海域采用不同的参数所预测的声学性质和物理性质之间的关系存在差异, 因此, 针对特定的海域利用实测物理参数构建 Biot-Stoll 模型, 才能获得较为准确的声学 and 物理参数

收稿日期: 2019-05-21; 修订日期: 2019-08-27。

基金项目: 全球变化与海气相互作用(GASI-GEOGE-05); 国家自然科学基金(41876061); 国家重点研发计划(2016YFC0301403); 基于地球物理属性数据反演工程地质参数研究。

作者简介: 周庆杰(1989—), 男, 山东省安丘市人, 助理工程师, 从事海洋地球物理调查与研究相关工作。E-mail: zhouqj@fio.org.cn

* 通信作者: 李西双(1976—), 男, 山东省嘉祥县人, 副研究员, 主要从事海洋浅层沉积结构、活动构造的声学探测与研究。E-mail: lxs@fio.org.cn

预测关系。

浅地层剖面是利用声学方法了解地下介质的物理信息,海底反射系数与沉积物的物理性质密切相关。在常规地震资料反演中发展了许多计算反射系数的理论和方法,如随机稀疏脉冲反褶积^[10]、谱反演^[11]、稀疏地层反演或基追踪反演^[12]、谱稀疏贝叶斯学习反射系数反演^[13]等反射系数反演方法。本文在借鉴常规海底反射系数反演方法的基础上,利用地震反褶积技术对浅剖数据进行处理求取其海底反射系数,为反演海底表层沉积物物理性质提供有效的数据支撑。

南海北部陆坡区地形复杂,发育了一系列陆坡峡谷地貌^[14],其沉积物沉积速率较高具有复杂的分层结构^[15],从而影响了沉积物物理性质和声学反射特性的分布特征。本文以研究区海底表层沉积物的声速、密度、孔隙度等实测资料为基础,利用 Biot-Stoll 模型计算海底表层沉积物的法向入射反射系数,并与样品实测数据得到的反射系数进行对比,分析模型预测海底反射系数的可靠性,并建立海底反射系数与沉积物物理性质之间的相关关系。在研究区选取典型的 Chirp 剖面计算其海底反射系数,结合基于 Biot-Stoll 模型建立的海底反射系数与沉积物物理性质之间的相关关系反演表层沉积物的孔隙度、密度、平均粒径等物理性质,并与取样点处实测物理性质结果进行对比,探讨该方法的适用性,为快速获取连续的海底沉积物物理性质提供新的方法参考。

2 Biot-Stoll 模型及参数简介

Biot 模型作为一种经典的多孔弹性理论模型^[16-17],同时考虑介质的孔隙性与弹性,在描述各向异性 and 具有黏弹性的双相饱和多孔介质中应用广泛。Stoll^[18]在 Biot 模型基础上提出了 Biot-Stoll 模型,应用于海底沉积物介质中的声速和声衰减计算,并推导出了简谐平面波在多孔介质中传播的方程,

$$\begin{vmatrix} Hk^2 - \rho\omega^2 & \rho_f\omega^2 - Ck^2 \\ Ck^2 - \rho_f\omega^2 & m\omega^2 - Mk^2 - j\frac{\omega F\eta}{\kappa} \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

式中, ρ 为体密度; ρ_f 为孔隙流体密度; $\omega=2\pi f$ 为角频率; 参数 $m = \frac{c\rho_f}{n}$ 为宏观压力梯度下流体流动的相位(其中, c 为曲折度, n 为孔隙度); j 为虚数; $F\eta$ 是用于解释泥沙孔隙中振荡流的频率依赖性黏性损失的一种黏性修正因子; k 为复波数。此外, Biot 理论弹性模量 H 、附加弹性模量 C 和复弹性模量 M 可表示为

$$H = \frac{(K_r - K_b)^2}{D - K_b} + K_b + \frac{4}{3}\mu, \quad (2)$$

$$C = \frac{K_r(K_r - K_b)}{D - K_b}, \quad (3)$$

$$M = \frac{K_r^2}{D - K_b}, \quad (4)$$

$$D = K_r \left[1 + n \left(\frac{K_r}{K_f} - 1 \right) \right], \quad (5)$$

式中, K_b 为骨架体积模量; μ 为骨架剪切模量; K_r 为颗粒体积模量; K_f 为孔隙流体体积模量; n 为孔隙度; 复波数可表示为虚数 $k = \frac{\omega}{v} + j\alpha$ (v 为声波相速度, α 为声波衰减)。

在海底表层沉积物与海水的分界面假定孔隙流体沿与界面垂直的方向连续进出骨架,界面总应力平衡且界面流体压力平衡,在这些边界条件的限定下,可以确定海床的反射系数^[21](图 1),

$$R = \frac{D_r}{D_i}, \quad (6)$$

$$\frac{D_r}{D_i} + (G_1 - 1)\frac{A_1}{D_i} + (G_2 - 1)\frac{A_2}{D_i} = -1, \quad (7)$$

$$\rho_w c_w \omega \frac{D_r}{D_i} + (Hk_1 - Ck_1 G_1) \frac{A_1}{D_i} + (Hk_2 - Ck_2 G_2) \frac{A_2}{D_i} = \rho_w c_w \omega, \quad (8)$$

$$-\rho_w c_w \omega \frac{D_r}{D_i} + (Mk_1 G_1 - Ck_1) \frac{A_1}{D_i} + (Mk_2 G_2 - Ck_2) \frac{A_2}{D_i} = \rho_w c_w \omega, \quad (9)$$

$$G_1 \equiv \frac{B_1}{A_1} = \frac{Hk_1^2 - \rho\omega^2}{Ck_1^2 - \rho_f\omega^2}, \quad (10)$$

$$G_2 \equiv \frac{B_2}{A_2} = \frac{\rho\omega^2 - Hk_2^2}{\rho_f\omega^2 - Ck_2^2}, \quad (11)$$

式中, A_1 和 A_2 分别为沉积物骨架在快波和慢波作用下的复位移振幅值; B_1 和 B_2 分别为快波和慢波作用下孔隙流体相对于骨架运动的复相对位移; D_i 和 D_r 分别为入射波和反射波的复位移振幅值; ρ_w 和 c_w 为海水的密度和声速; k_1 和 k_2 为快慢纵波的波数,其他字母含义同公式(1)。

