

doi:10.3799/dqkx.2016.034

东沙群岛西南泥火山区 Chirp 浅剖数据的海底物性反演

陈 森^{1,2}, 阎 贫¹, 王彦林¹

1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广东广州 510301

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: Chirp 浅剖图像可以显示东沙群岛西南海域存在泥火山. 通过基于 Chirp 浅剖记录数据的反演方法研究, 定量地分析泥火山区海底物性参数. 首先由 Chirp 浅剖记录的反射振幅计算了海底反射系数, 结果表明泥火山区的反射变化很大(0.1~0.8). 对于海底弱反射(<0.45)区域, 用 Schock-Stoll 模型以及物理参数间的经验公式反演海底浅表层物理性质参数(速度、密度、孔隙度等参数); 对于海底强反射(>0.45)区域, 用 Gardner 经验公式反演海底浅表层物理性质参数. 反演结果表明研究区海底物性变化大, 声速最高达 5 237 m/s, 密度最大为 2.673 g/cm³. 反演的物性参数与实验室测量值吻合度较高. Chirp 浅剖数据反演是一种有效可行的遥测海底声学参数方法.

关键词: Chirp 浅剖数据; 东沙群岛西南; 泥火山; 海底声学特性; 反演.

中图分类号: P736.12

文章编号: 1000-2383(2016)03-0425-08

收稿日期: 2015-11-17

Inversion of the Physical Properties of the Seabed Using Chirp Sub-Bottom Data in Mud Volcanoes Field of the Southwest of Dongsha Islands

Chen Sen^{1,2}, Yan Pin¹, Wang Yanlin¹

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Mud volcanoes are imaged from Chirp sub-bottom profiles across the southwest of Dongsha Islands. In order to quantify the physical properties of the seabed, this paper studies the inversion of the Chirp sub-bottom data. First, reflection coefficients of the seabed are calculated, the results show that the reflection magnitudes of the seabed vary from 0.1-0.8. The physical properties (velocity, density, porosity etc.) of the seabed are obtained by the Schock-Stoll Model and the empirical relationships among the physical properties for the part reflection coefficients smaller than 0.45, and the physical properties (velocity and density) of the seabed are obtained by Gardner empirical equation for the part reflection coefficients larger than 0.45. Results of the inversion show that the physical properties vary greatly with the maximum velocity of 5 237 m/s and density of 2.673 g/cm³. The Chirp data-based physical properties highly coincide with the laboratory measurements for sampled sediments, thus provides us a remote acoustic method for estimating the physical properties of the seabed.

Key words: Chirp sub-bottom data; Southwest of Dongsha Islands; mud volcanoes; acoustic property of the seabed; inversion.

研究区位于东沙群岛西南海区, 西邻白云凹陷, 东毗邻潮汕凹陷, 北接东沙隆起, 水深约 1 000 m. 东沙隆起及其附近区域经历了多次构造运动, 特别是

新构造运动活跃(Lüdmann *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2005), 发育了正断层、海底滑坡和泥底辟等构造(Wu *et al.*, 2005), 为天然气向海底渗漏提供了

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41376062, 91328205, 41249908).

作者简介: 陈森(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究海底浅层剖面数据方法. E-mail: cs.124578@163.com

引用格式: 陈森, 阎贫, 王彦林, 2016. 东沙群岛西南泥火山区 Chirp 浅剖数据的海底物性反演. 地球科学, 41(3): 425-432.

通道,有利于水合物的形成. 多道反射偏移地震及 Chirp 浅层剖面成像显示,在白云凹陷和潮汕凹陷过渡带处高出周边海底 50~100 m,有呈北北西向条带状分布的泥火山群,泥火山区还存在明显的海底硬化现象(阎贫等, 2014). 研究区泥火山区范围如图 1 示. 本文将用 Chirp 浅剖数据进行数值反演,定量分析研究区泥火山区海底的物理性质.

Chirp 浅剖仪是一个输出一致、宽频带数字调频浅剖仪,它可以获得高分辨率(分米级)、深穿透(<100 m)的海底回声数字记录数据. 由于 Chirp 浅剖系统的发射信号是由电脑产生的,所以输出信号能量比较稳定且一致. Chirp 信号有精确的波形,其频谱为 Gaussian 频谱,Chirp 脉冲的自相关是零相位 Klauder 子波(Schock *et al.*, 1989; Quinn *et al.*, 1998). 零相位子波有助于笔者分析地震分辨率,地震界面基本上位于地震道数据的主峰/谷位置,若使用非零相位子波则增加地震分辨率分析的复杂性(Kallweit and Wood, 1982).

在勘探精细构造及定量分析海底物理性质方面,Chirp 浅剖方法与传统的多道地震方法相比有着不可替代的优势. 从横向分辨率来看,Chirp 浅剖数据道间距一般在 5 m 左右,浅剖仪接收的是近于垂直的反射数据,反映的是发射源正下方的位置状况;而传统的多道地震的道间距一般要比 Chirp 浅剖数据道间距大,且接收的数据不是来自发射源正下方的位置. 从垂向分辨率来看,3200XS Chirp 浅剖数据的分辨率是 8~20 cm,而传统多道地震一般是米级、十米级的分辨率.

