

doi:10.3799/dqkx.2016.097

利用 Gassmann 方程预测海底沉积物孔隙度

侯正瑜^{1,2,3}, 郭常升^{1,2*}, 王景强⁴, 付永涛^{1,2}, 李铁刚^{1,2}

1. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071
2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071
3. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049
4. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东青岛 266071

摘要: 孔隙度对于石油勘探和海底测量等领域是一个重要的参数,但是海洋沉积物孔隙度的预测一直是个难点.对 Gassmann 方程进行变换,利用孔隙度和纵波声速的相关关系求解出孔隙度预测公式,并将该公式应用于南海南部海底沉积物孔隙度预测中.沉积物声速是根据南海采集的柱状样品在甲板上测量的,孔隙度是在实验室测量的.将 Gassmann 方程预测结果与沉积物柱状样品实验室测量结果进行对比研究.结果表明 Gassmann 方程能够较好的预测海底沉积物的孔隙度,对浅海地区的孔隙度预测尤为准确.利用误差范数分析法对 Gassmann 方程各输入参数进行敏感性分析,发现沉积物纵波声速对孔隙度预测精度影响最大.

关键词: 孔隙度; Gassmann 方程; 海底沉积物; 纵波声速; 石油地质; 海洋地质.

中图分类号: P67

文章编号: 1000-2383(2016)07-1198-08

收稿日期: 2015-09-25

Using Gassmann Equation Predict Marine Sediment Porosity

Hou Zhengyu^{1,2,3}, Guo Changsheng^{1,2*}, Wang Jingqiang⁴, Fu Yongtao^{1,2}, Li Tiegang^{1,2}

1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
3. College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266071, China

Abstract: Porosity is one of the most important parameters for oil exploration and ocean topographic survey. The prediction of porosity in marine sediments has always been a difficulty. In this paper, the Gassmann equation was rearranged and utilized to estimate porosity based on the relationship between porosity and compressional wave velocity. The compressional wave velocity was measured on the deck based on the core samples collected in the southern South China Sea, and the porosity was measured in the laboratory. Porosity calculated using Gassmann equation was compared with that measured in laboratory. The results show that Gassmann equation can better predict the seafloor sediment porosity, and that is particularly accurate at shallow water areas. The sensitivity of Gassmann equation was studied by error norm method, and the results show that compressional wave velocity is the most influential parameter for porosity prediction.

Key words: porosity; Gassmann equation; seafloor sediment; compressional wave velocity; petroleum geology; marine geology.

0 引言

海底表层沉积物位于海底海水与沉积地层交界

处,主要由粘土、粉砂、砂和孔隙流体组成,它直接与海水相连,处于生物的、化学的和物理的不断作用中,是海洋各种作用的直接反映,因此准确认识沉积

基金项目: 国家科技支撑计划项目(No.2014BAB14B01); 海洋公益性科研项目(No.200905025).

作者简介: 侯正瑜(1988-), 男, 博士, 主要从事海洋地球物理和地质声学的研究. E-mail: hansonhzy@foxmail.com

* 通讯作者: 郭常升, E-mail: guochine@qdio.ac.cn

引用格式: 侯正瑜, 郭常升, 王景强, 等, 2016. 利用 Gassmann 方程预测海底沉积物孔隙度. 地球科学, 41(7): 1198-1205.

物的性质是十分必要的.在海底沉积物中,孔隙度是海底沉积物物理性质中一项非常重要的参数,孔隙度是影响沉积物声速的关键因素.针对声速与孔隙度的相关关系,一些学者做了大量的分析工作,他们普遍认为海底沉积物的声速与孔隙度的相关性最密切(Hamilton, 1971; Anderson, 1974; Liu *et al.*, 2013).孔隙度参数值是影响沉积物声学物理性质的重要参数,准确的孔隙度参数值不仅可以为沉积物物理声学经验公式提供验证基础,也可以为海洋地声模型的建立和地球物理声学多参数反演提供参考数据依据,因此准确地认识和测定沉积物孔隙度参数值是非常必要的(邹大鹏等, 2007).同时孔隙度在岩石物理和地震勘探领域都是一个非常重要的参数,是表征油气储层特性的重要参数.因此孔隙度的准确预测与反演对于海底沉积物的声学特性研究和海洋资源勘探开发具有重要的意义.

