第 36 卷 第 7 期 海 洋 学 报 Vol. 36, No. 7
2014 年 7 月 ACTA OCEANOLOGICA SINICA July 2014
龙建军,李赶先,邹大鹏. 海底沉积物纵波波速与物理-力学性质的理论关系和比较[J]. 海洋学报,2014,36(7): 111－117,doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2014.07.012
Long Jianjun, Li Ganxian, Zou Dapeng. Theoretical relations of longitudinal wave velocity and physical-mechanical properties for seafloor sediments and comparison [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 2014, 36(7): 111 － 117, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2014.07.012

海底沉积物纵波波速与物理-力学性质的理论关系和比较

龙建军[1,2],李赶先[3*],邹大鹏[1]

(1. 广东工业大学 机电工程学院,广东 广州 510006;2. 中国科学院 三亚深海科学与工程研究所,海南 三亚 572000;
3. 中国科学院 南海海洋研究所 中国科学院边缘海地质重点实验室,广东 广州 510301)

摘要: 本文提出以密度变化比和等效弹性模量变化比为参数描述海底沉积物纵波波速,得到密度变化比是由孔隙率、海水密度和海底沉积物固相密度构成的复合参数,建立了以复合参数和等效弹性模量变化比为变量的泰勒多项式海底沉积物纵波波速公式。基于单因素分析法得出纵波波速可表示为参考声速与调制函数的乘积,沉积物的参考声速由海底底质物理性质确定,建立了复合参数－声速的近似理论模型。对该理论模型与现有的主要纵波波速经验公式的分析结果表明,孔隙率－纵波波速经验公式只是参考声速不同,但调制函数是互相等效的,验证了本文海底沉积物纵波波速理论关系的有效性。

关键词: 海底沉积物;纵波波速;物理性质;多项式模型
中图分类号: P736.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-4193(2014)07-0111-07

1 引言

为获得海底沉积物的声速特性,Biot[1－3]和Stoll[4－6]在理论上建立了饱和多孔介质的声速公式,但即使在实验室条件下,Biot 和 Stoll 的公式输入参数都很难获得,应用这一理论产生海底地声模型的实用性一直备受质疑[7]。采用海底沉积物物理性质与声速测量数据建立纵波波速－孔隙率等的经验公式仍然是一种预报海底沉积物纵波波速特性的有效方法。沉积物的主要物理性质有孔隙率、颗粒中值粒径和饱和度等,因此探讨哪些沉积物性质在声波传播中起主导作用,对建立海底沉积物纵波波速预报公式十分重要。

Hamilton 和 Bachman[8－9]及 Anderson[10]通过研究世界大洋海底沉积物颗粒度和孔隙率等对纵波波速的影响,认为孔隙率是影响沉积物声速的主要因素。汪德昭等[11]认为,海底沉积物不论是湿样品还是干样品,其颗粒大小都不会改变,因此,用颗粒大小来预报纵波波速更为可靠。

不同学者提出了单参数纵波波速经验公式,分别选取含水量[12－13]、孔隙率[8－10,13－16]、中值粒径[9,17]、孔隙比[18]、含砂量[17]为参数。还有多个学者提出了

收稿日期: 2013-08-31;**修订日期:** 2013-11-11。
基金项目: 国家自然科学基金(41176034,11174299);中国科学院三亚深海科学与工程研究所知识创新工程领域前沿项目(SIDSSE－201208);国家973 项目(6131870102);广东省自然科学基金(10151009001000052)。
作者简介: 龙建军(1960—),男,广西省玉林市人,博士,副教授,主要从事海洋沉积声学、声学测量技术研究。E-mail: longjj@gdut.edu.cn
* **通信作者:** 李赶先(1963—),男,山东省潍坊市人,副研究员,从事海底沉积物声学特性研究。E-mail: djtlgx@163.com

双参数纵波波速经验公式，参数为孔隙率和无侧限抗压强度[19]、密度和孔隙率[20]、孔隙率和含水量[21]。

目前已有的海底沉积物纵波波速经验公式，主要通过回归方法得出纵波波速与沉积物物理参数的经验关系。它们的变量所选用的物理参数有多个，对参数的选择缺少物理依据，海底沉积物的物理性质与纵波波速的经验公式缺少物理解释。