3 试验测量与理论计算

3.1 区域概况及数据获取

研究区域位于南海北部陆坡区,发育多条海底峡谷,地形地貌复杂^[19-20],水深 400~2 500 m(图 2)。南海北部陆坡区海底表层沉积物存在两种成因类型^[21],一是来源于河流搬运的现代细粒碎屑物质,二是早期晚更新世冰期低海平面的残留沉积。受物源区沉积物自身特征及后期改造作用的影响,沉积物颗粒组分呈现出粗粒与细粒交错沉积的特征,含量较多的粗粒物质主要是高能环境中长期沉积的产物,在冰后期海平面上升的过程中,可能被细颗粒沉积物覆盖^[22]。在南海北部陆坡区海底沉积物存在明显的分带性分布特征^[23],浅水区沉积物以粉砂质黏土、粉砂质砂为主,水深大于 1 000 m 的深水区域沉积物主要为细颗粒的

黏土质粉砂和粉砂质黏土^[24-25]。南海北部陆坡区水深变化较大且沉积速率较高^[26-27], 浊流及块体搬运作用强烈^[28-29], 其沉积物孔隙度变化范围较大, 沉积物声学物理性质分布的差异性变化明显^[30]。

图2显示了研究区、取样站位及典型 Chirp 浅剖测线的分布位置。沉积物柱状样由“海洋石油 708”船于 2015 年 2 月采用深水重力柱取样器进行采样, 每根样品长 6 m。样品取回后在实验室内进行了含水量分析、粒度分析、土粒比重测试等试验分析, 获得

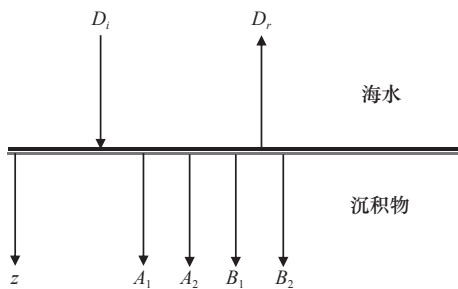


图1 Biot 参数计算反射系数的几何示意图(据文献[2])
Fig. 1 Geometric sketch of reflection coefficient calculated by Biot parameter (according to reference [2])

D_i 和 D_r 分别为入射波和反射波的复位移振幅值; A_1 和 A_2 分别为沉积物骨架在快波和慢波作用下的复位移振幅值; B_1 和 B_2 分别为快波和慢波作用下孔隙流体相对于骨架运动的复相对位移
 D_i and D_r are the reset amplitude values of incident wave and reflected wave respectively; A_1 and A_2 are the resetting amplitude of sediment skeleton under the action of fast wave and slow wave respectively; B_1 and B_2 are the complex relative displacement of pore fluid relative to skeleton motion under the action of fast wave and slow wave respectively

了样品的含水量、粒径、湿密度、孔隙度、颗粒密度等参数。同时, 以 0.5 m 为间距, 采用 WSD-3 数字声波仪和同轴差距法进行了声学测量, 测量频率为 25 kHz, 其中样品长度测量精度为 0.05 cm, 声时测量精度为 $\pm 0.1 \mu\text{s}$ 。浅地层剖面数据是利用船载 ECHO SOUNDER3500 浅地层剖面仪获得, 主频 3.5 kHz。

3.2 Biot-Stoll 模型输入参数

由于 Biot 理论模型涉及的参数较多, 参数的选取对计算结果有不同程度的影响。陈静等^[6]曾选取不同模型参数对 Biot-Stoll 模型在南海南部海底沉积物物理性质预测的准确性方面进行了研究, 认为 Schock 参数与实测结果更为接近。本文模型输入的颗粒密度、孔隙度、湿密度、粒径等参数为实测数据, 其他参数, 如渗透率、沉积物孔隙因子、颗粒体积模量和剪切模量、孔隙水体积模量等参数, 以及海水密度和弹性模量等参数的变化对模型计算结果影响较小, 这些参数的选取, 结合 Schock 参数公式^[2]确定或从文献资料中获取, 详细参数取值如表 1 所示。

3.3 海底反射系数的求取

由于海水与海底沉积物介质性质(波阻抗)差异较大, 声波在海底界面会发生强反射, 海底反射系数 R_s 可表示为

$$R_s = \frac{V_s \rho_s - V_w \rho_w}{V_s \rho_s + V_w \rho_w}, \quad (12)$$

式中, V_s , ρ_s 为海底表层沉积物的声速和密度; V_w , ρ_w 为海水的声速和密度。基于海底表层沉积物样品的声学测量和物理性质测试可以获得沉积物声速和

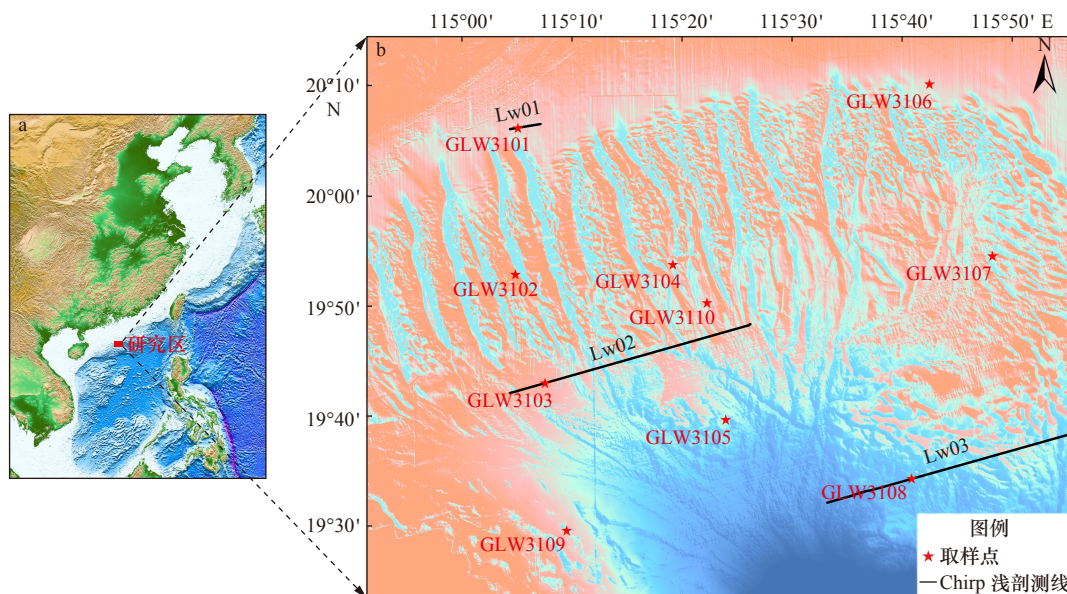


图2 研究区位置、表层沉积物取样站位及典型 Chirp 浅剖测线分布

Fig. 2 The location of the study area, surface sediment sampling stations and typical Chirp shallow profiles