国外已有学者将 Chirp 浅剖数据用于定量计算海底浅层沉积物物理性质参数,并获得成功应用: Bull *et al.* (1998)用 Chirp 浅剖数据通过计算海底反射系数,发现负的海底发射系数异常,识别了古沉船;Schock *et al.* (1989)提出将 Chirp 浅剖数据用于定量分析海底浅层未固结沉积物的物理性质;Schock(2004a)在 Biot-Stoll 模型(Stoll, 1977)基础上提出 Schock-Stoll 模型方法,并将 Schock-Stoll 模型方法应用在佛罗里达的 Fort Walton 海滩,又将该反演方法用于南海北部大陆架的海底沉积物的定量分析(Schock, 2004b),获得的速度、密度、孔隙度等参数值和实验室测量值吻合度较高.

目前,国内 Chirp 浅剖数据主要用于定性分析海底浅部结构,只有陈静等(2012)、Zheng *et al.* (2012)在定量计算海底沉积物物理性质方面做了初步的科研工作.

1 数据采集

中国科学院南海海洋研究所 2005 年、2008 年在东沙群岛西南海域用 EdgeTech 公司 3200XS 浅层剖面系统采集了 Chirp 浅剖数据,所用拖鱼探头型号为 512i,采集参数设定及剖面成像软件是 EdgeTech 公司的 X-STAR DISCOVER. 调查船走航速度为 5~6 节,拖鱼平均深度为 5 m. 测线 lcde002 的水深在 500 m 左右,测线 2008gh1_1 的水深在 1 000 m 左右(图 1),调查所采用的声源参数组合为: Chirp 信号频率 0.5~2.7 kHz;信号时长 100 ms.

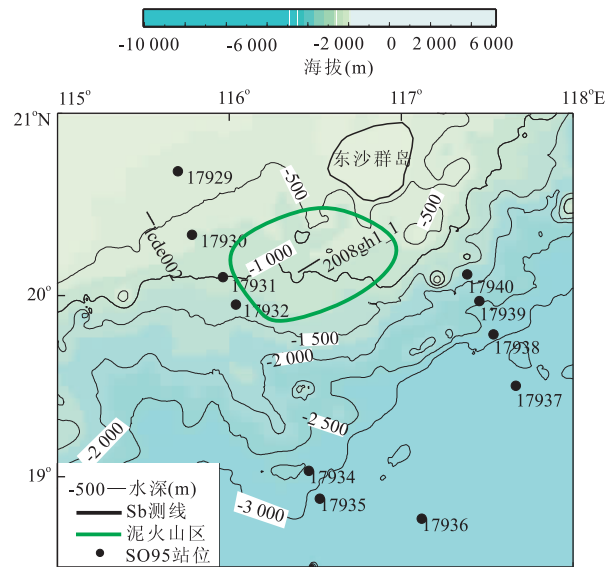


图 1 水深、测线及采样站位

Fig. 1 Bathymetry, survey lines and dredging sites

2 Chirp 浅剖数据处理

2.1 方法原理

图 2 为 Chirp 浅剖数据处理流程图,本文所有

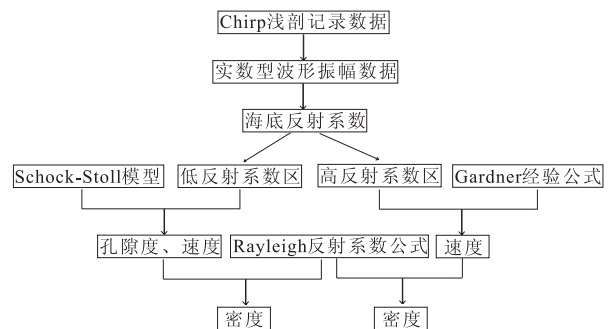


图 2 Chirp 浅剖数据处理流程

Fig. 2 Chirp sub-bottom data processing

的数据处理过程都是通过 Matlab 编程实现的。Chirp 浅剖仪记录的是 JSF 格式数据,通过编程读取 JSF 格式数据,得到实数型波形振幅数据,图 3 为 Chirp 浅剖数据单道实数型波形振幅数据图。基于实数型波形振幅数据,通过傅里叶变换,在频率域中利用海底一次波和海底二次波的振幅求得海底反射系数。在低反射区,用 Schock-Stoll 模型反演海底沉积物孔隙度、声速;在高反射区,用 Gardner 经验公式反演海底沉积物声速。最后,将声速值代入 Rayleigh 海底反射系数公式求得海底沉积物密度。

2.1.1 海底反射系数求法 海底反射系数由海底一次反射波和海底二次反射波求得,经过 Anstey (1977)、Warner (1990)、Spence *et al.* (1995)、Bull *et al.* (1998) 的发展,得到考虑球面扩散补偿校正的海底反射系数:

$$K_{R(SF)} = \frac{TWT_m A_m}{TWT_p A_p}, \quad (1)$$

式中: $K_{R(SF)}$ 为海底反射系数; TWT_p 为海底一次反射波双程旅行时; TWT_m 为海底二次反射波双程旅行时; A_p 为海底一次反射振幅强度; A_m 为海底二次反射振幅强度。