本文根据平面波理论，以密度变化比和等效弹性模量变化比为变量，用泰勒公式建立了海底沉积物纵波波速与物理参数关系的多项式。希望通过将现有的孔隙率-纵波波速经验公式与密度变化比－纵波波速近似关系进行比较，对不同形式的孔隙率-纵波波速经验公式给出统一的物理解释，以期验证海底沉积物密度变化比－纵波波速理论关系的有效性，为本文的密度变化比－纵波波速关系应用于实践提供理论依据和实验数据支持。

2 海底沉积物纵波波速与模量变化比和密度变化比的关系

在声波幅度较小时[6]，线性理论给出平面波纵波波速公式为：

$$V=(M/\rho)^{1/2}, \tag{1}$$

式中，M 为等效弹性模量。$M=K+\frac{4}{3}\mu$，K、μ 和 ρ 分别为介质的体积模量、切变模量和密度。

考虑海底沉积物的一种极限情况，即干的无孔隙（全部是固相）的情况，这种海底沉积物的波速为：

$$V_s=(M_s/\rho_s)^{1/2}, \tag{2}$$

式中，M_s 为等效弹性模量。$M_s=K_s+\frac{4}{3}\mu_s$，K_s、μ_s 和 ρ_s 分别为干的无孔隙海底沉积物的体积模量、切变模量和密度。

无孔隙的海底沉积物转变为有孔隙（孔隙率为 n）且饱含水（以下称为饱和）后，其等效弹性模量和密度都发生变化，平面波纵波波速改为：

$$V_n=(M_n/\rho_n)^{1/2}, \tag{3}$$

式中，M_n 为等效弹性模量。$M_n=K_n+\frac{4}{3}\mu_n$，K_n、μ_n 和 ρ_n 分别为是孔隙率为 n（$0<n<1$）的饱和海底沉积物的体积模量、切变模量和密度（即湿密度）。

M_n 和 ρ_n 分别表示为：

$$M_n=M_s-\Delta M,\rho_n=\rho_s-\Delta\rho, \tag{4}$$

式中，ΔM 和 $\Delta\rho$ 是与干的无孔隙海底沉积物相比较有孔隙饱和海底沉积物等效弹性模量的变化量和密度的变化量。

把式(4)代入式(3)可得：

$$V_n=V_s\cdot(1-\Delta M/M_s)^{1/2}\cdot(1-\Delta\rho/\rho_s)^{-1/2}, \tag{5}$$

式中，$\Delta M/M_s$ 和 $\Delta\rho/\rho_s$ 分别称为等效弹性模量变化比（简称为模量变化比）和密度变化比。

孔隙率是指沉积物中孔隙体积与沉积物的总体积之比，即沉积物中孔隙的体积分数。假设海底沉积物的质量分布是统计均匀的，则饱和沉积物的湿密度为 $\rho_n=n\rho_w+(1-n)\rho_s$，所以

$$\Delta\rho/\rho_s=(\rho_s-\rho_n)/\rho_s=n(1-\rho_w/\rho_s). \tag{6}$$

把式(6)代入式(5)可得：

$$V_n=V_s(1-\Delta M/M_s)^{1/2}[1-n(1-\rho_w/\rho_s)]^{-1/2}. \tag{7}$$

饱和沉积物的等效弹性模量与固相和液相的弹性模量和体积分数密切相关[22]，其等效弹性模量小于干的无孔隙海底沉积物的等效弹性模量，根据海底沉积物的这一物理特性，有 $0<\Delta M/M_s<1$。此外，由于海底沉积物的固相颗粒密度大于海水密度，也有 $0<\rho_w/\rho_s<1$。因此可用泰勒公式[23]把式(7)展开为多项式：

$$V_n=V_s[1-a_1x_1-a_2x_1^2-\cdots-a_px_1^p+r_{1p}(\xi_1)]\times[1+b_1x_2+b_2x_2^2+\cdots+b_qx_2^q+r_{2q}(\xi_2)], \tag{8}$$

式中，$x_1=\Delta M/M_s$，$x_2=n(1-\rho_w/\rho_s)$，a_1、$a_2\cdots a_p$ 和 b_1、$b_2\cdots b_q$ 为多项式的系数，$r_{1p}(\xi_1)$ 和 $r_{2q}(\xi_2)$ 为余项，p 和 q 为多项式的次数，ξ_1 取 x_1 与 0 之间的某个值，ξ_2 取 x_2 与 0 之间的某个值。两个多项式中前 3 个系数的值为：$a_1=0.5$，$a_2=0.125$ 和 $a_3=0.062\,5$，以及 $b_1=0.5$，$b_2=0.375$ 和 $b_3=0.312\,5$。

