



基于浅地层剖面数据和改进地声模型的底质反演方法

孙振银, 王 虎, 李冠霖

Seabed classification based on sub-bottom profile data in modified geo-acoustic model

SUN Zhenyin, WANG Hu, and LI Guanlin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022102801>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浅地层剖面 and 单道地震测量在海砂勘查中的联合应用

Combined application of sub-bottom and single-channel seismic profiles to marine sand and gravel resource prospecting
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 207-214

基于HHT方法的地层Q值补偿方法研究

Research of compensation method for formation Q value based on HHT method
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 175-183

泰国湾底质沉积物输运趋势

MOVING TREND OF BOTTOM SEDIMENTS IN GULF OF THAILAND
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 86-92

水合物分解区地层砂粒启动运移临界流速计算模型

CALCULATION MODEL FOR CRITICAL VELOCITY OF SAND MOVEMENT IN DECOMPOSED HYDRATE CEMENTED SEDIMENT
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(5): 166-173

基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用

Generalized free surface multiple suppression technique based on model optimization and its application to the deep water of the Indian Ocean
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 221-230

临汾盆地黄土粒度分布的端元模型研究

End member model analysis of grain size for the loess in Linfen Basin, China
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 192-200



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙振银, 王虎, 李冠霖. 基于浅地层剖面数据和改进地声模型的底质反演方法 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(1): 170-178.

SUN Zhenyin, WANG Hu, LI Guanlin. Seabed classification based on sub-bottom profile data in modified geo-acoustic model[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(1): 170-178.

基于浅地层剖面数据和改进地声模型的底质反演方法

孙振银¹, 王虎^{1,2}, 李冠霖¹

1. 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072

2. 自然资源部海洋观测技术重点实验室, 天津 300112

摘要: 浅地层剖面仪发射的声脉冲能够穿透海底面进入沉积层内部, 其回波中携带了丰富的底质信息。地声模型是底质声学物理性质关系的数学描述, 广泛用于海底声学及地声反演研究。本文通过对浅地层剖面数据的处理、解译得到海底反射系数, 与考虑底质松密影响的改进 Biot-Stoll 模型相结合, 提出底质反演新方法并开展实例验证。研究表明: 通过对浅地层剖面原始记录的读取、解译, 提取反射波振幅, 并结合设备声源级, 可有效求取海底反射系数。通过引入相对密度改进孔隙度计算公式, 进而在基于 Biot-Stoll 模型构建海底反射系数和底质平均粒径关系过程中进一步考虑了底质松密的影响。基于山东威海某海域及文献的算例均显示, 本文提出的改进地声模型可缩小底质反演与实测结果之间的相对误差、提升基于浅地层剖面数据的海底底质地声反演精度。

关键词: 浅地层剖面; 底质反演; Biot-Stoll 模型; 海底反射系数; 平均粒径

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022102801

Seabed classification based on sub-bottom profile data in modified geo-acoustic model

SUN Zhenyin¹, WANG Hu^{1,2}, LI Guanlin¹

1. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. Key Laboratory of Ocean Observation Technology, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300112, China

Abstract: The echoes signal of sub-bottom profilers (SBP) carry abundant information of sediment because the acoustic pulses emitted by SBP can penetrate the seafloor surface into the interior of sediment layers and get reflected from different impedance interface. A geoacoustic model describing the relationship between the acoustics and physical properties of sediments mathematically, is widely used in sediment classification and acoustics inversion. We applied the method to obtain the bottom reflection coefficients by decoding the SBP data, and then combined it with a modified Biot-Stoll model considering the influence of sediment's degree of compaction, based on which a new method of sediment inversion was proposed to evaluate its capacity by examples. Results show that the bottom reflection coefficient of seafloor can be effectively obtained by decoding the original records of SBP, extracting the amplitude of the reflected waves, and combining with the sound source level of the equipment. To build the relationship between bottom reflective coefficient and mean grain size, the degree of sediment compaction was considered based on Biot-Stoll model and the parameter of relative density was introduced into the porosity calculation formula. Examples of both measured data of Weihai sea area and those obtained from available literatures indicate that the presented method could reduce the relative error between the inversion and the measured mean grain sizes, contributing to improve the accuracy of submarine sediment geoacoustic inversion based on SBP data.

Key words: sub-bottom profile; sediment inversion; Biot-Stoll model; reflection coefficient; mean grain size

海底底质探测主要用于获取海底浅表沉积物的类型和性质, 是海洋地质调查、海洋工程勘察与海洋测绘的重要内容^[1]。海底底质探测主要有底质

取样分析和声学遥测两种技术手段。底质取样分析, 即利用蚌式、箱式、重力等取样器现场采取底质样品并在船上或实验室开展分析测试, 是获取底

资助项目: 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金项目“基于声学遥测的近海底质精细化识别研究”(201805); 天津市自然科学基金项目“欠驱动 AUV 编队控制中的通信受限和不确定干扰问题研究”(21JCQNJC00650)

作者简介: 孙振银 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋测绘方面的研究, E-mail: 3016227015@tju.edu.cn