2.1.2 Schock-Stoll 模型 Biot (1956) 从理论上推导分析了声波在含孔隙流体弹性介质中传播的物理性质,并将理论拓展到各向异性具有粘弹性双相饱和多孔介质中 (Biot, 1962)。Stoll (1977) 在 Biot (1956, 1962) 理论的基础上建立了粘弹性模型,并总结了浅海至深海各种海洋沉积环境下模型达到最佳预测的单一数值形式的 Stoll 参数。Schock (2004a) 在 Biot-Stoll 模型的基础上将 Stoll 参数中的一些参数函数化,如渗透率看做孔隙度的函数,而不再是单一数值形式的参数,并且在研究区获得成功应用。陈静等 (2012) 分别用 Biot-Stoll 模型和 Schock-Stoll 模型计算了南海南部沉积物的声学特性参数,研究表明 Schock-Stoll 模型更接近实际观测值。Schock-Stoll 模型方法是一种定量分析海底未固结松散沉

积物的方法。

Stoll (1977) 和 Schock (2004a) 建立了海底反射系数与孔隙度一一对应的模型,可以由海底反射系数计算值得到沉积物孔隙度,再将孔隙度代入简谐平面波在孔隙介质中传播的方程 (Stoll, 1977; Schock, 2004a), 得到海底声速值。

海底反射几何模型由海水和沉积物两个半无限空间组成。 D_i 和 D_r 分别为水波的入射和反射复位移振幅; A_1 和 A_2 分别为由快波和慢波引起的骨架复位移振幅; B_1 和 B_2 分别为由快波和慢波引起的孔隙流体相对于骨架的相对复位移振幅。Stoll (1977) 给出了沉积物-水界面波动方程的解的边界条件,依据这些边界条件可以求得海底反射系数: (1) 垂直于界面方向上固体骨架内外流体是连续的; (2) 界面处总应力平衡; (3) 界面处流体压力平衡。将这些条件应用在运动方程可以得到以下方程 (Stoll, 1977):

$$\frac{D_r}{D_i} + (G_1 - 1) \frac{A_1}{D_i} + (G_2 - 1) \frac{A_2}{D_i} = -1, \quad (2)$$

$$\rho_w c_w \omega \frac{D_r}{D_i} + (HK_1 - Ck_1 G_1) \frac{A_1}{D_i} + (HK_2 - Ck_2 G_2) \frac{A_2}{D_i} = \rho_w c_w \omega, \quad (3)$$

$$-\rho_w c_w \omega \frac{D_r}{D_i} + (Mk_1 G_1 - Ck_1) \frac{A_1}{D_i} + (Mk_2 G_2 - Ck_2) \frac{A_2}{D_i} = \rho_w c_w \omega, \quad (4)$$

$$G_1 \equiv \frac{B_1}{A_1} = \frac{Hk_1^2 - \rho \omega^2}{Ck_1^2 - \rho_l \omega^2}, \quad (5)$$

$$G_2 \equiv \frac{B_2}{A_2} = \frac{\rho \omega^2 - Hk_2^2}{\rho_l \omega^2 - Ck_2^2}, \quad (6)$$

式中: H, C, M 为弹性参数; ω 是角频率; c_w 和 ρ_w 分别为海水的声速和密度; k_1 和 k_2 分别为快波和慢波的波数。

由公式 (2)~(6), 可以得到反射波和入射波的位移振幅比值 D_r/D_i , 也就是沉积物-海水界面的反射系数:

$$R = \frac{D_r}{D_i}. \quad (7)$$

Stoll 发展了如下简谐平面波在孔隙介质中传播的方程 (Stoll, 1977; Schock, 2004a):

$$\begin{vmatrix} Hk^2 - \rho \omega^2 & \rho_l \omega^2 - Ck^2 \\ Ck^2 - \rho_l \omega^2 & m \omega^2 - Mk^2 - j \omega F \eta / \kappa \end{vmatrix} = 0, \quad (8)$$

式中: k 为复波数, $k = \omega/v + ja$; v 是速度; α 是衰减; ρ_l 是孔隙流体密度; ρ 是双相介质总密度; η 是粘滞系数; κ 是渗透率。

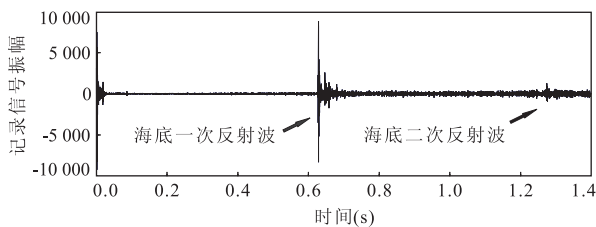


图 3 Chirp 浅剖数据单道实数型波形振幅数据

Fig. 3 Single trace waveform data of Chirp sub-bottom data

由公式(2)~(7),可以得到海底反射系数和沉积物孔隙度一一对应的关系,将得到的孔隙度代入(8)式,即可得到海底声速值。

2.1.3 Gardner 经验公式 Gardner 公式利用岩石纵波速度 V_p 计算岩石密度(完全水饱和体积密度),即:

$$\rho \approx 0.31V_p^{0.25}, \quad (9)$$

式中: V_p 为纵波速度,单位:m/s; ρ 为岩石密度,单位:g/cm³(陆基孟和王永刚,2009). Gardner 经验公式是建立在对大量数据分析的基础上得出的。