表 1 Biot-Stoll 模型输入的沉积物物理参数

Table 1 The input sediment physical parameters of the Biot-Stoll model

参数	Biot-Stoll模型取值
颗粒密度 $\rho_g/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	实测
孔隙度 n	实测
孔隙曲折度 α	$\alpha = \begin{cases} 1.35 & \varphi \leq 4 \\ -0.3 + 0.4125\varphi & 4 < \varphi < 8 \\ 3.0 & \varphi \geq 8 \end{cases}$ $\varphi = -\log_2 d$, φ 为中值粒径; d 为颗粒直径, 单位: mm
渗透率 κ/m^2	$\kappa = \frac{d^2 n^3}{180(1-n)^2} \frac{1}{\sqrt{10}}$
海水动力黏度 $\eta/\text{Pa}\cdot\text{s}$	0.001
颗粒体积模量 K_g/Pa	3.2×10^{10}
海水体积模量 K_w/Pa	2.395×10^9
海水密度 $\rho_w/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 023
框架剪切模量 μ_0/Pa	$\mu_0 = 1.835 \times 10^5 \left(\frac{n}{1-n}\right)^{-1.12} \sqrt{\tau_a(z)} \tau_a(z) = (1-n)(\rho_s - \rho_f)gz$, $\tau_a(z)$ 为沉积物平均有效压力, 重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, z 为海底以下沉积物深度, 单位: m, ρ_s 为颗粒密度, ρ_f 为孔隙流体密度
框架体积模量 K_0/Pa	$K_0 = \frac{2\mu_0(1+\sigma)}{3(1-2\sigma)}$, σ 为沉积物骨架的泊松比
孔隙大小 a	$a = \frac{d}{3} \cdot \frac{n}{1-n} \cdot \frac{1}{1.8}$
体积对数衰减 δ_f	$\delta_f(z_s) = \delta_f(z_0) \sqrt{z_0/z_s}$, z_0, z_s 分别为浅表层和表层沉积物深度

密度值, 结合研究区海水的声速和密度经验值^[23, 30], 根据上述公式可以计算获得取样点处附近的海底反射系数。

在浅地层剖面上, 海底地震记录可以简单的认为是震源子波与海底反射系数相褶积的结果, 可以利用地震反褶积技术进行子波处理消除子波的影响, 得到实际反射系数序列^[31]。在海底反射系数求取之前, 需要结合浅地层剖面记录中的海底反射波及其对应的双程旅行时和相关的海水声速测量结果, 进行波前球面扩散补偿, 以提高浅剖资料的保真度。在海水中波前发散对反射波振幅的衰减因子为

$$D = v_0 / (v_R^2 \cdot t), \quad (13)$$

式中, D 为衰减因子; v_0 为初始速度; v_R 为各海水层均方根速度; t 为地震波双程传播时间。补偿因子为

$$1/D = (v_R^2 \cdot t) / v_0. \quad (14)$$

球面扩散能量损失是传播路程中球面波前半径的函数, 用球面扩散补偿因子对地震道加权就补偿了球面扩散作用对地震振幅的衰减损失。由于球面扩散补偿是一种三维补偿, 从理论上讲具有较高的保幅性^[32-33]。

在计算海底反射系数过程中, 根据 Chirp 浅剖的频带特征(表 2)定义子波^[34], 给出初始海底反射系数

表 2 Chirp 子波相关参数

Table 2 The relevant parameters of Chirp wavelet

属性	子波特征
频带宽度	1 000~6 000 Hz
脉冲长度	5 ms
脉冲幅度	2.5 ms
采样间隔	13 μs

并与子波进行褶积, 然后计算褶积结果与原始记录的误差, 根据误差判断收敛条件, 若收敛则结束计算, 输出海底反射系数, 否则继续迭代计算。图 3 为计算海底反射系数过程中的子波及合成记录与原始剖面的对比。图 4 为以 Lw01 剖面为例计算得到的海底反射系数剖面, 图中散点为计算得到的海底反射系数, 红色实线为海底反射系数的平均值。