沉积物样品中所有孔隙空间体积之和与该样品体积的比值,称为该沉积物的总孔隙度,以百分数表示.对于孔隙度的获取,传统上是通过测量沉积物体积、质量、密度、含水量等物理量运用计算公式而得到,这种方法虽然能获得较高的准确度,但必须首先采集沉积物样品,故导致成本较高,不能大规模应用,对于海洋调查尤为困难.孔隙度在岩石物理和地震勘探领域都是一个重要的参数,对于孔隙度的求取,在地震勘探领域,通常是利用地震反演得到波阻抗、速度或者密度,然后利用确定性公式或者统计学公式计算孔隙度,反演法的基本原理是根据地层孔隙度与地震波传播速度之间的对应关系来求得孔隙度(丁风和等, 2015),这些对应关系主要包括:Gardner 公式(Gardner *et al.*, 1974)、Biot-Geertsma 方程(Geertsma and Smit, 1961)、Herts-Mindlin 理论(Mindlin, 1949)、Dvorkin-Nur 胶结模型等(Dvorkin and Nur, 1996).另外,很多学者对孔隙度预测方法进行了研究,Wyllie *et al.*(1956)提出了波速与孔隙度的平均时间方程,Pickett(1963)提出了纵波速度与孔隙度的经验公式,Castagna *et al.*(1985)根据 Wyllie 平均方程提出了一种利用横波速度求取孔隙度的公式,此外还有 Hamilton(1971)的经验公式,以及 Anderson(1974)孔隙度经验公式等.本文采用同轴差距法对南海南部海底沉积物柱状样品进行声速测量(侯正瑜等, 2013),并利用 Gassmann 方程(Berryman, 1999)对海底沉积物的孔隙度进行预测.孔隙度实验室测量值与预测值对比结果表明,Gassmann 方程能够较好的预测海底沉积物的孔隙度.

1 Gassmann 方程

海底沉积物具有一定的刚性,也就是说,它们可以支持静态的剪切应力,严格意义上说并不是纯粹的流体.沉积物的刚性源自于沉积物颗粒间的接触作用,如果作用在这些接触点的力被忽略,则会产生流体理论近似结果.为了表示这种近似的声学行为,Wood 给出了沉积物体积模量和声速计算方程,此方程被称为 Wood 方程(Wood, 1941).

Wood 方程对沉积物声速的测量误差往往比较大(Hamilton, 1971; Hamilton and Bachman, 1982),原因在于它忽略了海底沉积物中颗粒-孔隙水系统的动力学过程,它没有考虑沉积物颗粒间相互接触产生的力.Gassmann 对饱和沉积物 Wood 方程进行了推广,建立了 Gassmann 方程(Berryman, 1999).Gassmann 方程考虑了流体饱和多孔介质的固体颗粒骨架的弹性性质.Gassmann 方程给出了流体饱和多孔沉积物的体积模量:

$$K = K_g \frac{K_f + Q'}{K_g + Q'}, \quad (1)$$

$$Q' = K_w \frac{K_g - K_f}{\beta(K_g - K_w)}, \quad (2)$$

式中, K 为沉积物体积模量, β 为分数形式孔隙度(%), K_g 为单个沉积物颗粒的体积模量(Pa), K_w 为孔隙水的体积模量(Pa), K_f 为排水之后的沉积物框架体积模量(Pa), Q' 是品质因子.沉积物体积模量与拉梅系数的关系式为:

$$K = \lambda + \frac{2\mu}{3}, \quad (3)$$

$$\text{变形后可得: } \lambda + 2\mu = K + \frac{4\mu}{3}, \quad (4)$$

λ 为拉梅系数, μ 是沉积物剪切模量(Pa).由上述公式可以计算得到沉积物纵波 V_p (m/s) 和 V_s 横波声速(m/s):

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4\mu}{3}}{\rho}}, \quad (5)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (6)$$

式中 ρ 是沉积物密度(kg/m^3).利用公式(5)和公式(6)求解出 K 值(Pa),然后带入公式(1)可以得到:

$$K = \rho V_p^2 - \frac{4V_s^2}{3} = K_f + \frac{1 - \frac{K_f}{K_g}}{\frac{\beta}{K_w} - \frac{K_f}{K_g^2} + \frac{1 - \beta}{K_g}}. \quad (7)$$

由公式(7)可以得到沉积物孔隙度计算方程：

$$\beta = \frac{\frac{\frac{K_f}{K_g} - 1}{K_f - \rho V_p^2 - \frac{4V_s^2}{3}} - \frac{1}{K_g} + \frac{K_f}{K_g^2}}{\frac{1}{K_w} - \frac{1}{K_g}} = \frac{\frac{\frac{K_f}{K_g} - 1}{K_f - \rho V_p^2 - \frac{4\mu}{3\rho}} - \frac{1}{K_g} + \frac{K_f}{K_g^2}}{\frac{1}{K_w} - \frac{1}{K_g}} \quad (8)$$

在 Gassmann 方程中,当沉积物的孔隙流体和骨架间的相对运动可以忽略不计,特别是当沉积物渗透系数非常小的时候(如泥质沉积物和岩石等),

Gassmann 方程用来描述海底沉积物声传播是适当的(Stoll and Bautista,1998).