2.1.4 Rayleigh 海底反射系数公式 (Breslau, 1964)

$$K_{R(SF)} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}, \quad (10)$$

式中: $K_{R(SF)}$ 为海底反射系数; ρ_1 为海水密度; ρ_2 为海底沉积物密度; V_1 为海水中的声速; V_2 为海底沉积物声速,密度和速度的乘积为波阻抗。

综合应用上述方法,即可得到研究区的海底反射系数、孔隙度、声速—密度剖面。

2.2 数据处理过程及结果

2.2.1 海底反射系数 测线 2008gh1_1 浅剖数据用 X-STAR DISCOVER 软件生成浅层剖面图,如图 4a 示。

EdgeTech 公司 3200 XS 浅层剖面采集系统记录的数据是 JSF 格式的数据,未做球面扩散补偿。

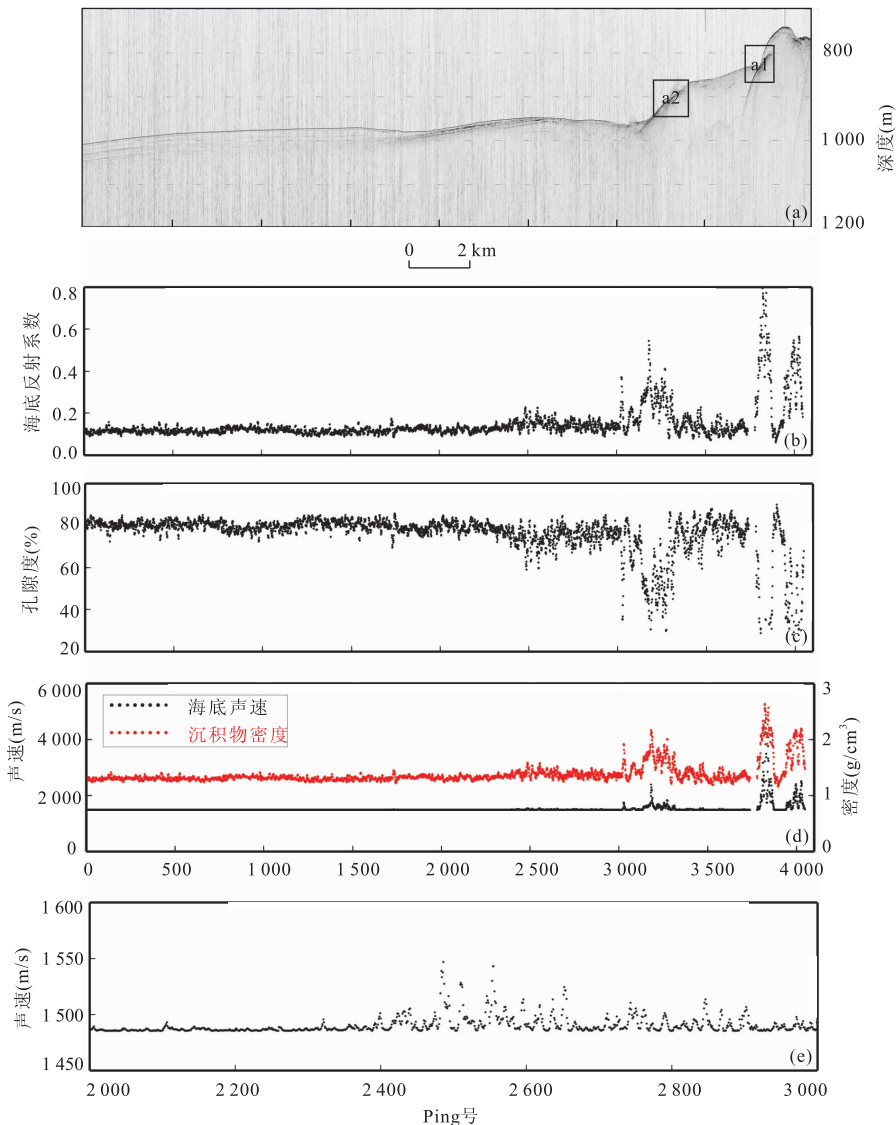


图 4 测线 2008gh1_1 浅层剖面图及海底物理性质参数剖面

Fig. 4 Profile of sub-bottom and physical properties of line 2008gh1_1

a. 浅层剖面; b. 反射系数剖面; c. 孔隙度剖面; d. 为声速—密度剖面; e. Ping 号 2 000~3 000 的声速—密度剖面

从图 4a 中,可以清楚地看到海底一次反射波,但是没有海底二次反射波.因此,笔者选择含有海底二次反射波的剖面计算海底反射系数,然后利用海底一次反射振幅除以海底反射系数求得发射源信号的振幅强度.由于 Chirp 浅剖仪的震源信号是由电脑控制产生的,在采集系统参数组合相同的条件下,Chirp 浅剖系统输出信号的振幅具有较好的一致性.根据得到的输出信号振幅强度和海底一次反射波振幅,可以求得海底反射系数.