4 结果与讨论

4.1 反射系数实测值与模型预测值比较

为比较反射系数模型预测值与实测值, 分析反射系数预测模型的适用性, 利用 Biot-Stoll 模型进行了海底反射系数计算, 计算所采用的参数见表 1。图 5

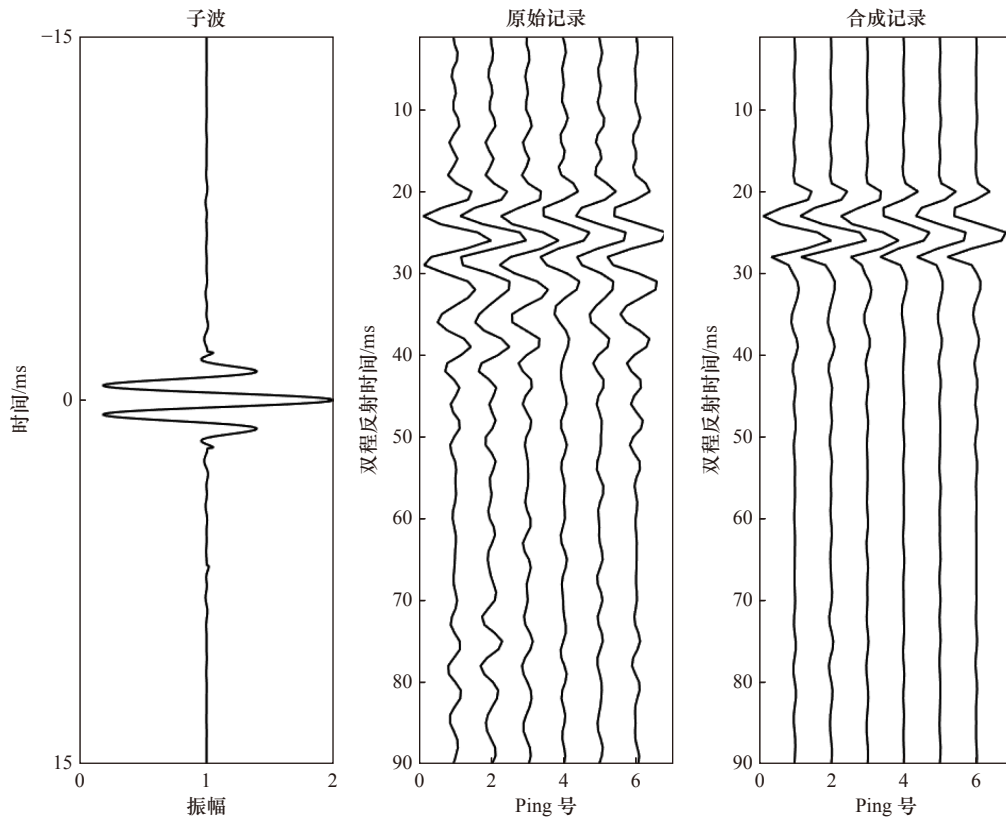


图 3 子波褶积合成记录与原始剖面数据对比

Fig. 3 The wavelet convolution synthetic seismogram and original section data

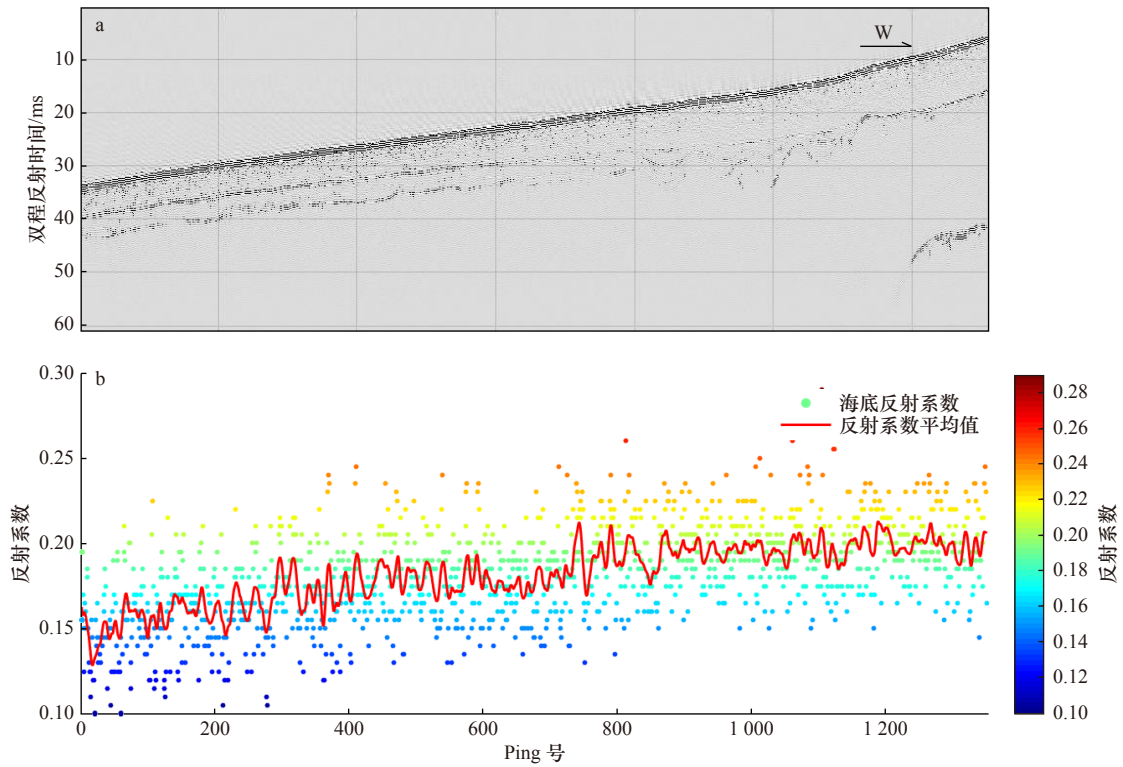


图 4 Lw01 剖面计算得到的海底反射系数

Fig. 4 Sea bottom reflection coefficients calculated from Profile Lw01

a 为 Lw01 Chirp 浅地层剖面; b 为 Lw01 剖面的海底反射系数

a is Lw01 Chirp sub-bottom profile; b is the seabed reflection coefficients of Profile Lw01

显示了反射系数随孔隙度的变化关系,可以看出, Biot-Stoll 模型计算的反射系数变化曲线与实测海底反射系数平均值基本吻合。对 Biot-Stoll 模型的反射系数预测值与实测值进行差值计算,孔隙度小于 0.8 范围内,模型预测值与实测值的偏差在 0.1%~3.8% 之间,平均偏差为 1.2%,孔隙度大于 0.8 时偏差较大,约为 4.9%。由表层沉积物取样测试结果来看,该区沉积物孔隙度大部分都小于 0.8,因此,在该区利用 Biot-Stoll 模型进行计算是可行的。

4.2 基于 Biot-Stoll 模型建立的海底反射系数与物理性质关系

基于 Biot-Stoll 模型研究了海底反射系数随频率的变化关系,计算了频率 3.5 kHz 时(Chirp 浅剖主频 3.5 kHz)海底反射系数与沉积物孔隙度、密度、平均粒径之间的相关关系,建立拟合方程(图 6)。由图 6a 可以看出在低频($f < 10^3$ Hz)时,海底反射系数受频率变化的影响较小,在高频($f > 10^3$ Hz)时,海底反射系数随频率的增大而减小,且随孔隙度的增大这种趋势逐渐减小;图 6b 为海底反射系数与沉积物孔隙度的变

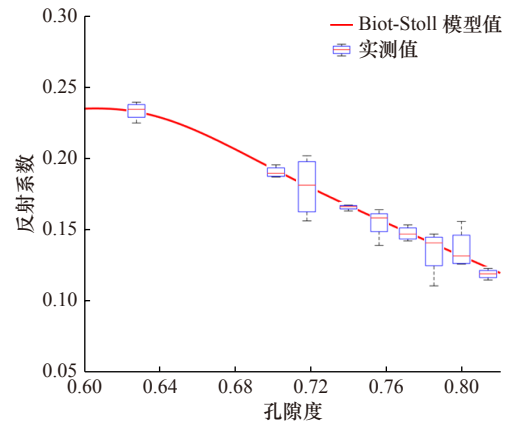


图 5 反射系数与孔隙度的关系

Fig. 5 The relationship between reflection coefficient and porosity

盒图为海底表层沉积物样品测试数据计算的反射系数;红色实线为 Biot-Stoll 模型计算的反射系数,样品测试频率与模型计算频率均为 25 kHz

The boxplot is the reflection coefficient calculated from the test data of seabed surface sediment samples; the red solid line is the reflection coefficient calculated by the biot-stoll model, and the sample test frequency and model calculation frequency are both 25 kHz