通讯作者: 王虎 (1986—), 男, 副教授, 主要从事海洋工程地质方面的研究, E-mail: hu.wang@tju.edu.cn

收稿日期: 2022-10-28; **改回日期:** 2022-12-26. 周立君编辑

质分类和性质最直接、最有效的方法,但耗资大、耗时长、只能获取离散点的底质信息。基于声学遥测进行海底底质探测,指利用单波束、多波束、侧扫声呐等声学遥测手段获得海底反向散射强度或声呐图像^[2]并从中提取谱特征、纹理特征^[3]、角度响应曲线^[4]、分形维^[5]、反向散射强度^[6-8]等进行底质识别,其测量效率高,可获取线、面形式的相对连续的底质信息,已形成了相应的商业软件^[9]。然而,海底反向散射强度和声呐图像主要通过高频声学信号获取,包含了底质类型与性质,以及海底地形、微地貌、底栖生物等在内的海底面综合信息,精确解译底质信息难度大。

浅地层剖面仪是另一种常见的声学遥测设备,与单波束、多波束、侧扫声呐相比,其工作频率更低^[10],近似正向入射的声波可穿透海底面进入沉积层内部^[11],接收海底面及各沉积层面的反射波。目前,浅地层剖面探测主要用于获取水下浅部地层结构与构造^[12],已有学者尝试从浅地层剖面数据中提取声衰减、声阻抗、海底反射损失等参数^[13-17],基于这些参数或进一步结合 Biot 模型^[18-19]和 Biot-Stoll 模型^[20]开展底质分类研究。其中,Biot^[21]将底质假设为由固体颗粒和孔隙流体组成的多孔弹性介质,考虑了孔隙流体在底质颗粒孔隙内的粘滞运动,解释了声波传播及损失的原因。Stoll^[22]在 Biot 理论基础上,进一步将孔隙流体中的声波与固体颗粒骨架中的压缩波与剪切波耦合,形成了快压缩波、慢压缩波和剪切波等三种波。Biot-Stoll 模型具有较

为完备的物理基础,被广泛用于描述底质声学、物理、力学性质之间的关系^[23-26],底质的声学特性与其软硬、粗细、松密密切相关^[27],但目前,基于 Biot-Stoll 模型的底质反演研究多考虑粒径粗细^[23-26],鲜有关注松密的影响。

因此,本文首先给出从浅地层剖面数据中提取海底反射系数的方法,然后通过引入相对密度得到考虑底质松密影响的改进 Biot-Stoll 模型,将二者结合构建海底反射系数与底质平均粒径之间的关系进行底质反演,最后基于实际算例初步验证了本文方法的有效性。

1 基于浅地层剖面数据提取海底反射系数

1.1 浅地层剖面探测原理

浅地层剖面仪发射的低频声波以近似垂直的方式入射到达海底,部分声波在海底面反射,部分声波穿透海底面进入沉积层内部并在不同层面处发生反射(图 1),接收换能器按照各反射界面阻抗特性和深度的不同收到回波。通过对这些回波数据进行滤波、放大等处理,从而获取水下浅部地层结构、构造和沉积物特征^[11]。

1.2 浅地层剖面数据读取

浅地层剖面原始记录携带了海底面及沉积层

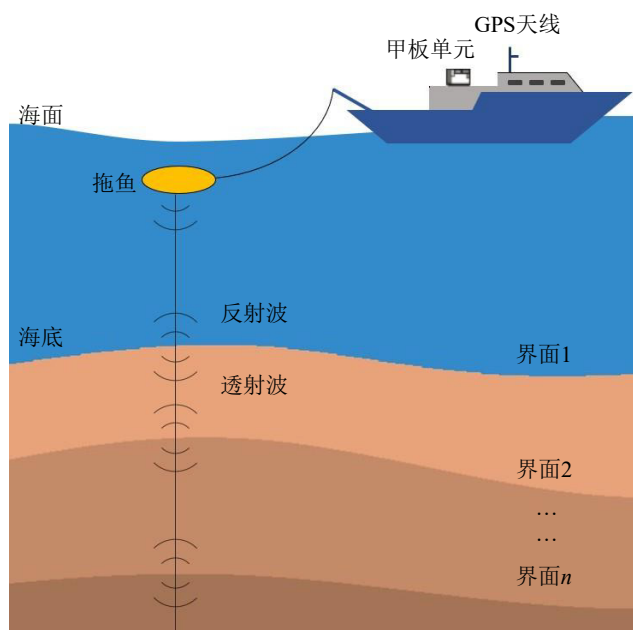


图 1 浅地层剖面探测原理

Fig.1 Principle of sub-bottom profiling

内部信息,根据其数据结构^[28],在 Matlab 环境下编程读取 SEGY 格式文件中解析信号形式的海底回波振幅信息。然后,以每条测线的 Ping 值作为行向量,每 Ping 采样点数作为列向量存储回波信息。