图 5a 为 2005 年采集的测线 lcde002(采集系统参数组合与测线 2008gh1_1 的采集参数组合相同)中含有海底二次反射波的剖面段,利用其计算 Chirp 发射源信号振幅.读取浅剖 JSF 文件中的实数型数据,在频率域中根据公式(1)计算测线 lcde002 的海底反射系数.由于海底二次反射波的旅行时几乎是海底一次反射波的 2 倍,因此公式(1)可以化为:

$$K_{R(SF)} = \frac{2A_m}{A_p}, \quad (11)$$

由此计算得到的测线 lcde002 的海底反射系数剖面如图 5b 示.

得到了海底反射系数,现在可以利用海底一次反射振幅除以反射系数求得 Chirp 浅剖系统发射源信号振幅 A_0 ,求得 A_0 平均振幅大小为 1.12×10^5 .根据海底一次反射波的记录振幅 A_p ,就可以求出海底反射系数 $K_{R(SF)}$:

$$K_{R(SF)} = \frac{A_p}{A_0}. \quad (12)$$

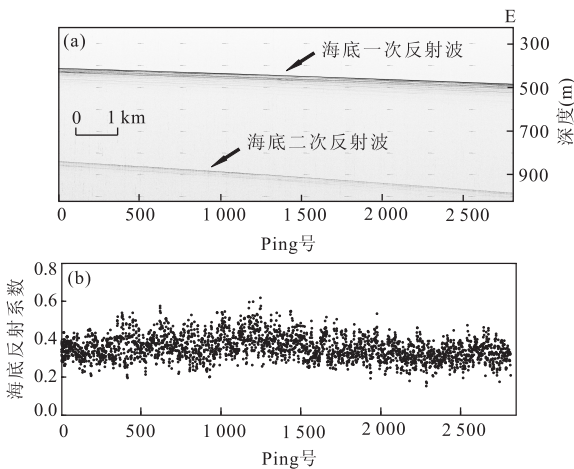


图 5 (a)含海底二次反射波的浅层剖面测线 lcde002;(b)测线 lcde002 海底反射系数剖面

Fig. 5 (a) Sub-bottom profile of Line lcde002 with the first seabed multiple wave; (b) Reflection coefficients profile of Line lcde002

由此,我们可以计算测线 2008gh1_1 的海底反射系数(如图 4b 示).图 4b 中,在 Ping 号 3 500~4 000 之间有一反射系数空白段,这是由于图 4a 中 a1 框内存在绕射波,对海底反射波干扰比较大,所以将之舍弃.

2.2.2 海底物性参数的反演 根据公式(2)~(7),可以得到海底反射系数与孔隙度的理论关系曲线(图 6).结合南海北部柱状和箱式采样获取的海底沉积物物性参数的实测值(表 1, 站位位置如图 1 示)对比,可以发现在反射系数小于 0.25 时,沉积物孔隙度与海底反射系数理论上的关系与实测值吻合度较高;反射系数大于 0.25 时,理论关系曲线稍低于实测值.图 6 中的柱状样海底沉积物是海底浅层 2 m 内的样品.箱式采样沉积物物性参数实测值与理论关系偏离比较远,原因是箱式采样器采的样品是海底表层沉积物,未经压实作用,故其孔隙度偏高(65%~85%).

Schock-Stoll 模型适用于海底未固结松散沉积物的物性参数反演.在海底天然水饱和沉积物中,孔隙度的范围通常在 35%~90%之间(Hamilton and Bachman, 1982; 卢博和刘强, 2008).理想砂若按简单的立方体堆积,其孔隙度可达最大值 47.6%;若致密排列,其孔隙度最小值为 26%(Lambe and Whiteman, 1969).从图 4b 测线 2008gh1_1 的反射系数剖面中,可以看出研究区海底反射系数变化范围非常大,反射系数最大值可达 0.8.从图 6 的理论曲线趋势来看,当反射系数为 0.8 时,孔隙度将远小于 20%,Schock-Stoll 模型不再适用.根据笔者采样样品沉积物特征,以及多道反射偏移地震剖面、Chirp 浅地层剖面特征(阎贫等,2014),研究区的海底沉积物特征与九龙甲烷礁海底特征比较类似,或

表 1 SO95 航次沉积采样声学实测数据*

Table 1 Measurements of the samples of the sites in SO95

站位	水深(m)	V_p (m/s)	密度(g/cm ³)	孔隙度(%)
17929	371	1 552	1.74	54.1
17930	629	1 633	1.56	64.7
17931	1 005	1 551	1.48	69.2
17932	1 365	1 447	1.33	70.8
17934	2 665	1 433	1.41	73.3
17935	3 143	1 631	1.40	73.5
17936	3 809	1 493	1.35	78.2
17937	3 428	1 535	1.40	73.2
17938	2 835	1 468	1.42	71.8
17939	2 473	1 506	1.37	74.1
17940	1 728	1 531	1.36	75.3

注: * 数据由中国科学院南海海洋研究所卢博提供.