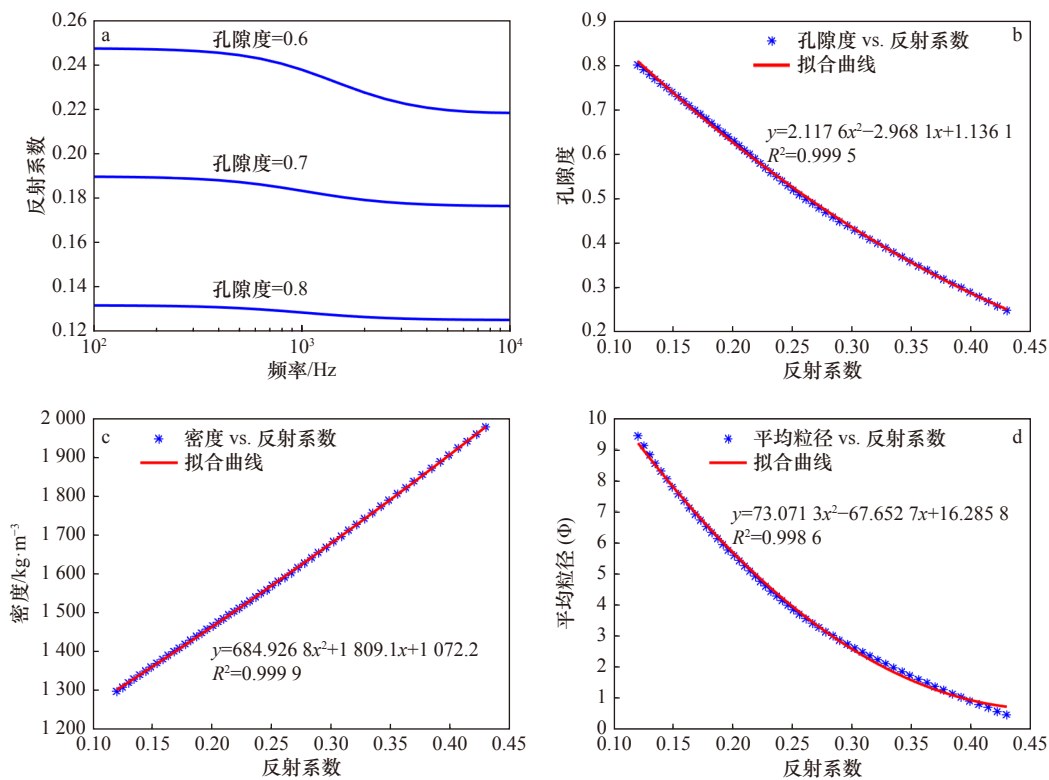


图 6 海底反射系数与沉积物物理性质的相关关系

Fig. 6 Correlation between bottom reflection coefficients and sediment physical properties

a. 反射系数随频率的变化; b. 反射系数随孔隙度的变化 ($f=3.5$ kHz); c. 反射系数随密度的变化 ($f=3.5$ kHz); d. 反射系数随平均粒径的变化 ($f=3.5$ kHz)

a. Variation of reflection coefficient with frequency; b. variation of reflection coefficient with porosity ($f=3.5$ kHz); c. variation of reflection coefficient with density ($f=3.5$ kHz); d. variation of reflection coefficient with mean grain size ($f=3.5$ kHz)

化关系,随孔隙度的减小反射系数呈增大的趋势;图6c为海底反射系数与沉积物密度的变化关系,可以看出其近似呈线性关系,为提高拟合的准确度,本文以二次方程对其进行拟合;图6d为海底反射系数与沉积物平均粒径的变化关系,可以看出,反射系数与平均粒径呈负相关,随平均粒径的增大而减小。

4.3 物理性质反演结果与实测结果对比

在研究区选取典型的 Chirp 浅地层剖面计算其海底反射系数(其中较为典型的3条剖面,位置见图2b),利用基于 Biot-Stoll 模型所建立的海底反射系数与沉积物物理性质之间的相关关系,对海底表层沉积物物理性质进行反演,得到这些剖面的海底表层沉积物孔隙度、密度和平均粒径等物理性质,对于这3个物理参数的反演,在反演任何一个物理参数的过程中,其他两个物理参数也会发生对应的变化(图7),其中孔隙度与平均粒径变化趋势相近,与密度变化趋势相反。由图可见,这3条剖面的海底反射系数整体位于0.09~0.25区间范围内,最高约为0.25;Lw01剖面的反射系数较Lw02和Lw03剖面变化幅度较小,这是由于Lw01剖面位于海底峡谷上部,地形起伏较小,地势相对平坦,水动力条件较弱,沉积物以黏土为主

含少量粉砂^[35];Lw02和Lw03剖面分别位于海底峡谷中部和下部,地形起伏较大,尤其是Lw02剖面横切海底峡谷,地形变化最大(图8),水动力环境较强,浊流及块体搬运作用发育,沉积物中含水量(孔隙度)变化较大^[29],相应的海底反射系数变化幅度增大,说明海底地形的变化在对沉积物的物理性质形成一定影响的同时,形成海底反射系数的差异性变化;Lw03剖面位于海底峡谷区尾部,水深相对较深,沉积物主要以黏土为主,孔隙水含量(孔隙度)较高。从反演的物理性质结果来看,孔隙度的分布范围在0.52~0.85之间,大部分集中在0.6~0.8区间范围内;密度分布主要集中在1300~1500 kg/m³区间范围内,平均约为1420 kg/m³;平均粒径在4 Φ ~10.5 Φ 区间范围内,最高约为10.5 Φ ,最低约为4.1 Φ ,平均约为7.3 Φ 。

利用Lw01\Lw02\Lw03剖面所经过的GLW3101\GLW3103\GLW3108站位的样品实测孔隙度、密度、平均粒径与反演的结果进行对比(表3)。可以看出,取样站位处反演的孔隙度、密度、平均粒径与实测结果相对误差0.31%,最大为4.60%,均小于5.0%;此外,海底表层沉积物取样测试结果显示,水深大的区域,沉积物孔隙度较大,Chirp剖面反演结果与实测值整