2 南沙群岛海底沉积物孔隙度预测

南海是西太平洋最大的边缘海,位于欧亚板块、印度板块与太平洋板块三大板块的交汇区域,构造发育样式独特(张浩等,2015).南沙群岛海区的海底地形,为自南向北逐渐下降的 3 级阶梯地形.第 1 级为大陆架,水深在 150 m 以内,与第 2 级地形大陆坡相连.大陆坡水深 150~3 800 m,其主体是介于上、下陆坡之间水深 1 500~2 000 m 的南沙台阶.南沙群岛的主体坐落在南沙台阶上,其上发育的星罗棋布的礁滩和纵横交错的槽谷构成了南沙群岛现今的形态.第 3 级为深海盆,是南海中央海盆的一部分,

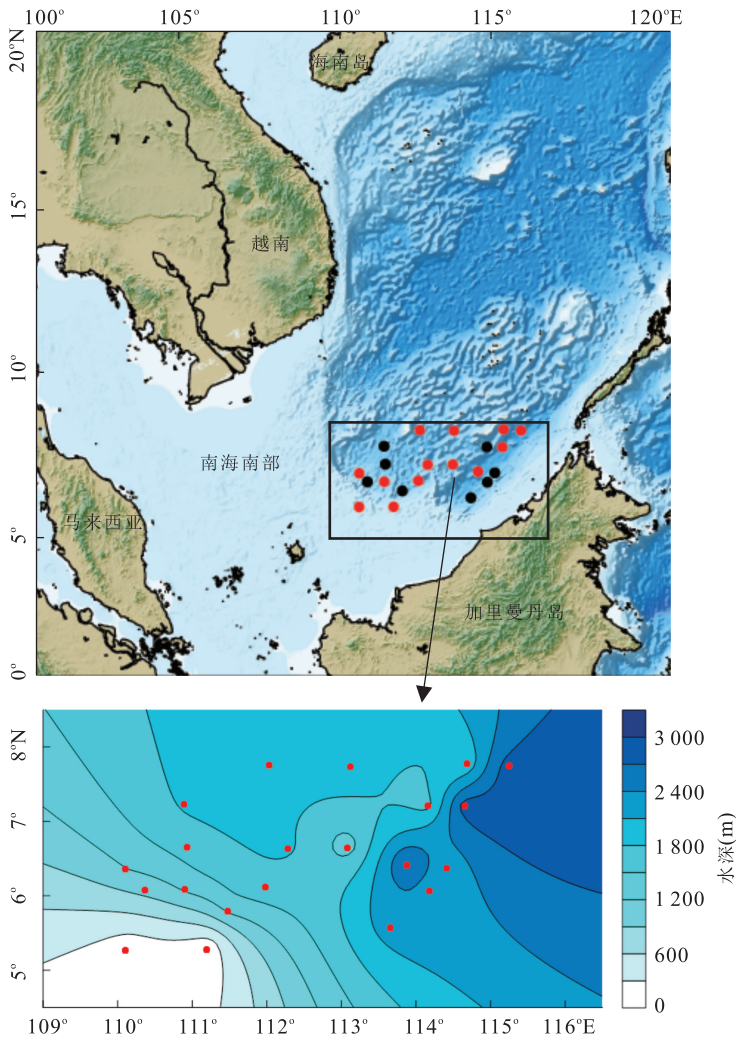


图 1 研究区域站位分布及水深

Fig.1 Map of bathymetry and the coring stations
红色圆点代表文中选取的 13 个站位

呈楔形嵌入南沙台阶的西北坡,水深超过 3 800 m. 本次采集的柱状样品主要位于南沙群岛海域,分布在 4°~8°N, 110°~116°E, 采集站位 21 个(图 1), 其中, 2 个站位位于大陆架(水深小于 150 m), 13 个站位位于大陆坡(水深为 1 053~2 028 m), 6 个站位位于南沙海槽(水深 2 207~2 843 m). 研究区沉积物类型主要由陆源碎屑沉积和生物源沉积, 以及少量自生沉积和火山碎屑沉积组成. 陆架区由于受到沉积搬运作用的影响, 相对于陆坡和海槽含有较多的粗颗粒, 这是长期沉积的产物. 上大陆坡及槽谷, 深海化学沉积作用较强, 沉积物一般较细, 以粉砂质粘土为主. 南海海槽离陆源较远, 水动力不足, 搬运到海槽的沉积物以细颗粒为主, 主要是粘土质沉积物. 本文采集的柱状样品主要是粉砂质粘土和粘土质粉砂, 渗透系数足够小, 因此可以利用 Gassmann 方程预测南海群岛海域海底沉积物孔隙度.