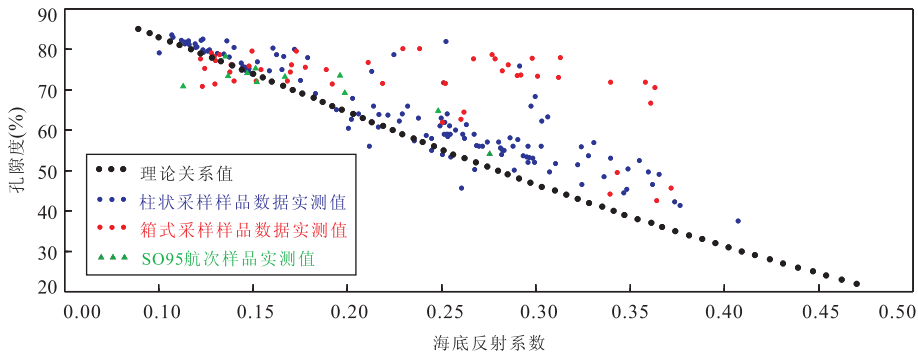


图 6 海底反射系数与孔隙度关系

Fig. 6 The relationship between the seabed reflection coefficients and the porosity

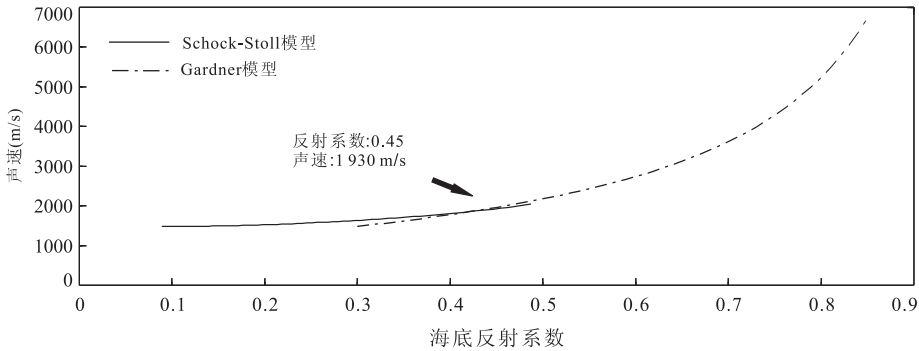


图 7 Schock-Stoll 模型和 Gardner 经验公式得到海底反射系数和声速的关系曲线

Fig. 7 Relationships between reflection coefficients and velocity by Schock-Stoll model and Gardner equation

存在碳酸盐岩结核及巨大的碳酸盐岩壳体. 对于这种硬底质、固结成岩的海底底质, 将不能用 Schock-Stoll 模型反演海底物性参数, 笔者将用 Gardner 经验公式(9)和 Rayleigh 海底反射系数公式(10)反演海底物性参数.

为界定海底松散沉积物和硬底质, 以及选用不同的海底物性参数反演方法, 笔者分别用 Schock-Stoll 模型和 Gardner 经验公式、Rayleigh 海底反射系数公式得到海底反射系数和声速的关系曲线, 如图 7 示.

Schock-Stoll 模型得到的反射系数与声速曲线是孔隙度在 20%~85% 范围内变化得到的关系曲线, 低反射系数部分, 由 Schock-Stoll 模型得到的声波速度大概在 1500 m/s 左右, 这符合一般的海洋沉积物声速值; Gardner 经验公式和 Rayleigh 反射系数公式得到的关系曲线, 反射系数在高于 0.85 时, 速度值增速变快, 但是在反射系数小于 0.85 的部分, 速度值还是在合理的范围内. 反射系数在 0.43~0.47 区间内, 两种模型计算的声速差在 30 m/s 内变化, 偏差较小, 因此落在该区间内的反射系数用两种模型皆可计算声速值. 因此, 本文采用反

射系数 0.45 (孔隙度 24.6%) 为区分反演海底沉积物的分界点.

对于反射系数小于 0.45 的区域, 采用 Schock-Stoll 模型反演. 由公式(12)算出海底反射系数, 得到海底反射系数剖面(图 4b); 由公式(2)~(7)确定海底反射系数与孔隙度的一一对应关系, 计算得到的反射系数可以求得对应的孔隙度, 得到孔隙度剖面(图 4c); 将孔隙度及 Schock 参数代入公式(8), 可以求得纵波速度; 再由 Rayleigh 海底反射系数公式(10), 可以计算海底沉积物密度; 这样便得到反射系数小于 0.45 的海底沉积物声速-密度剖面. 反射系数大于 0.45 的区域, 采用 Gardner 经验公式反演. 由公式(9)、(10)可得到反射系数和声速的关系函数, 可计算声速值; 再由 Rayleigh 海底反射系数公式(10)求得海底沉积物密度; 这样便得到反射系数大于 0.45 的海底沉积物声速-密度剖面. 海底声速-密度剖面如图 4d 示. 由于整条测线上海底声速变化范围大, 低反射系数的区域变化幅度小, 因此在图 4d 上看不出声速的变化. 为了能清楚地了解低反射系数区的声速变化, 图 4e 特地放大了 Ping 号在 2000~3000 点间的声速剖面.