式(8)是纵波波速与沉积物物理参数关系的多项式模型。

3 以密度变化比为变量的海底沉积物纵波波速近似理论关系

基于单因素分析原理，固定海底沉积物的模量变化比 $\Delta M/M_s$，即仅考虑孔隙率引起的密度变化对纵波波速的影响。选择孔隙率较小的沉积物作为参考样本，式(3)可以表示为：

$$\begin{aligned}V_n&=[M_n/(\rho_s-\Delta\rho)]^{1/2}\\&=(M_n/\rho_s)^{1/2}\cdot(1-\Delta\rho/\rho_s)^{-1/2}\\&=V_r\cdot(1-\Delta\rho/\rho_s)^{-1/2},\end{aligned} \tag{9}$$

式中，M_n 为参考沉积物的等效弹性模量，V_r 为海底沉积物参考声速，$V_r=V_s(M_n/M_s)^{1/2}$。

把式(6)代入式(9)可得：

$$V_n = V_r \cdot [1-n(1-\rho_w/\rho_s)]^{-1/2}. \quad (10)$$

从式(10)可知,纵波波速可以表示为参考声速 V_r 乘以一个调制函数 $f(n)=[1-n(1-\rho_w/\rho_s)]^{-1/2}$。

式(10)也用泰勒多项式表示为:

$$V_n = V_r[1+b_1x_2+b_2x_2^2+\cdots+b_qx_2^q+r_{2q}(\xi_2)], \quad (11)$$

式中符号与式(8)相同,调制函数 $f(n)=1+b_1x_2+b_2x_2^2+\cdots+b_qx_2^q+r_{2q}(\xi_2)$。

在以下分析中,海底沉积物的物理特性[6,24—27]取表 1 数据。

表 1　海底沉积物的物理特性

Tab. 1　Physical property of seafloor sediments

参数名称	数值
固体矿物颗粒(砂)的体积模量/Pa	3.7×10^{10}
固体矿物颗粒(砂)的剪切模量/Pa	4.5×10^{10}
孔隙水的体积模量/Pa	$2.374\ 0\times10^9$
沉积物固相比重(大陆台阶)/g·cm^{-3}	2.67
孔隙水密度/g·cm^{-3}	1.024
孔隙率范围	0.35～0.85
参考沉积物(细砂)(湿)密度/g·cm^{-3}	1.93
参考沉积物(细砂)孔隙率	0.462
参考沉积物(细砂)纵波波速/m·s^{-1}	1 682.5
参考沉积物(细砂)体积模量/Pa	$5.463\ 5\times10^9$

在 $q=2$,$\xi_2=0.85\cdot(1-1.024/2.67)=0.524\ 01$时,泰勒多项式(11)的余项 $r_{22}(\xi_2)=-0.024\ 02$。所以式(11)可近似为:

$$V_n \approx V_r \cdot (1+b_1x_2+b_2x_2^2), \quad (12)$$

即:

$$V_n \approx V_r \cdot [1+b_1n\cdot(1-\rho_w/\rho_s)+b_2n^2\cdot(1-\rho_w/\rho_s)^2]. \quad (13)$$

其中多项式的绝对误差约为 3%。

在 $q=3$,$\xi_2=0.524\ 01$ 时,泰勒多项式(11)的余项 $r_{23}(\xi_2)=0.007\ 252\ 4$。所以式(11)可以近似为:

$$V_n = V_r(1+b_1x_2+b_2x_2^2+b_3x_2^3), \quad (14)$$

即:

$$V_n \approx V_r \cdot [1+b_1n\cdot(1-\rho_w/\rho_s)+b_2n^2\times(1-\rho_w/\rho_s)^2+b_3n^3\cdot(1-\rho_w/\rho_s)^3]. \quad (15)$$