本文采用同轴差距法在甲板上对采集的海底沉积物柱状样品进行声速测量(侯正瑜等, 2013), 如图 2 所示, 将柱状样品分成 0、15、30、45、60、75、90 七段, 首先将接收换能器 R1 插入 92 cm 处, 将接收换能器 R2 紧贴在样品顶端(0 cm), 发射换能器 T 紧贴在样品底部(100 cm). 利用 WSD-3 数字声波仪对样品进行声速测量, 当顶端(0 cm)声速测量完成以后, 切除顶端的 15 cm 样品, 然后将接收换能器 R2 紧贴在样品 15 cm 处, 继续声速测量, 重复前面的步骤, 直至样品剩余至 90 cm 处. 完成一个柱状样品的测量后, 获得 0、15、30、45、60、75、90 cm 七段声波信号, 利用小波变换模极大值法读取每段信号的初至波时间为 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$, 在已知沉积物样品长度 L 的情况下, 利用下面的公式可以计算出沉积物声速:

$$V_p = \frac{L}{t_i - t_{i+1}}, i = 1, 2, \dots, 6, \quad (9)$$

L 为沉积物样品长度, t_i 为初至波时间. 声速测量完成后密封冷藏沉积物样品, 后期在实验室进行样品物理参数(密度、孔隙度、颗粒粒径等)测量工作, 其中孔隙度是根据容重和比重计算得到的, 具体方法为环刀法和比重瓶法.

2.1 Gassmann 参数选取

从上述公式可知, Gassmann 方程要求输入若干参数来预测孔隙度, 包括纵波声速、横波声速、体密度、沉积物颗粒的体积模量、孔隙水的体积模量、沉积物框架体积模量以及沉积物的剪切模量. 其中纵波声速采用同轴差距法在甲板上测量得到, 沉积物体密度在实验室测得, 横波速度可以根据公式(6)计算得到. 其他参数如颗粒体积模量 K_g , 孔隙水体积模量 K_w , 框架体积模量 K_f 是根据相关文献进行选取的(Santamarina *et al.*, 2001; Foti *et al.*, 2002; Biot, 1956a, 1956b; Yoon and Lee, 2010), 沉积物剪切模量 μ 来源于 Stoll and Bautista(1998)的研究, 同时我们选取的参数值也与专著 High-Frequency Seafloor Acoustics(Jackson *et al.*, 2007)中选取的参数值在数量级上是一致的(表 1).

2.2 孔隙度预测

为了验证 Gassmann 方程预测孔隙度的准确性, 利用 Gassmann 方程对研究区域 13 个站位进行了孔隙度预测, 其中浅水区(大陆架)站位 2 个, 深水区(大陆坡和海槽)站位 11 个.

我们将南海南部实际测量孔隙度与 Gassmann 方程预测孔隙度进行对比, 从图 3 中可以看出, Gassmann 方程预测的孔隙度与实际测量孔隙度具有大体相同的变化趋势. 同时将测量站位分为浅水区(大陆架)和深水区(大陆坡和海槽)两部分, 在垂向上分别进行对比研究(图 4). 从图 4 中可以发现浅水区海底沉积物的孔隙度较低, 在 50% 上下浮动. Gassmann 方程计算结果与测量结果基本符合, 略

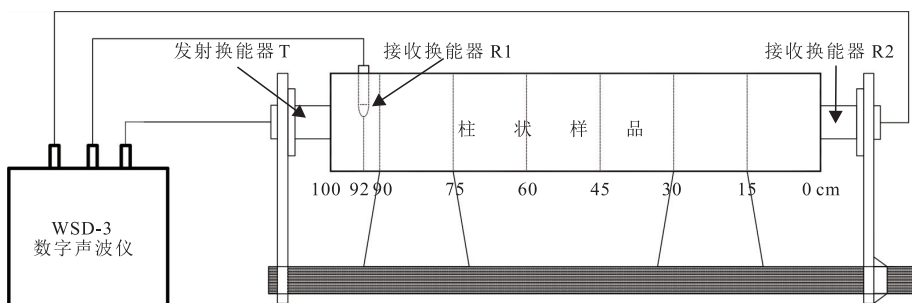


图 2 同轴差距测量法

Fig.2 Coaxial differential distance attenuation measurement

表 1 Gassmann 方程参数

Table 1 Gassmann equation parameters

方法	参数	数值
Gassmann 方程	纵波声速 V_p (m/s)	实测
	密度 ρ (kg/m ³)	实测
	颗粒体积模量 K_g (Pa)	1.50×10^{10}
	孔隙水体积模量 K_w (pa)	2.18×10^9
	框架体积模量 K_f (pa)	7.78×10^7
	沉积物剪切模量 μ (pa)	2.22×10^7