3 讨论

在泥火山丘体外海底地形平坦的区域(图 4b),反射系数主要在 0.10~0.15 之间;在海底地形起伏强烈的区域反射系数变化较大,反射系数最大值可达 0.8. 研究区海底反射系数的巨大差异表明海底物性差异强烈. 在海底声速—密度剖面(图 4d)中也能更直观地体现:泥火山外的反射系数剖面中低反射系数区,海底声速范围在 1 486~1 550 m/s,主要分布在 1 500 m/s 左右;沉积物密度主要在 1.2~1.5 g/cm³,这与一般的海底沉积物声速和密度吻合. 在研究区取到的含水饱和黏土/粉砂未固结沉积物的湿密度小于 1.5 g/cm³,声波速度小于 1 500 m/s(Li *et al.*, 2013).

在泥火山丘体及附近反射系数剖面高反射区,海底声速最高达 5 237 m/s,密度最高达 2.673 g/cm³,远高于普通的海底沉积物声波速度和密度,5 237 m/s 的声波速度和 2.673 g/cm³ 的密度落在石灰岩、致密白云岩或盐岩的物理性质范围内(陆基孟和王永刚, 2009). 2005 年在研究区内用抓斗采获大块碳酸盐结核(Tian *et al.*, 2012),湿密度实测值为 2.748 g/cm³,在 40 kHz 主频下测定的声速为 5 813 m/s(阎贫, 2014).

以上反演结果不仅预测泥火山区海底存在明显的高速、高密度海底沉积物,也得到了采集样品的验证. 事实上,浅剖剖面上 a2 框内有渗漏气体羽,可能指示海底天然气正在泄露、逸散(阎贫等, 2014),结合笔者在其附近采集到的抓样沉积物特征(含碳酸盐岩颗粒和生物碎屑),可以推断泥火山区存在冷泉泄露. 冷泉是以水、碳氢化合物(天然气和石油)等为主要成分,受压力梯度影响从沉积体中运移和排放出(陈忠等, 2007). 冷泉主要以泥火山、麻坑等多种形式存在(Barnes *et al.*, 2010),冷泉系统中存在自生碳酸盐、海洋沉积物及其生物群落等(王淑红等, 2010). 而天然气水合物通常与深水泥火山相关(Milkov, 2000),研究区的海底高速、高密度沉积可能源于海底天然气泄露生物化学作用.

4 结论

研究区的海底物理性质在水平方向上差异性大,海底表层地质状况复杂. 从反演得到的海底物理性质参数剖面来看,研究区海底沉积物有声速为

1 500 m/s、密度在 1.5 g/cm³ 左右的和一般海底沉积物(黏土/粉砂等)声速、密度一样的物理特性;也有声速最大值 5 237 m/s、密度最大值为 2.673 g/cm³,与石灰岩、致密白云岩或盐岩的物理性质类似的沉积物. 反演结果被采集样品实验室测定所验证,表明 Chirp 浅剖数据海底物性参数综合反演方法是可靠的、有效的.

致谢:感谢国家基金委共享航次计划(航次编号: NORC-2013-08)的资助;感谢中国科学院南海海洋研究所卢博老师提供南海北部海底沉积物物性参数实测数据.

References

- Anstey, N. A., 1977. *Seismic Interpretation: The Physical Aspects*. Boston: Int. Human Rights Dev. Corp., Boston.
- Barnes, P. M., Lamarche, G., Bialas, J., et al., 2010. Tectonic and Geological Framework for Gas Hydrates and Cold Seeps on the Hikurangi Subduction Margin, New Zealand. *Marine Geology*, 272(1-2): 26-48. doi: 10.1016/j.margeo.2009.03.012
- Biot, M. A., 1956. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. II. Higher High-Frequency Range. *The Journal of the Acoustic Society of America*, 28(2): 172-191. doi: 10.1121/1.1908241
- Biot, M. A., 1962. Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media. *J. Appl. Phys.*, 33(4): 1482-1498. doi: 10.1063/1.1728759
- Breslau, L. R., 1964. Sound Reflection from the Sea Floor and Its Geological Significance. Massachusetts Institute of Technology, Boston.
- Bull, J. M., Quinn, R., Dix, J. K., 1998. Reflection Coefficient Calculation from Marine High Resolution Seismic Reflection (Chirp) Data and Application to an Archaeological Case Study. *Marine Geophysical Researches*, 20(1): 1-11. doi: 10.1023/A:1004373106696
- Chen, J., Yan, P., Wang, Y. L., et al., 2012. Choice of Parameters for Biot-Stoll Model-based Inversion of Sound Velocity of Seafloor Sediments in the Southern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 31(1): 50-54 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z., Yang, H. P., Huang, Q. Y., et al., Characteristics of Cold Seeps and Structures of Chemoauto-Synthesis-Based Communities in Seep Sediments. *Journal of Tropical Oceanography*, 26(6): 73-82 (in Chinese with English abstract).
- Hamilton, E. L., Bachman R. T., 1982. Sound Velocity and Related Properties of Marine Sediments. *Journal of the*