其中多项式的绝对误差约为 7‰。

式(10)～(15)是研究海底沉积物的密度变化比对纵波波速影响的理论关系,其中式(12)和式(14)与目前已经公开发表的纵波波速经验公式的形式是相同的。

对式(10)～(15)的初步分析如下:(1)复合参数 $n(1-\rho_w/\rho_s)$ 表示海底沉积物密度变化比对纵波波速的影响,表明海底沉积物纵波波速与孔隙率 n 有密切的关系,前人的实验研究已验证了这一点;(2)$V_r=V_s(M_n/M_s)^{1/2}$ 说明海底沉积物参考声速由底质性质确定,所以海底沉积物纵波波速预报需要获得底质物理性质;(3)目前以孔隙率为参数的纵波波速经验公式与式(12)和(14)形式是相同的,都是单参数的一元二次或三次多项式方程,表明这些纵波波速经验公式的参数仅反映了密度变化比对纵波波速的影响,还缺少反映模量变化比对纵波波速影响的参数;(4)可以解释现有的纵波波速回归模型都以二次多项式为主,因为二次多项式模型精度已达 3%。目前实验测量的纵波波速测量精度还不够高,若采用高于二次多项式的模型进行回归处理,得到的结果难以提高纵波波速经验公式的预报精度。

4　比较分析

4.1　由密度变化比导出的孔隙率-纵波波速理论公式

为了对沉积物纵波波速理论式(13)和式(15)与已发表的孔隙率—纵波波速经验公式进行比较分析,作者以细砂海底沉积物为例分析它们间的差异和关系。把表 1 数据代入式(13)和式(15)可以得到细砂沉积物的孔隙率—纵波波速理论公式。

调制函数采用二次多项式时为:

$$V_n \approx V_r \cdot f_1(n), \quad (16)$$

式中,$V_r=1\ 430.5$ m/s,调制函数 $f_1(n)=1+0.308\ 24n+0.142\ 576n^2$。

调制函数采用三次多项式时为:

$$V_n \approx V_r \cdot f_2(n), \quad (17)$$

式中,$V_r=1\ 430.5$ m/s,调制函数 $f_2(n)=1+0.308\ 24n+0.142\ 517\ 6n^2+0.073\ 216n^3$。

本文把调制函数常数项等于 1 的声速式(16)或式(17)称为孔隙率-声速公式的标准型。

4.2　孔隙率-纵波波速的理论和经验公式比较分析

4.2.1　主要的孔隙率-纵波波速经验公式

目前已公开发表的主要孔隙率-纵波波速经验公式如下:

Hamilton 和 Bachman[8]:$V_P=2\ 502.0-23.45\times10^2n+0.14\times10^4n^2$.(大陆架、大陆坡)　(18)

Hamilton[28]:$V_P=2\ 475.5-21.764\times10^2n+$

$0.123\times10^4n^2$．（大陆架、大陆坡） (19)

Hamilton[25]：$V_P = 2\ 455.9 - 21.716\times10^2n + 0.126\times10^4n^2$．（大陆架、大陆坡） (20)

Bachman[29]：$V_P = 2\ 540 - 24.53\times10^2n + 0.146\ 1\times10^4n^2$．（大陆架、大陆坡） (21)

Anderson[10]：$V_P = 2\ 506 - 27.58\times10^2n + 0.186\ 8\times10^4n^2$．（大陆架） (22)

Orsi 和 Dunn[14]：$V_P = 2\ 527 - 27.132\times10^2n + 0.178\ 2\times10^4n^2$．（大陆架、大陆坡） (23)

唐永禄[16]：$V_P = 942 + c_o - 25.02\times10^2n + 0.156\times10^4n^2$，（南海北部大陆架） (24)

式中，c_o 为海水纵波波速，取 c_o =1 529.8 m/s（相当于 Hamilton 的测量现场）。

卢博等[13]：$V_P = 2\ 369.07 - 25.53\times10^2n + 0.185\times10^4n^2$．（中国东南沿海近海） (25)

4.2.2 系数大小比较分析

为了与式(16)的系数比较，把式(18)～(25)变换为声速 V_r 乘以调制函数 $f_1(n)$ 的标准型，即 $V_P = V_r \cdot f_1(n)$，见表 2。

表 2 海底沉积物纵波波速经验公式的标准型

Tab. 2 Standard form of porosity-wave velocity empirical formula for seafloor sediments

公式编号	V_r / m·s^{-1}	调制函数 $f_1(n)$
18	2 502.0	$1-0.937\ 3n+0.559\ 6n^2$
19	2 475.50	$1-0.879\ 2n+0.496\ 9n^2$
20	2 455.90	$1-0.884\ 2n+0.513\ 1n^2$
21	2 540.0	$1-0.965\ 7n+0.574\ 8n^2$
22	2 506.0	$1-1.100\ 6n+0.745\ 4n^2$
23	2 572.0	$1-1.054\ 9n+0.692\ 1n^2$
24	2 471.80	$1-1.012\ 2n+0.631\ 1n^2$
25	2 369.07	$1-1.077\ 6n+0.780\ 9n^2$