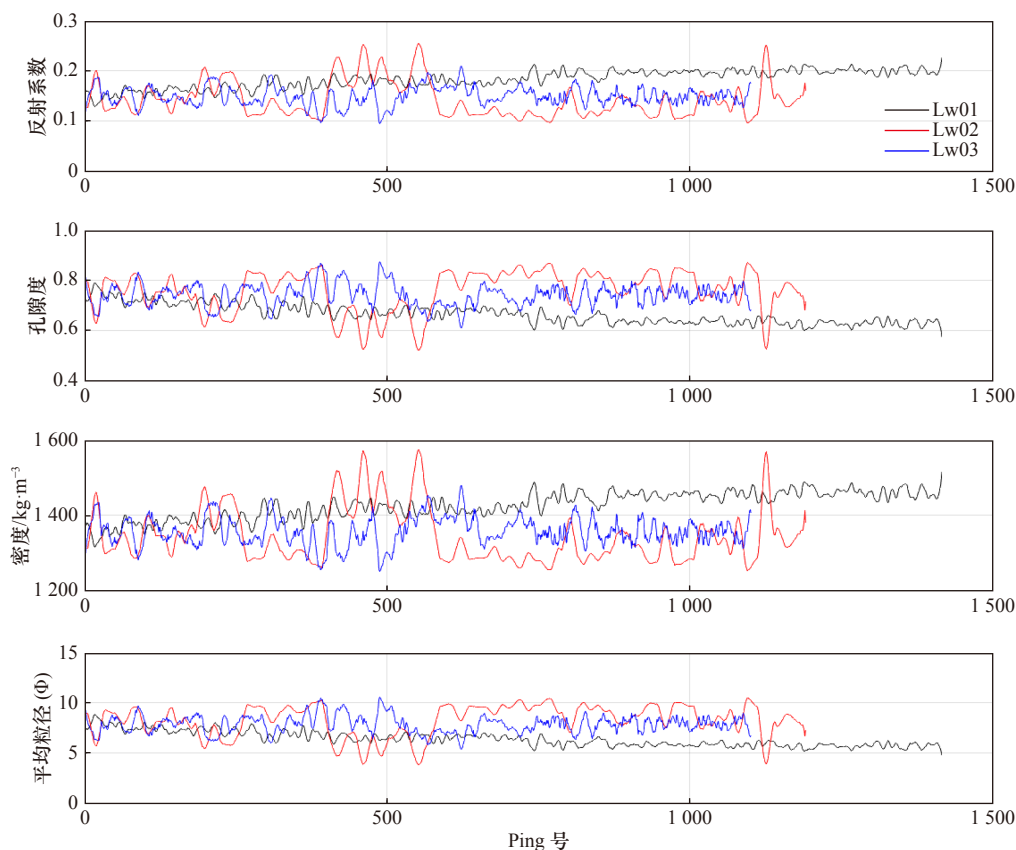


图7 Lw01、Lw02、Lw03剖面沉积物物理性质反演结果

Fig. 7 Inversion results of sediments physical properties in profiles Lw01, Lw02 and Lw03

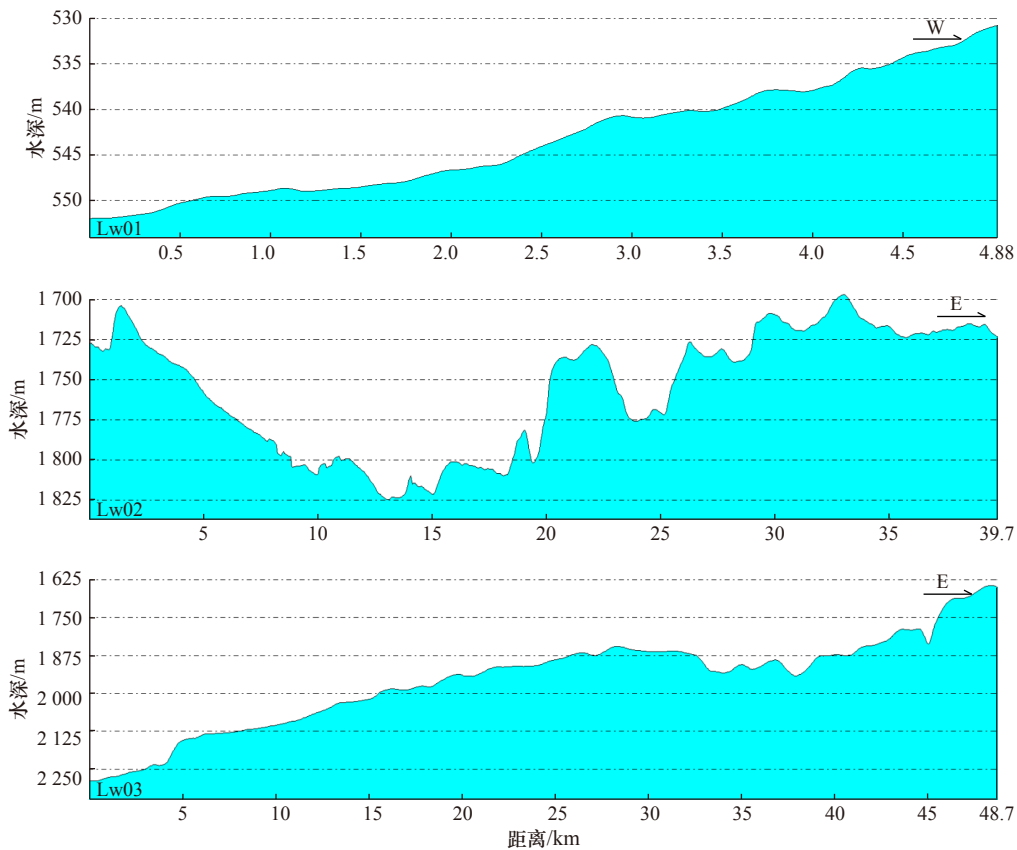


图 8 Lw01、Lw02 和 Lw03 测线对应的海底地形剖面图

Fig. 8 The seabed topography section of profiles Lw01、Lw02 and Lw03

表 3 站位实测物理性质与反演结果对比

Table 3 Comparison between the measured physical properties and the inversion results

取样站位	表层沉积物类型	孔隙度			密度/kg·m ⁻³			平均粒径(Φ)		
		实测值	反演值	相对误差/%	实测值	反演值	相对误差/%	实测值	反演值	相对误差/%
GLW3101	粉砂质黏土	0.651	0.645	-0.92	1 440	1 450	0.69	5.5	5.7	3.63
GLW3102	粉砂质黏土	0.747	0.738	-1.20	1 368	1 374	0.43	6.2	6.5	4.84
GLW3103	粉砂质黏土	0.783	0.758	-3.19	1 350	1 343	-0.52	8.3	8.2	-1.20
GLW3105	粉砂质黏土	0.798	0.792	-0.75	1 310	1 306	-0.31	8.4	8.6	2.38
GLW3108	黏土	0.806	0.812	0.74	1 290	1 303	1.01	8.7	9.1	4.60