1.3 海底反射系数提取

声波在海水-海底界面反射的强弱由海底反射系数表征。通常来说,相对粗糙和坚硬的岩、砾,比沙、泥的声反射更强,其海底反射系数也更大,因此,海底反射系数常被用于底质分类^[29]。海底反射系数 R 可通过下式计算:

$$R = \frac{A_r}{A_i} \quad (1)$$

式中, A_r 为反射波振幅,通过对海底反射波频谱分析,取中心频率的振幅获得; A_i 为入射波振幅,对基于 Chirp 信号的浅地层剖面数据,可通过有效声压代替^[15]:

$$P_{\text{eff}} = 10^{\frac{\text{SPL}}{20}} \cdot P_{\text{ref}} \quad (2)$$

式中, P_{eff} 为有效声压强度(Pa), SPL 为发射信号的声源级(dB), P_{ref} 为海水中参考声压强度,表层海水取 10^{-6} Pa。假设海水均匀,在不考虑海水的吸收损失的情况下,需要对海底反射波进行球面扩散补偿^[30],海底反射系数计算公式可进一步表示为^[15]:

$$R = \frac{A_r \cdot T \cdot V_w}{P_{\text{eff}}} \quad (3)$$

式中,海水声速 V_w 取 1500 m/s, T 为反射波的双程走时(s)。

以一条测线的浅地层剖面记录为例,提取海底反射系数流程如下:

(1)识别海底位置。搜索每 Ping 数据中的海底反射振幅,根据浅地层剖面图像和海底的连续性识别海底,具体方法为:搜索每 Ping 数据中的最大值,作为海底的预估位置;取前三 Ping 预估位置的平均深度为基准值,将下一 Ping 预估值与基准值做差,若小于 100、则选用,若超过 100、则以基准值代替预估值;依次校正,最终确定该条测线所有海底位置。

(2)提取反射波振幅。根据已确定的海底位置,从浅地层剖面原始记录中提取对应的海底反射信息并进行频谱分析,得到反射波中心频率(8.5 kHz)处的振幅信息。

将振幅信息和走时代入公式(3)得到某典型测线的海底反射系数见图 2 所示,反射系数主要位于 0.1~0.5 区间、滑动平均值为 0.12~0.25,与实测^[31]及基于浅地层剖面数据提取^[19-20,24]的反射系数范围相一致,并且沿测线呈现出一定的变化特征,表明了本文结果的可靠性和方法的可行性。

2 改进孔隙度计算

2.1 Biot-Stoll 模型

Biot^[21]将底质假设作为一种由孔隙流体和固体颗粒构成的多孔弹性介质,描述了声波在多孔介质中的传播规律。Stoll^[22]在 Biot 模型基础上,定义了 H 、 C 、 M 三个模量来表征颗粒骨架的弹性和非弹性响应,并结合动力方程推导出快、慢两种纵波在多孔介质中的传播方程:

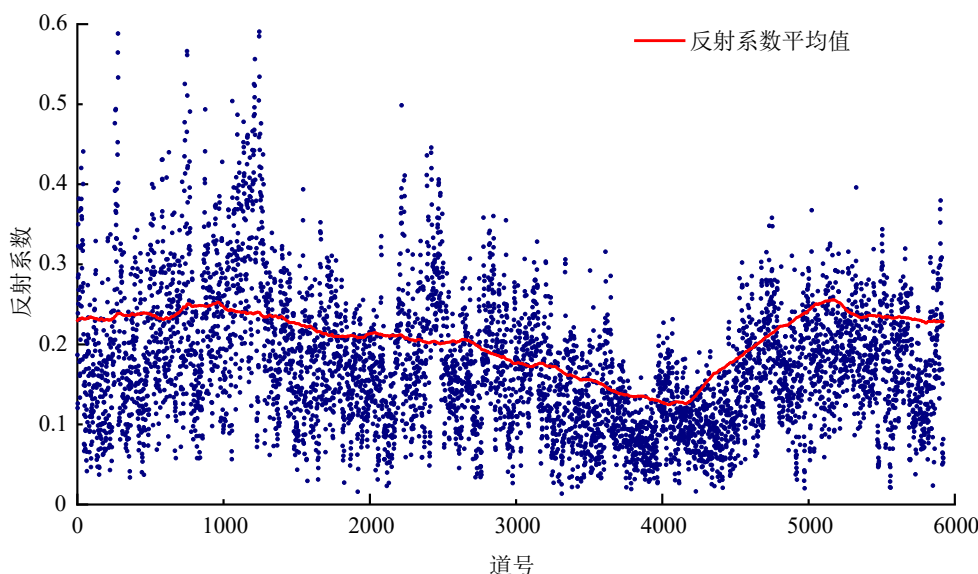


图 2 基于浅地层剖面数据计算得到的某测线海底反射系数

Fig.2 Sea bottom reflection coefficients of a survey line calculated from SBP data

$$\nabla^2 (He - C\zeta) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho e - \rho_f \zeta) \tag{4}$$

$$\nabla^2 (Ce - M\zeta) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho_f e - m\zeta) - \frac{\eta}{\kappa} \frac{\partial \zeta}{\partial t} \tag{5}$$