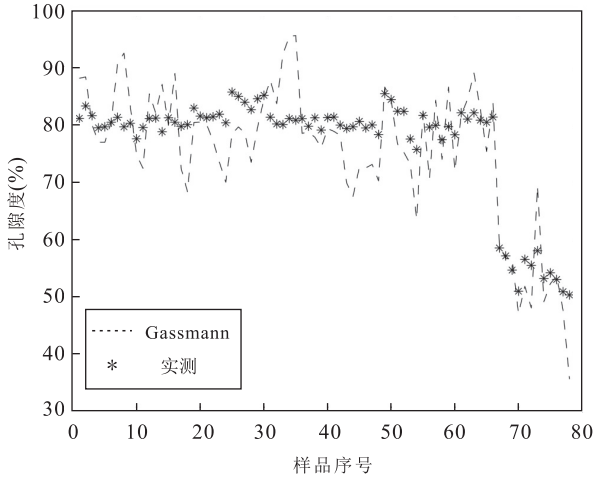


图 3 Gassmann 方程孔隙度预测曲线

Fig.3 Porosity prediction curve based on Gassmann equation

低于孔隙度测量值,这种现象可能是由低纵波声速引起的,其中,有两个计算值误差较大,这是由纵波测量误差引起的,因为这两个点的纵波声速偏离了沉积物平均声速值,导致了较大的孔隙度计算误差.深水区域海底沉积物孔隙度较高,在 80% 附近.Gassmann 方程计算结果在真实孔隙度附近上下波动,这些波动产生的原因有很多,例如纵波声速的测量误差、各个参数数值的选取等都会造成计算结果的波动.从整体上看,浅海区的预测值与实际值更为接近,只有两个点由于纵波声速测量误差而偏离了真实值.通过南海南部海底沉积物孔隙度实测值和预测值对比结果可以发现,Gassmann 方程能够较好的预测海底沉积物的孔隙度,尤其是浅海地区的沉积物孔隙度.这是因为沉积物的纵波声速会受到水深(压力)的影响,尤其是取样测量.王琪等(2008)对沉积物声速和水深的关系进行了研究,他们发现当水深小于 1 000 m 时,水深对沉积物声速的影响可以忽略不计,但是当水深超过 1 000 m 后,沉积物声速会随着水深的增加而增大.由于取样测量改变了沉积物的压力环境(水深),导致测量得到的声速偏

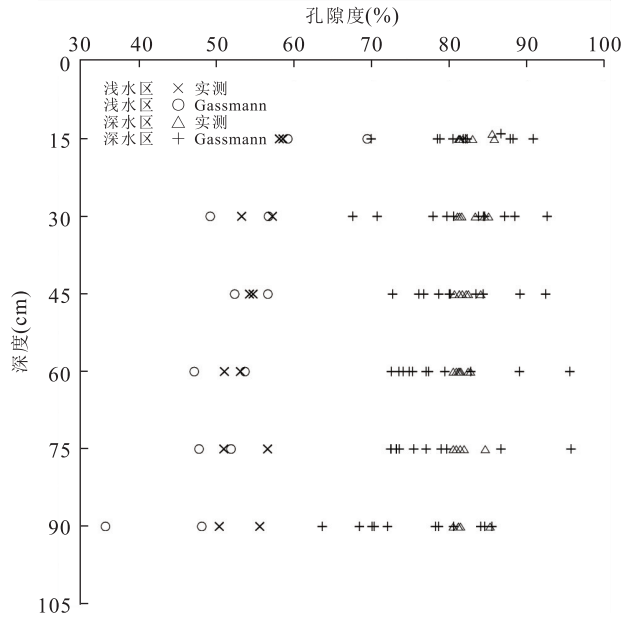


图 4 Gassmann 方程孔隙度在不同深度上与实测孔隙度对比结果

Fig.4 Comparisons between the measured porosities and porosities calculated by Gassmann equation in different depth

小,而浅水区域对沉积物声速影响较小,因此在本文中,Gassmann 方程对于浅水区域的沉积物孔隙度预测较为准确.深水区域由于水深变化较大,对沉积物声速的测量会产生误差,导致沉积物孔隙度的预测值与实际测量值有所偏差.