- Acoustical Society of America*, 72(1): 1891—1904. doi:10.1121/1.388539
- Kallweit, R. S., Wood, L. C., 1982. The Limits of Resolution of Zero-Phase Wavelets. *Geophysics*, 47(7): 1035—1046. doi:10.1190/1.1441367
- Lambe, T. W., Whitman, R. V., 1969. *Soil Mechanics*. New York: Wiley, New York.
- Li, L., Lei, X., Zhang, X., et al., 2013. Gas Hydrate and Associated Free Gas in the Dongsha Area of Northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 39(1): 92—101. doi:10.1016/j.marpetgeo.2012.09.007
- Lu, B., Liu, Q., 2008. Grain and Pore Factors in Acoustic Response of Seafloor Sediments. *Journal of Tropical Oceanography*, 27(3): 23—29 (in Chinese with English abstract).
- Lu, J. M., Wang, Y. G., 2009. *The Principles of Seismic Prospecting*. China Petroleum Press, Beijing, 141 (in Chinese).
- Lüdmann, T., Wong, H. K., Wang, P. X., 2001. Plio-Quaternary Sedimentation Processes and Neotectonics of the Northern Continental Margin of the South China Sea. *Marine Geology*, 172(3—4): 331—358. doi:10.1016/S0025—3227(00)00129—8
- Milkov, A. V., 2000. Worldwide Distribution of Submarine Mud Volcanoes and Associated Gas Hydrates. *Marine Geology*, 167(1—2): 29—42. doi:10.1016/S0025—3227(00)00022—0
- Quinn, R., Bull, J. M., Dix, J. K., 1998. Optimal Processing of Marine High-Resolution Seismic Reflection (Chirp) Data. *Marine Geophysical Researches*, 20(1): 13—20. doi:10.1023/A:1004349805280
- Schock, S. G., 2004a. A Method for Estimating the Physical and Acoustic Properties of the Seabed Using Chirp Sonar Data. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(4): 1200—1217. doi:10.1109/JOE.2004.841421
- Schock, S. G., 2004b. Remote Sediment Estimates of Physical and Acoustic Properties in the South China Sea Using Chirp Sonar Data and the Biot Model. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(4): 1218—1230. doi:10.1109/JOE.2004.842253
- Schock, S. G., Lester, R. L., LeBlanc, Larry, A. M. Ayer, 1989. Chirp Subbottom Profiler for Quantitative Sediment Analysis. *Geophysics*, 54(4): 445—450. doi:10.1190/1.1442670
- Spence, G. D., Minshull, T. A., Fink, C., 1995. Seismic Studies of Methane Gas Hydrate, Offshore Vancouver Island. In: Carson, B., Westbrook, G. K., Musgrave, R. J., eds., *Proc. ODP., Sci. Results 146 (Pt 1)*, College Station, Tx (Ocean Drilling Program), 163—174.
- Stoll, R., 1977. Acoustic Waves in Ocean Sediments. *Geophysics*, 42(4): 715—725. doi:10.1190/1.1440741
- Tian, X., Xu, Y., Zhang, J., et al., 2012. *Streptomyces Oceani* Sp. Nov., a New Obligate Marine Actinomycete Isolated from a Deep-Sea Sample of Seep Authigenic Carbonate Nodule in South China Sea. *Antonie van Leeuwenhoek*, 102(2): 335—343.
- Wang, S. H., Yan, W., Chen, Z., 2010. Advance in Research of the Calcium Isotope Tracer in Cold Seep System of Sea Floor. *Geoscience*, 24(3): 589—597 (in Chinese with English abstract).
- Warner, M., 1990. Absolute Reflection Coefficients from Deep Seismic Reflections. *Tectonophysics*, 173(1—4): 15—2. doi:10.1016/0040—1951(90)90199—1
- Wu, S., Zhang, G., Huang, Y., 2005. Gas Hydrate Occurrence on the Continental Slope of the Northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 22(3): 403—412. doi:10.1016/j.marpetgeo.2004.11.006
- Yan, P., Wang, Y. L., Zheng, H. B., et al., 2014. Geophysical Features of Mud Volcanoes in the Waters Southwest of the Dongsha Islands. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(7): 142—148 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, H. B., Yan, P., Chen, J., et al., 2012. Seabed Sediment Classification in the Northern South China Sea Using Inversion Method. *Applied Ocean Research*, 39: 131—136. doi:10.1016/j.apor.2012.11.002

附中文参考文献

- 陈静, 阎贫, 王彦林, 等, 2012. 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. *热带海洋学报*, 31(1): 50—54.
- 陈忠, 杨华平, 黄奇瑜, 等, 2007. 海底甲烷冷泉特征与冷泉生态系统的群落结构. *热带海洋学报*, 26(6): 73—82.
- 卢博, 刘强, 2008. 海底沉积物声学响应中的颗粒与孔隙因素. *热带海洋学报*, 27(3): 23—29.
- 陆基孟, 王永刚, 2009. *地震勘探原理(第三版)*. 北京: 中国石油出版社, 141.
- 王淑红, 颜文, 陈忠, 2010. 海底冷泉系统中的钙同位素示踪研究进展. *现代地质*, 24(3): 589—597.
- 阎贫, 王彦林, 郑洪波, 等, 2014. 东沙群岛西南海区泥火山的地球物理特征. *海洋学报*, 36(7): 142—148.