式中, H 表示弹性模量, e 表示骨架应变, C 为附加弹性模量, ζ 为流入或流出的液体体积(m^3), t 是时间(s), ρ 和 ρ_f 分别是底质密度和孔隙流体密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), M 表示复弹性模量, η 是孔隙流体粘滞系数($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), κ 是渗透率(m^2), m 是宏观压力梯度下流体流动的相位, 计算公式为:

$$m = \frac{F\rho_f}{n} \tag{6}$$

式中, F 为弯曲度, n 为底质孔隙度(%)。

2.2 孔隙度计算

孔隙度是影响底质压缩声速变化的重要参数^[32], 对 Biot-Stoll 模型计算结果影响显著^[21-22], 其计算公式为:

$$n = \frac{\rho - \rho_s}{(1 - S_r)\rho_g + S_r\rho_f - \rho_s} \tag{7}$$

式中, ρ_s 为颗粒密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), S_r 为饱和度(忽略浅层气影响、即海床完全饱和的情况下, S_r 取为 1)。可以看出, 当前公式主要通过体积密度、颗粒密度和孔隙流体密度计算孔隙度, 实测的沉积物孔隙度^[33] 普遍大于公式(7)计算得到的理论值。相对密度表征无黏性底质的松密程度, 对其性质有重要影响, 因此, 本文引入相对密度对公式(7)进行改进:

$$n = \left(\frac{\rho - \rho_s}{(1 - S_r)\rho_g + S_r\rho_w - \rho_s} \right) \times e^{a \times D_r} \tag{8}$$

式中, D_r 为相对密度, a 为相对密度改正系数, 由基于状态可控试验的实测数据^[33] 获取, 该实验以相对密度为控制变量制备不同状态的砂土和粉土试样, 使用超声探测仪进行压缩波速和物理性质测试。 D_r 计算公式为:

$$D_r = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}} \tag{9}$$

式中, $n_{\max}$ 和 $n_{\min}$ 分别为最大、最小孔隙度(%), 参照文献^[34-37] 给出不同平均粒径条件下的取值(表 1)。根据表 1 中不同粒径条件下的 $n_{\max}$ 、 $n_{\min}$ 和表 2 中的实测孔隙度 n 计算得到 D_r , 利用最小二乘法得到孔隙度计算值与实测值均方根误差最小时的改正系数 $a=0.0366$ 。

2.3 海底反射系数与平均粒径关系

本文通过 Biot-Stoll 模型计算不同平均粒径底质的声速, 进而得到反射系数与平均粒径的关系。

表 1 不同平均粒径条件下最大和最小孔隙度取值^[34-37]
Table 1 Maximum and minimum porosity values of different mean grain-sizes

平均粒径/ Φ	最大孔隙度 $n_{\max}/\%$	最小孔隙度 $n_{\min}/\%$
0~2	41	29
2~3	53	37
3~4	60	40
4~5	69	40
5~6	75	42
6~7	83	56
7~8	86	57
8~9	90	59
9~10	91	66

表 2 状态可控试验实测数据^[33]
Table 2 Measured physical parameters of state-controlled experiments

底质类别	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	相对密度	孔隙度 $n/\%$	饱和度 S_r
粉土	2.00	0.67	40.79	0.994
	1.99	0.60	41.81	0.995
	2.01	0.69	40.45	0.994
	2.01	0.70	40.41	0.997
	2.03	0.75	39.66	0.998
	2.05	0.86	37.97	0.998
	2.07	0.92	37.10	0.999
	2.04	0.82	38.57	0.999
砂土	2.03	0.39	38.33	0.992
	2.16	0.70	30.72	0.994
	1.93	0.44	44.18	0.982
	2.05	0.67	37.55	0.994
	2.00	0.52	40.45	0.992
	2.13	0.77	32.64	0.989
	1.94	0.33	43.37	0.981
	2.00	0.63	39.9	0.978
	2.08	0.44	35.55	0.989
	2.17	0.74	30.23	0.993
	1.92	0.32	44.99	0.986
	2.02	0.58	38.8	0.971

Biot-Stoll 模型共有 13 个参数, Stoll^[22] 通过测试, 分别给出了泥和砂两种底质的参数取值方法, Schock^[18]

进一步将渗透率、弯曲度、孔隙半径等参数函数化并给出计算表达式,陈静^[38]则证明 Schock 参数的计算效果更好。

本文底质密度 $\rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ 由 Hamilton^[33] 经验公式估算:

$$\rho = 0.0080\Phi^2 - 0.1750\Phi + 2.3740 \quad (10)$$

其中, Φ 为底质平均粒径,其他参数参照文献^[18,22,38] 中的经验值或经验公式获取,详见表 3。

底质孔隙度 n 则分别根据公式(7)和公式(8)计算,将运用引入相对密度影响的孔隙度计算公式(8)的 Biot-Stoll 模型称为“改进 Biot-Stoll 模型”。将上述参数输入 Biot-Stoll 模型,计算得到底质声速 $V_p(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$,再代入下式求取海底反射系数^[39]:

$$R = \frac{V_p\rho - V_w\rho_w}{V_p\rho + V_w\rho_w} \quad (11)$$

计算得到的海底反射系数 R 与平均粒径的关系如图 3 所示,平均粒径随 R 的增大而减小,并且平均粒径相同时,改进 Biot-Stoll 模型得到的 R 更小。

3 实例验证

3.1 研究区概况与数据获取

在山东省威海市北部海域获取实测数据,水深 20~70 m,等深线走向与海岸线近似平行(图 4)。使用 Edgetech 3100P 浅地层剖面仪进行数据采集,设备声源级 202 dB,采样频率 21 701 Hz,每 Ping 采样点数 2 604,Chirp 信号频率 2~15 kHz、中心频率 8.5 kHz、脉冲宽度 20 ms,主测线间距 60 m,检查线与主测线垂直(图 4)。同时,在测区使用 DDC1 型蚌式取样器采取底质样品 12 组,取样点在测区均