表 2 中，孔隙率-纵波波速经验公式变换为标准型后，各式的参考声速 V_r 测量值不同，这与海底沉积物的物理性质存在区域性差异有关。各式的一次项系数和二次项系数相当接近。变换后的纵波波速经验公式一次项系数接近理公式(16)的一次项系数 0.308 24 的 3.1 倍；二次项系数约等于理论公式(16)的二次项系数 0.1425 76 的 4.2 倍。这是由于理论公式(16)没有考虑模量变化比对纵波波速的影响，而实测的纵波波速是受模量变化比影响的；其次实测的纵波波速经验公式没有考虑 $(1-\rho_w/\rho_s)$ 的影响。

式(18)～(25)表面看差异很大，但经过变换后相似程度很高。这表明：(1)孔隙率－纵波波速经验公式都受同一个声速理论模型式(16)的支配；(2)波速与物理性质参数孔隙率、海水密度、固相密度具有密切的关系；(3)目前已发表的孔隙率－纵波波速经验公式只是参考声速 V_r 测量值不同，调制函数基本相同，说明密度变化比对纵波波速影响的机理在不同的海区是相同的。

式(16)的参考声速理论值远小于表 2 经验公式的参考声速测量值，这是由于式(16)没有考虑模量变化比对纵波波速的影响导致。可以证明，同时考虑模量变化比和密度变化比对纵波波速的影响时，式(16)调制函数的常数项趋向 1.662 3 而不是 1，参考声速理论值可修正为 V_r =2 377.8 m/s，表明参考声速理论值较接近测量值但偏小，这与所选用参考沉积物物理性质和沉积物声学模型与实际沉积物的差异有关。

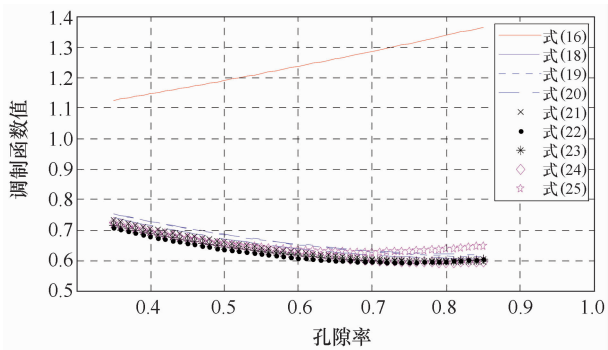


图 1 纵波波速公式调制函数与孔隙率的关系

Fig. 1 Modulated functions of porosity-wave velocity formulas

从图 1 可以看出，随着孔隙率增大，理论调制函数增大，坐标变换后的纵波波速经验公式调制函数减小。这是由于理论调制函数仅受密度变化比的影响，而纵波波速经验公式调制函数同时受密度变化比和模量变化比的影响。表明在实际沉积物中，模量变化比对纵波波速的影响远大于密度变化比。

根据式(5)，模量变化比与密度变化比是两个独立的变量。为了分离模量变化比产生的影响，通过线性坐标变换把经验公式的调制函数的一次项系数变换为与式(16)的调制函数的一次项系数相同就可以初步达到这一目的。因此，对式(18)～(25)用 $n_t = w_t \cdot n$（其中 w 是权重）进行变换，变换结果见表 3。

表 3 中，纵波波速经验公式(18)～(25)的权重描述模量变化比对声速的影响，修正孔隙率的作用。分

离了模量变化比产生的影响后,图 2 中不同海区的曲线都重叠在一起了,表明密度变化比对纵波波速影响在不同海区几乎是相同的;权重在 2.868 7 至3.496 1 间,表明模量变化比对纵波波速的影响在不同海区有较大差异。

表 3　海底沉积物纵波波速经验公式标准型的坐标变换

Tab. 3　Coordinate transformation of standard porosity-wave velocity empirical formula of seafloor sediments