注: $\Phi = -\log_2 d$, d 为颗粒粒径, 单位: mm。

体相符, 说明基于 Biot-Stoll 模型在该区建立的海底表层沉积物反射系数和物理性质之间的相关关系是可靠的。

5 结论

通过对南海北部陆坡表层沉积物样品测试和 Biot-Stoll 模型计算, 分析了模型预测海底反射系数的可靠性, 并选取典型的 Chirp 剖面计算其海底反射系数, 反演表层沉积物的孔隙度、密度、平均粒径等物

理性质, 得到以下认识:

(1) 实测海底反射系数与 Biot-Stoll 模型计算值的对比分析表明, 模型计算值与实测值的吻合度总体较好。在孔隙度小于 0.8 时, 模型计算值与实测值的平均偏差约为 1.2%, 孔隙度大于 0.8 时偏差增大, 约为 4.9%。且研究区表层沉积物取样测试结果显示绝大部分区域沉积物孔隙度在 0.8 以内, 因此, 在该区利用 Biot-Stoll 模型进行计算是可行的。

(2) 在利用 Biot-Stoll 模型研究海底反射系数随频

率变化关系的基础上,建立了频率 3.5 kHz 时海底反射系数与沉积物孔隙度、密度、平均粒径之间的关系方程,且方程拟合度较高,可决系数 R^2 均大于 0.99,为利用海底反射系数反演沉积物物理性质提供了可靠的转换依据。

(3) 选取典型 Chirp 剖面进行计算其海底反射系

数并反演了海底表层沉积物孔隙度、密度、平均粒径等物理性质。反演结果与实测结果对比分析表明,反演结果误差在 0.31%~4.84%,均小于 5.0%,表明该反演方法在南海北部陆坡区的应用是可行的,可为在该海域间接快速获取海底沉积物物理性质提供新的方法参考。

参考文献:

- [1] 何起祥. 中国海洋沉积地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
He Qixing. Marine Sedimentary Geology of China[M]. Beijing: China Ocean press, 2006.
- [2] Schock S G. A method for estimating the physical and acoustic properties of the sea bed using chirp sonar data[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(4): 1200-1217.
- [3] Schock S G. Remote estimates of physical and acoustic sediment properties in the South China Sea using chirp sonar data and the biot model[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(4): 1218-1230.
- [4] 曹正良, 张叔英, 马在田. BICSQS模型与Biot-Stoll模型海底界面声波反射和散射的比较[J]. *声学学报*, 2006, 31(5): 389-398.
Cao Zhengliang, Zhang Shuying, Ma Zaitian. Comparison of reflections and interface scatterings from BICSQS model and Biot-Stoll model seafloors[J]. *Acta Acustica*, 2006, 31(5): 389-398.
- [5] 朱祖扬, 王东, 周建平, 等. 基于非饱和Biot-Stoll模型的海底沉积物介质声频散特性研究[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(1): 180-188.
Zhu Zuyang, Wang Dong, Zhou Jianping, et al. Acoustic wave dispersion and attenuation in marine sediment based on partially gas-saturated Biot-Stoll model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(1): 180-188.
- [6] 陈静, 阎贫, 王彦林, 等. 基于Biot-Stoll模型声速反演中的参数选择——以南海南部沉积物为例[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(1): 50-54.
Chen Jing, Yan Pin, Wang Yanlin, et al. Choice of parameters for Biot-Stoll model-based inversion of sound velocity of seafloor sediments in the southern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(1): 50-54.
- [7] 王景强, 郭常升, 刘保华, 等. 基于Buckingham模型和Biot-Stoll模型的南沙海域沉积物声速分布特征[J]. *地球学报*, 2016, 37(3): 359-367.
Wang Jingqiang, Guo Changsheng, Liu Baohua, et al. Sound speed distribution of seafloor sediments in Nansha Islands sea based on Buckingham model and Biot-Stoll model[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(3): 359-367.
- [8] 陶春辉. 海底沉积物声学原位测试和特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
Tao Chunhui. In situ acoustic experiment and properties study in marine sediments[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [9] 陈静, 吕修亚, 陈亮, 等. 基于Chirp数据反演琼州海峡海底沉积物物性[J]. *热带地理*, 2017, 37(6): 874-879.
Chen Jing, Lü Xiuya, Chen Liang, et al. Physical properties of the seabed inversed by chirp data in the Qiongzhou Strait[J]. *Tropical Geography*, 2017, 37(6): 874-879.
- [10] Velis D R. Stochastic sparse-spike deconvolution[J]. *Geophysics*, 2008, 73(1): 1-9.
- [11] Puryear C I, Castagna J P. Layer-thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion: Theory and application[J]. *Geophysics*, 2008, 73(2): R37-R48.
- [12] Zhang Rui, Castagna J. Seismic sparse-layer reflectivity inversion using basis pursuit decomposition[J]. *Geophysics*, 2011, 76(6): R147-R158.
- [13] Yuan Sanyi, Wang Shangxu. Spectral sparse Bayesian learning reflectivity inversion[J]. *Geophysical Prospecting*, 2013, 61(4): 735-746.
- [14] Li X S, Zhou Q J, Su T Y, et al. Slope-confined submarine canyons in the Baiyun deep-water area, northern South China Sea: variation in their modern morphology[J]. *Marine Geophysical Research*, 2016(2): 95-112.
- [15] 丁巍伟, 黎明碧, 何敏, 等. 南海中北部陆架-陆坡区新生代构造-沉积演化[J]. *高校地质学报*, 2009, 15(3): 339-350.
Ding Weiwei, Li Mingbi, He Min, et al. Cenozoic tectono-sedimentary evolution in the middle part of northern continental shelf-slope region, South China Sea[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2009, 15(3): 339-350.
- [16] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(2): 168-178.
- [17] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(2): 179-191.
- [18] Stoll R D. Acoustic waves in saturated sediments[M]//Hampton L. *Physics of Sound in Marine Sediments*. Boston, MA: Springer, 1974: 19-39.
- [19] 朱林, 傅命佐, 刘乐军, 等. 南海北部白云凹陷陆坡海底峡谷地形地貌与沉积地层特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(2): 1-9.
Zhu Lin, Fu Mingzuo, Liu Lejun, et al. Canyon morphology and sediments on northern slope of the Baiyun Sag[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(2): 1-9.