表 3 Biot-Stoll 模型参数取值

Table 3 The input physical parameters of the Biot-Stoll model

物理参数	参数取值
颗粒密度 $\rho_s/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 690
颗粒体积模量 K_s/Pa	3.2×10^{10}
流体密度 $\rho_f/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 023
流体体积模量 K_f/Pa	2.395×10^9
黏滞系数 $\eta/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	0.001
渗透率 κ/m^2	$\kappa = \frac{d^2 n^3}{180(1-n)^2} \frac{1}{\sqrt{10}}$, d 为粒径(mm)
弯曲度 Γ	$\Gamma = \begin{cases} 1.35 & \varphi \leq 4 \\ -0.3 + 0.4125\varphi & 4 < \varphi < 8 \\ 3.0 & \varphi \geq 8 \end{cases}$
孔隙半径 r/m	$r = \frac{d}{3} \frac{n}{(1-n)} \frac{1}{1.8}$
骨架体积模量 K_b/Pa	$K_b = \frac{2\mu(1+\sigma)}{3(1-2\sigma)}$, σ 为骨架泊松比,
骨架剪切模量 μ/Pa	$\sigma = \begin{cases} 0.15 & \varphi \leq 4 \\ -0.05 + 0.05\varphi & 4 < \varphi < 8 \\ 0.35 & \varphi \geq 8 \end{cases}$
	1.3×10^7

匀布置,取样深度 10~30 cm,每站取样量不少于 300 g。在实验室内使用筛分-沉降法测试得到底质样品的粒径级配曲线及平均粒径。

3.2 反演结果分析

按照第 1 节方法得到每条测线各 Ping 的海底反射系数,用克里金插值得到研究区内反射系数分布(图 5),从中按照 12 个取样点坐标提取对应海底反射系数,按照第 2 节方法反演得到海底底质平均粒径,与取样点实测平均粒径进行对比。如表 4 所示,改进 Biot-Stoll 模型反演结果与实测平均粒径的相对误差为 0.41%~15.13%,总体误差水平较低。并且,改进模型反演 12 个底质点中的 9 个相对误差

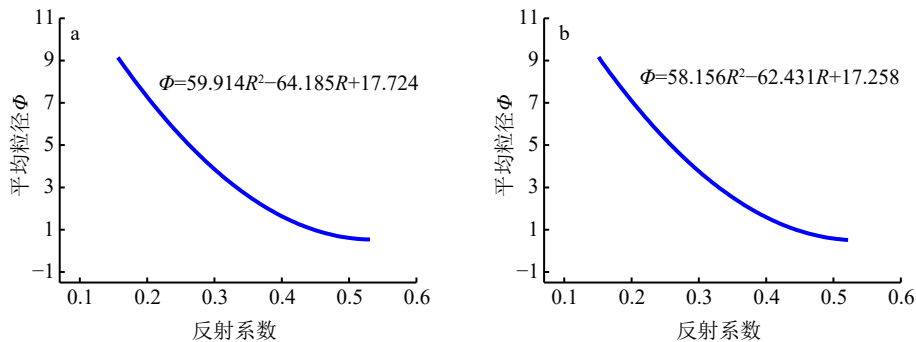


图 3 海底反射系数与平均粒径的关系

a: Biot-Stoll 模型; b: 改进 Biot-Stoll 模型。

Fig.3 The relationship between reflection coefficient and mean grain size

a: Biot-Stoll model; b: Modified Biot-Stoll model.

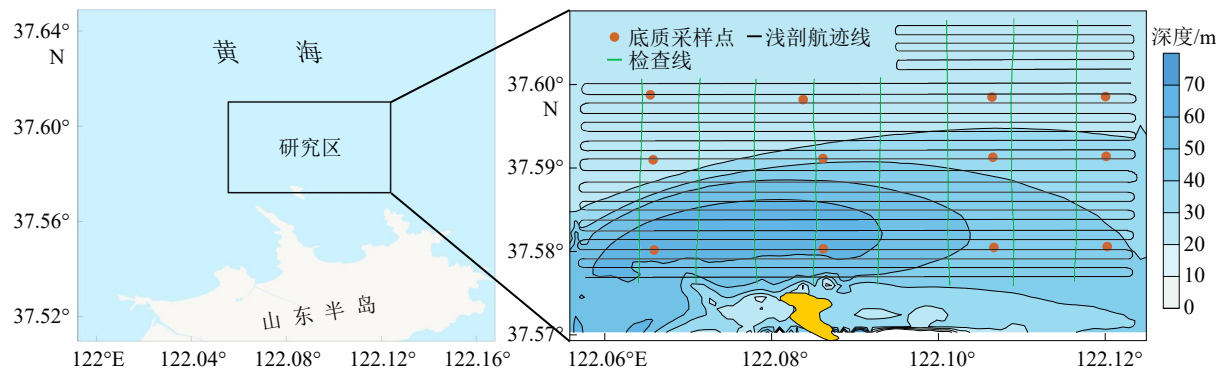


图 4 研究区位置及浅地层剖面航迹线和底质取样站位

Fig.4 The study area and the deployment of the sub-bottom profiler track lines, and sediment sampling stations (red dots)