2.3 Gassmann 方程误差分析

一个量的观测值或计算值与其真实值之差称之为误差,根据造成误差的原因,主要将其分为系统误差和随机误差.系统误差是由于仪器结构上不够完善或仪器未经很好校准等原因而产生的误差.随机误差是由于参数选择引起的误差.为了比较 Gassmann 方程在计算过程中各个参数的灵敏度大小,引入误差范数(error norm)对各个参数进行误差分析.误差范数定义为:

$$EN_i = N_i^{\text{measured}} - N_i^{\text{predicted}}, \quad (10)$$

其中 EN_i 代表误差范数(error norm), N_i^{measured} 和 $N_i^{\text{predicted}}$ 分别代表测量和预测的数值大小.相对误差范数(proportional error norm)定义为:

$$EN_i = \frac{N_i^{\text{measured}} - N_i^{\text{predicted}}}{N_i^{\text{predicted}}}. \quad (11)$$

在本文中,误差分析方法是改变 Gassmann 方程中的一个参数,其他参数保持不变,代入 Gassmann 方程,将计算结果(N_i^{measured})与表 1 中各参数

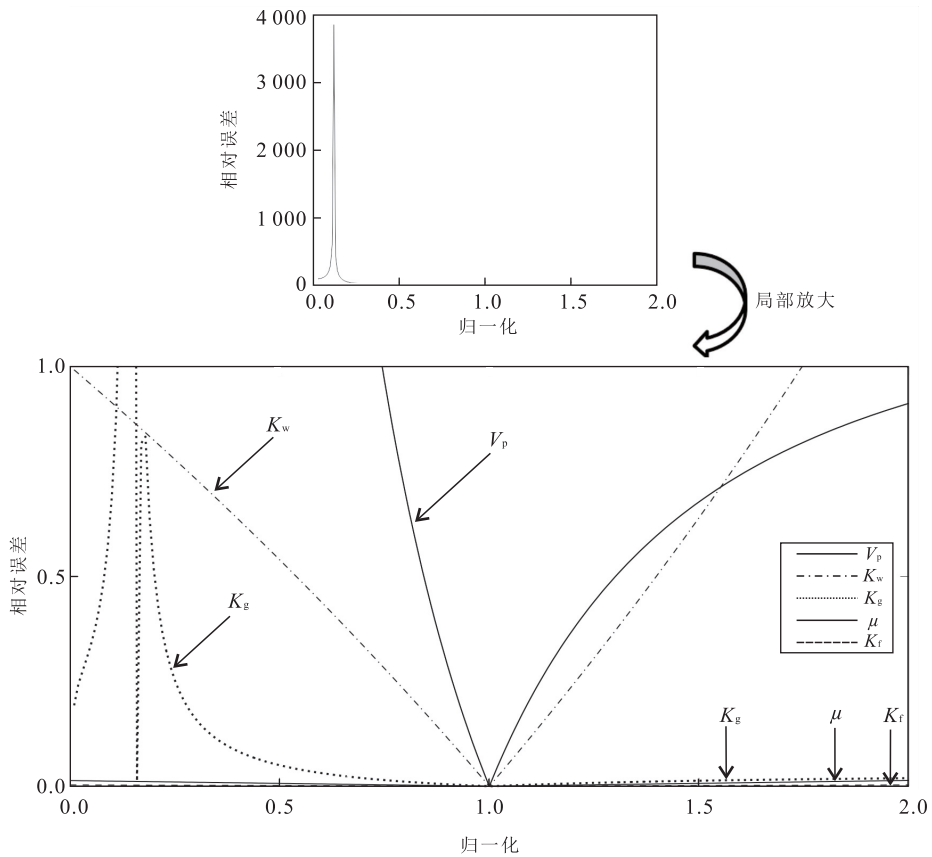


图 5 Gassmann 方程各参数误差分析

Fig.5 The error norm of each parameters based on Gassmann equation

计算所得的标准数值 ($N_i^{\text{predicted}}$) 相减得到误差范数, 然后计算相对误差范数 (简称为相对误差)。这种误差范数分析方法能够评估各输入参数的敏感性, 得到对公式影响最大的参数。海底沉积物的真实孔隙度是通过比重瓶法在实验室测量得到的, 沉积物的纵波声速是在甲板上用同轴差距法测量获得的。误差分析时, 分别将表 1 中各个参数 (包括沉积物纵波声速 V_p , 颗粒的体积模量 K_g , 孔隙水的体积模量 K_w , 沉积物框架体积模量 K_f 等) 从 100%~0%, 递减变化和 100%~200%, 递增变化, 然后将计算所得的孔隙度与表 1 的标准孔隙度进行归一化计算。因此我们可以得到归一化范围从 0 (100%~0%, 递减变化) 到 2 (100%~200%, 递增变化) 之间的误差分析, 其中当计算结果等于 1 时, 代表此时输入表 1 中的参数计算得到的标准值, 其误差为 0。