- [20] 周庆杰, 李西双, 徐元芹, 等. 一种基于水深梯度原理的海底滑坡快速识别方法——以南海北部陆坡白云深水区为例[J]. 海洋学报, 2017, 39(1): 138–147.
Zhou Qingjie, Li Xishuang, Xu Yuanqin, et al. A rapid method to recognize submarine landslides based on the principle of water depth gradient: A case of Baiyun deep-water area, north slope of the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(1): 138–147.
- [21] 秦蕴珊. 中国陆棚海的地形及沉积类型的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(1): 71–85.
Qin Yunshan. A preliminary study on the topography and sedimentary types of continental shelf seas in China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1963, 5(1): 71–85.
- [22] 杨涛, 薛紫晨, 杨竞红, 等. 南海北部地区海洋沉积物中孔隙水的氢、氧同位素组成特征[J]. 地球学报, 2003, 24(6): 511–514.
Yang Tao, Xue Zichen, Yang Jinghong, et al. Oxygen and hydrogen isotopic compositions of pore water from marine sediments in the northern South China Sea[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2003, 24(6): 511–514.
- [23] 卢博. 东沙群岛海域沉积物及其物理性质的研究[J]. 海洋学报, 1996, 18(6): 82–89.
Lu Bo. Study on sediments and their physical properties in the waters of Dongsha Islands[J]. Haiyang Xuebao, 1996, 18(6): 82–89.
- [24] 李傲仙, 李延河, 乐国良. 深海沉积物中铀异常的成因[J]. 地球学报, 2005, 26(S1): 186–189.
Li Aoxian, Li Yanhe, Le Guoliang. The cause for tellurium enrichment in deep-sea sediments[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(S1): 186–189.
- [25] Liu Jianguo, Xiang Rong, Chen Zhong, et al. Sources, transport and deposition of surface sediments from the South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2013, 71: 92–102.
- [26] Zhao Hongquan, Jian Zhimin, Li Baohua, et al. Microtektites in the Middle Pleistocene deep-sea sediments of the South China Sea[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1999, 42(5): 531–535.
- [27] 业治铮, 何起祥, 张明书, 等. 西沙石岛晚更新世风成生物砂屑灰岩的沉积构造和相模式[J]. 沉积学报, 1985, 3(1): 1–15.
Ye Zhizheng, He Qixiang, Zhang Mingshu, et al. Sedimentary structure and facies pattern of bioarenaceous limestone in late pleistocene of Xisha Shidao[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985, 3(1): 1–15.
- [28] 刘乐军, 傅命佐, 李家钢, 等. 荔湾3-1气田海底管道深水段地质灾害特征[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(2): 162–174.
Liu Lejun, Fu Mingzuo, Li Jiagang, et al. Geologic hazards in the deep pipeline routing area of the Liwan 3-1 Gas Field in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(2): 162–174.
- [29] Zhou Qingjie, Li Xishuang, Zhou Hang, et al. Characteristics and genetic analysis of submarine landslides in the northern slope of the South China Sea[J]. *Marine Geophysical Research*, 2018, 40(3): 303–314.
- [30] 卢博, 李赶先, 黄韶健, 等. 中国黄海、东海和南海北部海底浅层沉积物声学物理性质之比较[J]. 海洋技术, 2005, 24(2): 28–33.
Lu Bo, Li Ganxian, Huang Shaohuan, et al. The comparing of seabed sediment acoustic-physical properties in the Yellow Sea, the East China Sea and northern the South China Sea[J]. *Ocean Technology*, 2005, 24(2): 28–33.
- [31] 黄绪德. 计算机在地质中的应用[J]. 物探化探计算技术, 1991, 13(2): 93–97.
Huang Xude. Computer applications to geoscience[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 1991, 13(2): 93–97.
- [32] 刘财, 刘洋, 王典, 等. 一种频域吸收衰减补偿方法[J]. 石油物探, 2005, 44(2): 116–118.
Liu Cai, Liu Yang, Wang Dian, et al. A method to compensate strata absorption and attenuation in frequency domain[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2005, 44(2): 116–118.
- [33] 张志军, 周东红, 孙成禹, 等. 基于三维模型数据的地震振幅补偿处理技术的保幅性分析[J]. 物探与化探, 2015, 39(3): 621–626.
Zhang Zhijun, Zhou Donghong, Sun Chengyu, et al. An analysis of the amplitude preservation of seismic amplitude compensation processing technology based on 3D model data[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(3): 621–626.
- [34] Park C, Kim W, Shin J, et al. Study on acoustic impedance conversion using an optimal chirplet analyzed in chirp SBP raw data[J]. *Marine Geophysical Research*, 2019, 40(3): 385–393.
- [35] 赵利, 彭学超, 钟和贤, 等. 南海北部陆架区表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪, 2016, 36(6): 111–122.
Zhao Li, Peng Xuechao, Zhong Hexian, et al. Characteristics of grain size distribution of surface sediments and depositional environments in the northern shelf region of the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(6): 111–122.

Physical properties of the seabed inversed based on Chirp data and the Biot-Stoll model in the northern continental slope of the South China Sea

Zhou Qingjie^{1,2}, Li Xishuang^{1,3}, Liu Lejun¹, Liu Yangting^{1,2}, Gao Shan^{1,2}, Zhou Hang¹,
Wang Jingqiang^{1,2}, Li Tianguang¹

(1. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China; 3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China)

Abstract: Sub-bottom profile is based on the acoustic signal (frequency in hundreds to thousands Hz) in the sediment propagation to reflect the sedimentary formation structure. The seabed reflection coefficient is closely related to the sediments physical properties. The Biot-Stoll theoretical model can predict the physical properties of seabed sediments and establish the relationship between acoustic parameters such as reflection coefficient and physical parameters, but the results obtained by using different parameters in different sea areas are different. For this, this article is based on the measured sediments physical parameters in the northern slope of the South China Sea to establish the relationship between the reflection coefficient and the sediments physical parameters based on Biot-Stoll model. The results show that the calculated value of the model is in good agreement with the measured value of the sample, and the equation for the relationship between the bottom reflection coefficient and the porosity, density, mean grain size of sediments at a frequency of 3.5 kHz is established. The equation has a high fitting degree, and the determination coefficient R^2 is all greater than 0.99. On the basis of calculating the seabed reflection coefficient by the typical Chirp profile data, the porosity, density and mean grain size of the sub-bottom sediments are inversed. The relative errors of the inversion porosity, density, mean grain size and the measured porosity, density, mean grain size are all less than 5%, and the results are basically consistent with the measured values, indicating that the inversion method is feasible in the northern continental slope area of the South China Sea.

Key words: Chirp sub-bottom profile data; Biot-Stoll model; seabed reflection coefficient; physical properties of sediments; northern slope of the South China Sea