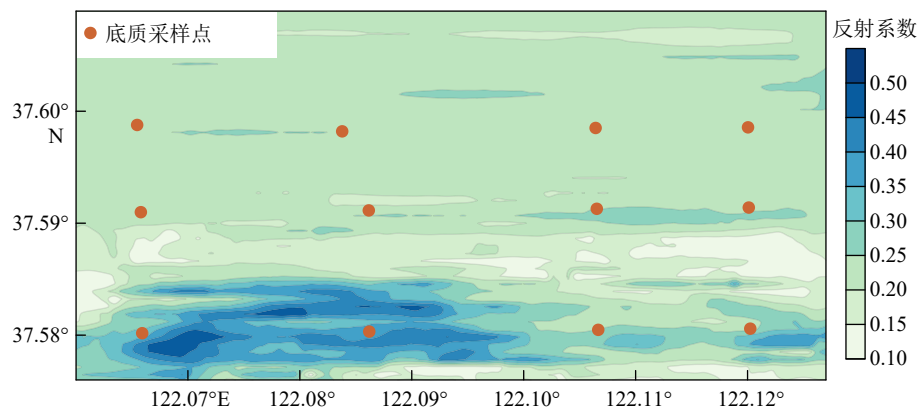


图 5 研究区反射系数分布图

Fig.5 Distribution of reflection coefficients in the study area

表 4 地声反演与实测结果比较

Table 4 Comparison between inversion and measured mean grain-size

实测平均 粒径/ Φ	Biot-Stoll模型反演结果			改进Biot-Stoll模型反演结果		
	反演值	相对误差/%	平均值/%	反演值	相对误差/%	平均值/%
5.28	5.89	11.70	6.51	5.79	8.87	5.06
5.04	5.50	9.11		5.41	6.34	
5.08	5.23	3.02		5.14	0.41	
5.12	5.54	8.20		5.44	5.46	
5.24	5.29	0.95		5.19	1.61	
5.24	5.56	6.06		5.46	3.37	
5.20	5.60	7.67		5.50	4.94	
5.17	5.51	6.48		5.41	3.79	
5.50	5.59	1.63		5.49	0.94	
5.56	5.26	5.31		5.17	7.71	
1.96	2.06	5.01		2.02	2.20	
5.11	4.45	12.93		4.37	15.13	

比传统模型有所降低, 相对误差平均值也从 6.51% 降至 5.06%, 提升了底质反演精度。

为进一步验证本文改进 Biot-Stoll 模型的底质反演效果, 从文献 [19-20,40] 的浅地层剖面数据中提取海底反射系数以及实测平均粒径数据进行计算, 从表 5 可以看出, 改进 Biot-Stoll 模型在传统 Biot-Stoll 模型基础上将反演值与实测值的平均相对误差从 29.69% 降到了 27.22%, 并提升了所有 21 个点中的 20 个点的底质反演精度。所以, 基于实测数据和文献数据的算例结果显示出本文改进 Biot-Stoll 模型进行底质反演对于不同区域、不同底质类型具有较好的适用性。

海底底质由固体颗粒和孔隙水组成, 声波在固体颗粒中的传播速度比孔隙水的传播速度更快, 同一种底质其相对密度越大、固体颗粒排列越紧密, 则声波传播的有效路径越短, 因而表现出相对较大的宏观声速, 进而影响海底反射系数。相对密度比体积密度更好地表征了底质的松密程度, 正是基于此物理基础, 本文引入相对密度改进对孔隙度计算公式, 形成改进 Biot-Stoll 模型并提升了底质反演精度。

表 5 地声反演与文献结果比较

Table 5 Comparison between inversion results and those from published sources

数据 来源	实测平均 粒径/ Φ	Biot-Stoll模型反演结果			改进Biot-Stoll模型反演结果		
		反演值	相对误 差/%	平均 值/%	反演值	相对误 差/%	平均 值/%
周庆杰 ^[20]	5.50	7.31	32.85		7.12	29.46	
	6.20	8.14	31.24		7.93	27.89	
	8.30	9.87	18.86		9.61	15.81	
	8.40	10.27	22.22		10.00	19.08	
	8.70	10.77	23.74		10.49	20.55	
黄必桂 ^[40]	6.56	7.38	12.55		7.20	9.68	
	6.94	7.54	8.65		7.35	5.88	
	7.49	9.10	21.45		8.86	18.33	
	7.25	9.40	29.66		9.16	26.33	
	7.06	10.55	49.48		10.28	45.62	
	7.48	10.92	45.99	29.69	10.64	42.22	27.22
	6.78	10.46	54.33		10.19	50.35	
	7.08	10.57	49.33		10.30	45.49	
	6.81	10.05	47.64		9.80	43.84	
	6.64	9.95	49.91		9.70	46.05	
	6.39	9.64	50.90		9.39	47.02	
	6.08	9.81	61.41		9.56	57.26	
	6.27	9.81	56.52		9.56	52.49	
Zheng ^[19]	6.23	9.32	49.59		9.08	45.75	
	6.64	4.45	33.03		4.34	34.73	
	6.64	7.28	9.63		7.10	6.84	