Gassmann 孔隙度预测方程是由沉积物纵波声速 V_p , 颗粒的体积模量 K_g , 孔隙水的体积模量 K_w , 沉积物框架体积模量 K_f 以及沉积物剪切模量 μ 组成的函数表达式, 对于 Gassmann 方程各个参数的误差分析如图 5 所示。

从图 5 中可知, 当 V_p 和 K_w 的归一化数值从 0 增加到 1 时, 孔隙度测量值的相对误差范数急剧下降, 其中, V_p 的相对误差最大值高达 3 844, 说明, 纵波速度 V_p 是 Gassmann 孔隙度预测方程最重要的影响因素。当 K_g 的归一化数值从 0 增加到 0.5 时, 其相对误差剧烈波动, 然后从 0.5 到 1 之间逐步下降至 0。沉积物框架体积模量 K_f 和沉积物剪切模量 μ (相当于横波声速) 对孔隙度的预测影响较小, 其相对误差接近于 0。从误差分析可知, 各参数对 Gassmann 孔隙度预测方程影响大小顺序为: $V_p > K_w > K_g > \mu > K_f$ 。其中, 纵波声速 V_p 在孔隙度预测中是最为敏感的参数, 这与图 4 是一致的, 图 4 中浅水区的两个 Gassmann 孔隙度预测值偏离真实值较大, 这是由纵波测量误差引起的, 因为这两个点的纵波声速偏离了沉积物平均声速值, 导致了较大的孔隙度计算误差, 也说明了纵波声速对于孔隙度预测影响较大。因此对于海底沉积物孔隙度的预测需要极为准确的测量沉积物纵波声速, 发展原位测量技术为相关研究提供准确的海底沉积物纵波声速是十分有必要的 (Liu *et al.*, 2013; Hou *et al.*, 2014)。

3 结论

综上所述,根据南海南部海底沉积物样品分析和对比结果发现 Gassmann 方程能够较好的预测沉积物的孔隙度,对于浅海区的海底沉积物尤为准确.误差范数分析法能够评估公式中各参数的敏感性,为公式的准确预测提供参考.同时,Gassmann 方程也可应用于大规模的海洋调查,可以通过地震资料反演得到的纵波速度、横波速度等信息,结合本文推导的 Gassmann 方法来估算海底沉积物孔隙度.本文采用的是取样测量方法,对于纵波声速的测量会产生些许误差,在以后的工作中应该发展原位测量技术,获取更为准确的纵波声速值,提高预测的精度.在参数的选择上,本文的参数值是根据公式计算以及前人研究成果进行选择,部分参数值存在误差,如需获得更为准确的孔隙度预测值,应该对 Gassmann 方程各个输入参数值进行相关测量.

致谢:两位审稿人和编辑对本文提出了许多建设性意见,在此致以衷心的感谢.