4 结论

本文首先给出基于浅地层剖面数据提取海底反射系数的方法,然后引入相对密度改进孔隙度计算公式,形成考虑底质松密影响的改进 Biot-Stoll 模型,最后将二者结合反演底质平均粒径并与实测值进行了对比验证,得到以下结论。

(1)低频正向入射的浅地层剖面回波信号中包含了丰富的底质信息,通过对浅地层剖面原始记录的读取、解译,提取反射波振幅,并结合设备声源级,可在不需要额外现场声学测量工作的前提下,通过对浅地层剖面数据的进一步挖掘,获取近乎“真实”的海底反射系数。

(2)基于状态可控试验实测数据引入相对密度对孔隙度计算公式进行改进,得到进一步表征底质松密程度的改进 Biot-Stoll 地声模型,结合浅地层剖面提取出的反射系数进行底质反演,基于本文及文献实测数据的算例均显示其进一步提升了底质反演精度、对于不同区域和不同底质类型具有较好的适用性。

参考文献 (References)

[1] 何起祥, 李绍全, 刘健. 海洋碎屑沉积物的分类[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(1): 115-121. [HE Qixiang, LI Shaoquan, LIU Jian. Classification of marine clastic sediments [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(1): 115-121.]

[2] 赵玉新, 赵廷. 海底声呐图像智能底质分类技术研究综述[J]. 智能系统学报, 2020, 15(3): 587-600. [ZHAO Yuxin, ZHAO Ting. Survey of the intelligent seabed sediment classification technology based on sonar images [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2020, 15(3): 587-600.]

[3] 徐超, 李海森, 王川, 等. 基于合成核SVM的多波束海底声呐图像底质分类研究[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2437-2442. [XU Chao, LI Haisen, WANG Chuan, et al. Seabed classification of multi-beam seabed acoustic image based on composite kernel SVM [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2437-2442.]

[4] 金绍华, 肖付民, 边刚, 等. 利用多波束反向散射强度角度响应曲线的底质特征参数提取算法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2014, 39(12): 1493-1498. [JIN Shaohua, XIAO Fumin, BIAN Gang, et al. A method for extracting seabed feature parameters based on the angular response curve of multibeam backscatter strength [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(12): 1493-1498.]

[5] 卜英勇, 周木荣. 基于连续小波变换和分形理论的水下回波特征提取[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(11): 44-46. [BU Yingyong, ZHOU Murong. Feature extraction of underwater echoes based on continuous wavelet transform and fractal theories [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(11): 44-46.]

[6] Hasan R C, Ierodiconou D, Laurenson L. Combining angular response classification and backscatter imagery segmentation for benthic biological habitat mapping [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 97: 1-9.

[7] Alevizos E, Snellen M, Simons D G, et al. Acoustic discrimination of relatively homogeneous fine sediments using Bayesian classification on MBES data [J]. Marine Geology, 2015, 370: 31-42.

[8] Snellen M, Eleftherakis D, Amiri-Simkooei A, et al. An inter-comparison of sediment classification methods based on multi-beam echosounder backscatter and sediment natural radioactivity data [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(2): 959-970.

[9] 唐秋华, 纪雪, 丁继胜, 等. 多波束声海底质分类研究进展与展望[J]. 海洋科学进展, 2019, 37(1): 1-10. [TANG Qiuhua, JI Xue, DING Jisheng, et al. Research progress and prospect of acoustic seabed clas-