References

- Anderson, R. S., 1974. Statistical Correlation of Physical Properties and Sound Velocity in Sediments. In: Hampton, L., Physics of Sound in Marine Sediments. Springer, New York, 481—518.
- Berryman, J. G., 1999. Origin of Gassmann's Equations. *Geophysics*, 64(5):1627—1629.
- Biot, M. A., 1956a. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid: I. Low-Frequency Range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2):168—178.
- Biot, M. A., 1956b. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid: II. Higher Frequency Range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2):179—191.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L., Eastwood, R. L., 1985. Relationships between Compressional-Wave and Shear-Wave Velocities in Clastic Silicate Rocks. *Geophysics*, 50(4): 571—581.
- Ding, F. H., Han, X. L., Ha, Y. Y., et al., 2015. Relationship of Porosity and Volume Compression Coefficient of Solid Skeleton and Water in Artesian Well Aquifer. *Earth Science*, 40(7): 1248—1253 (in Chinese with English abstract).
- Dvorkin, J., Nur, A., 1996. Elasticity of High-Porosity Sandstones: Theory for Two North Sea Data Sets. *Geophysics*, 61(5):1363—1370.
- Foti, S., Lai, C. G., Lancellotta, R., 2002. Porosity of Fluid-Saturated Porous Media from Measured Seismic Wave Velocities. *Geotechnique*, 52(5):359—373.
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., Gregory, A. R., 1974. Formation Velocity and Density—The Diagnostic Basics for Stratigraphic Traps. *Geophysics*, 39(6):770—780.
- Geertsma, J., Smit, D. C., 1961. Some Aspects of Elastic Wave Propagation in Fluid-Saturated Porous Solids. *Geophysics*, 26(2):169—181.
- Hamilton, E. L., 1971. Elastic Properties of Marine Sediments. *Journal of Geophysical Research*, 76(2):579—604.
- Hamilton, E. L., Bachman, R. T., 1982. Sound Velocity and Related Properties of Marine Sediments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(6):1891—1904.
- Hou, Z., Guo, C., Wang, J., et al., 2014. Tests of New In-Situ Seabed Acoustic Measurement System in Qingdao. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 32: 1172—1178.
- Hou, Z. Y., Guo, C. S., Wang, J. Q., 2013. Surface Sediments Acoustic Velocity and Porosity Correlation in Nansha Sea Area Abyssal Region. *Marine Sciences*, 37(7):77—82 (in Chinese with English abstract).
- Jackson, D., Richardson, M., 2007. High-Frequency Seafloor Acoustics. Springer, New York.
- Liu, B., Han, T., Kan, G., et al., 2013. Correlations between the In Situ Acoustic Properties and Geotechnical Parameters of Sediments in the Yellow Sea, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 77:83—90. doi:10.1016/j.jseas.2013.07.040
- Mindlin, R. D., 1949. Compliance of Elastic Bodies in Contact. *Journal of Applied Mechanics*, 16:259—268.
- Pickett, G. R., 1963. Acoustic Character Logs and Their Applications in Formation Evaluation. *Journal of Petroleum Technology*, 15(6):659—667.
- Santamarina, J. C., Klein, A., Fam, M. A., 2001. Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring. *Journal of Soils and Sediments*, 1(2):130—130.
- Stoll, R. D., Bautista, E. O., 1998. Using the Biot Theory to Establish a Baseline Geoacoustic Model for Seafloor Sediments. *Continental Shelf Research*, 18(14):1839—1857.
- Wang, Q., Liu, Y. C., Wu, Y. Z., et al., 2008. Relation between the Acoustic Characters of Sea Bottom Sediment and the Seawater Depth. *Applied Acoustics*, 27(3):217—

221(in Chinese with English abstract).

Wood, A. B., 1941. A Textbook of Sound; Being an Account of the Physics of Vibrations with Special Reference to Recent Theoretical and Technical Developments. Macmillan Publishers Limited, Washington.

Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., Gardner, L. W., 1956. Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media. *Geophysics*, 21(1): 41-70.

Yoon, H. K., Lee, J. S., 2010. Field Velocity Resistivity Probe for Estimating Stiffness and Void Ratio. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 30: 1540-1549.

Zhang, H., Shao, L., Zhang, G. C., et al., 2015. Distribution and Petroleum Geologic Significance of Eocene Marine Strata in the South China Sea. *Earth Science*, 40(4): 660-670(in Chinese with English abstract).

Zou, D. P., Wu, B. H., Lu, B., 2007. A Research on Error Analysis of Seabed Sediment Porosity by Calculation Method

and Sonic Speed Retrieval Method. *Journal of Tropical Oceanography*, 26(4): 32-36(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

丁风和, 韩晓雷, 哈媛媛, 等, 2015. 承压井含水层孔隙度与固体骨架和水的体积压缩系数之间的关系. *地球科学*, 40(7): 1248-1253.

侯正瑜, 郭常升, 王景强, 2013. 南沙海域深水区表层沉积物声速与孔隙度相关关系. *海洋科学*, 37(7): 77-82.

王琪, 刘雁春, 吴英姿, 等, 2008. 海底沉积物声特性与海水深度变化关系的研究. *应用声学*, 27(3): 217-221.

张浩, 邵磊, 张功成, 等, 2015. 南海始新世海相地层分布及油气地质意义. *地球科学*, 40(4): 660-670.

邹大鹏, 吴百海, 卢博, 2007. 海底沉积物孔隙度计算方法与声速反演的误差分析研究. *热带海洋学报*, 26(4): 32-36.

《地球科学》

2016 年 8 月 第 41 卷 第 8 期 要目预告

海拉尔盆地火山岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义	陈崇阳等
豫南新县岩体地球化学、年代学和 Hf 同位素特征及地质意义	刘清泉等
鄂尔多斯地区黄旗口组地球化学特征及其沉积环境与构造背景	宋立军等
温州珊溪水库诱发地震构造条件	马志江等
浙江龙游地区基性及镁质变质岩的地球化学特征及其构造环境	董学发等
0608 号台风“桑美”过境前后对长江口外海域环境的影响	陈斌等
2012—2013 年重庆雪玉洞洞穴系统碳循环特征	任坤等
深海热液金属硫化物矿电性结构	席振铎等