- sification using multibeam echo sounder [J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(1): 1-10.]
- [10] 罗宇, 郑旭, 施剑, 等. 基于浅地层回波信号的底质分类技术研究[J]. 海洋技术学报, 2020, 39(6): 42-47. [LUO Yu, ZHENG Xu, SHI Jian, et al. Study on the seabed classification approach based on echo signal of sub-bottom profiler [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2020, 39(6): 42-47.]
- [11] 张同伟, 秦升杰, 王向鑫, 等. 深海浅地层剖面探测系统现状及展望[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(5): 547-554. [ZHANG Tongwei, QIN Shengjie, WANG Xiangxin, et al. Technical status and development trend of deep sea sub-bottom profiler [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2018, 15(5): 547-554.]
- [12] 李平, 杜军. 浅地层剖面探测综述[J]. 海洋通报, 2011, 30(3): 344-350. [LI Ping, DU Jun. Review on the probing of sub-bottom profiler [J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(3): 344-350.]
- [13] Stevenson I R, McCann C, Runciman P B. An attenuation-based sediment classification technique using Chirp sub-bottom profiler data and laboratory acoustic analysis [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2002, 23(4): 277-298.
- [14] Theuillon G, Stephan Y, Pacault A. High-resolution geoaoustic characterization of the seafloor using a subbottom profiler in the gulf of lion [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2009, 33(3): 240-254.
- [15] 郑江龙, 童思友, 许江. 基于Chirp源浅地层剖面资料计算海底反射损失[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1256-1261. [ZHENG Jianglong, TONG Siyou, XU Jiang. Estimating seabed reflection loss from Chirp sub-bottom profile [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(3): 1256-1261.]
- [16] 刘玉萍, 丁龙翔, 杨志成, 等. 利用浅剖资料进行海底底质分析[J]. 物探与化探, 2016, 40(1): 66-72. [LIU Yuping, DING Longxiang, YANG Zhicheng, et al. Seabed sediment analysis using sub-bottom profile data [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(1): 66-72.]
- [17] Saleh M, Rabah M. Seabed sub-bottom sediment classification using parametric sub-bottom profiler [J]. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2016, 5(1): 87-95.
- [18] 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.
- [19] Zheng H B, Yan P, Chen J, et al. Seabed sediment classification in the northern South China Sea using inversion method [J]. *Applied Ocean Research*, 2013, 39: 131-136.
- [20] 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. [ZHOU Qingjie, LI Xishuang, LIU Lejun, et al. 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 [J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(3): 72-82.]
- [21] Biot M A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media [J]. *Journal of Applied Physics*, 1962, 33(4): 1482-1498.
- [22] Stoll R D. Acoustic waves in ocean sediments [J]. *Geophysics*, 1977, 42(4): 715-725.
- [23] 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.]
- [24] 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, LYU 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.]
- [25] Kimura M. Study on the Biot-Stoll model for porous marine sediments [J]. *Acoustical Science and Technology*, 2007, 28(4): 230-243.
- [26] Kan G M, Meng X M, Wang J Q, et al. Shear wave speed dispersion characteristics of seafloor sediments in the northern south China sea [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2022, 21(1): 91-100.
- [27] 孟祥梅, 刘保华, 阚光明, 等. 南黄海海底沉积物声学特性及其影响因素试验研究[J]. 海洋学报, 2012, 34(6): 74-83. [MENG Xiangmei, LIU Baohua, KAN Guangming, et al. An experimental study on acoustic properties and their influencing factors of marine sediment in the southern Huanghai Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(6): 74-83.]
- [28] 郑红波, 阎贫, 王彦林, 等. 基于希尔伯特变换的Chirp信号浅地层剖面数据分析及转换[J]. 海洋技术, 2012, 31(1): 91-95. [ZHENG Hongbo, YAN Pin, WANG Yanlin, et al. Sub-bottom profile data analysis and transformation for the Chirp signal based on Hilbert transform [J]. *Ocean Technology*, 2012, 31(1): 91-95.]
- [29] Li C Z, Yang Y, Wang R, et al. Inversion of river-bottom sediment parameters using mechanically sampled specimens and subbottom profiling data [J]. *Applied Geophysics*, 2017, 14(2): 225-235.
- [30] 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.]
- [31] Hamilton E L. Reflection coefficients and bottom losses at normal incidence computed from Pacific sediment properties [J]. *Geophysics*, 1970, 35(6): 995-1004.
- [32] 卢博, 刘强. 海底沉积物声学响应中的颗粒与孔隙因素[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(3): 23-29. [LU Bo, LIU Qiang. Grain and pore factors in acoustic response of seafloor sediments [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(3): 23-29.]
- [33] 吴涛. 无黏性海底沉积物声传播规律研究[D]. 天津大学硕士学位论文, 2021. [WU Tao. Study on Sound Propagation law of cohesiveless seabed sediments[D]. Master Thesis of Tianjin University, 2021.]
- [34] Hamilton E L, Bachman R T. Sound velocity and related properties of marine sediments [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1982, 72(6): 1891-1904.
- [35] 潘国富, 叶银灿, 来向华, 等. 海底沉积物实验室剪切波速度及其与沉积物的物理性质之间的关系[J]. 海洋学报, 2006, 28(5): 64-68. [PAN Guofu, YE Yincan, LAI Xianghua, et al. Shear wave velocity of

- seabed sediment from laboratory measurements and its relationship with physical properties of sediment [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28 (5): 64-68.]
- [36] Kirca V S O. Sinking of irregular shape blocks into marine seabed under wave-induced liquefaction [J]. *Coastal Engineering*, 2013, 75: 40-51.
- [37] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. [Editorial Boards of Engineering Geological Manual. *Engineering Geology Manual*[M]. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2007.]
- [38] 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.]
- [39] Rayleigh J W S. *The Theory of Sound*[M]. New York: Dover Publications, 1945.
- [40] 黄必桂, 李家钢, 周庆杰, 等. 基于浅地层剖面的海底浅表层沉积物物理性质参数反演技术研究: 以渤海海底管线路由区为例[J]. *海洋学报*, 2022, 44 (9): 156-164. [HUANG Bigui, LI Jiagang, ZHOU Qingjie, et al. Research on inversion technology of physical properties parameters of seafloor sediments based on sub-bottom profile: Taking the Bohai Sea submarine pipeline route as an example [J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44 (9): 156-164.]