公式编号	V_r /m·s^{-1}	调制函数 $f_2(n_t)$	变换权重 w_t
18	2 502.0	$1-0.308\ 24n_t+0.060\ 52n_t^2$	3.040 7
19	2 475.50	$1-0.308\ 24n_t+0.061\ 08n_t^2$	2.852 2
20	2 455.90	$1-0.308\ 24n_t+0.062\ 34n_t^2$	2.868 7
21	2 540.0	$1-0.308\ 24n_t+0.058\ 56n_t^2$	3.133 1
22	2 506.0	$1-0.308\ 24n_t+0.058\ 47n_t^2$	3.570 5
23	2 572.0	$1-0.308\ 24n_t+0.058\ 14n_t^2$	3.422 3
24	2 471.80	$1-0.308\ 24n_t+0.058\ 52n_t^2$	3.283 9
25	2 369.07	$1-0.308\ 24n_t+0.063\ 89n_t^2$	3.496 1

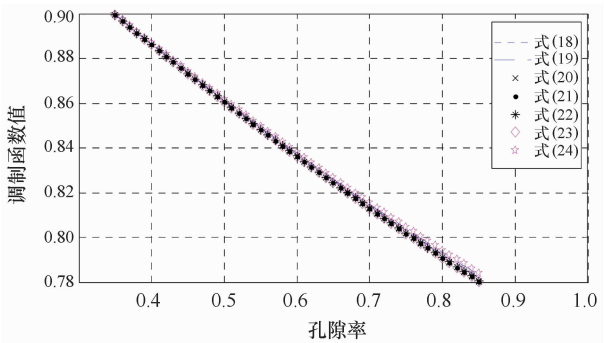


图 2　坐标变换后的纵波波速经验公式调制函数与孔隙率的关系

Fig. 2　Modulated functions of porosity-wave velocity empirical formulas by coordinate transformation

4.2.3　系数正负号的比较

纵波波速经验公式(18)～(25)的系数正负规律为:(1)常数项为正;(2)一次项系数为负;(3)二次项系数为正,与式(16)相比较不一致。比较式(8)可知,式(16)的系数正负号与经验公式的差别与没有考虑模量变化比对纵波波速的影响有关。

4.2.4　量纲分析

从式(13)和(15)可知,孔隙率－纵波波速模型是参考声速 V_r 乘以一个调制函数。如式(13)的调制函数为 $1+b_1 n\cdot(1-\rho_w/\rho_s)+b_2 n^2\cdot(1-\rho_w/\rho_s)^2$,可见调制函数的各项都应该是无量纲的,否则表达式两边的量纲将不一致。

例如式(20)的标准型如下:

$$V_P = 2\ 455.9\cdot(1-0.884\ 2n+0.513\ 1n^2), \tag{26}$$

式中,参考波速 V_r =2 455.9 m/s,调制函数为 $1-0.884\ 2n+0.513\ 1n^2$,与式(13)比较调制函数中的各项应该是无量纲的。

可见纵波波速经验公式中应该用无量纲的参数或有量纲的参数的比值作自变量。

5　结论

海底沉积物纵波速度受密度变化比和模量变化比的影响。基于密度变化比分析得出,孔隙率是描述海底沉积物纵波波速的一个基本物理参数,参考声速由底质性质确定,密度变化比对海底沉积物纵波波速的影响由复合参数 $n(1-\rho_w/\rho_s)$ 反映。

以复合参数 $n(1-\rho_w/\rho_s)$ 为变量的声速公式主要反映密度变化比对纵波波速的影响,还缺少反映模量变化比对纵波波速影响的变量。现有孔隙率-纵波波速经验公式是通过孔隙率的权重反映模量变化比对声速的影响,把孔隙率-纵波波速经验公式变换为标准型,各海区的孔隙率-纵波波速经验公式的调制函数是相当接近的,这为预报海底沉积物纵波波速提供了一种新方法。

式(5)表明纵波波速与模量变化比和密度变化比有关,密度变化比由复合参数 $n(1-\rho_w/\rho_s)$ 描述,为完整描述海底沉积物的物理力学性质与纵波速度的关系,不能缺少描述模量变化比的物理参数,这需要讨论沉积物的等效弹性模量与物理力学性质的关系,将在另一文论述。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] Biot M A. Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1962,34(9A): 1254－1264.
[4] Stoll R D. Acoustic Waves in Saturated Sediment[M]//Physics of Sound in Marine Sediments. Springer US,1974: 19－39.
[5] Stoll R D. Acoustic waves in ocean sediments[J]. Geophysics,1977,42(4): 715－725.
[6] Stoll R D. Theoretical aspects of sound transmission in sediments[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1980,68(5): 1341－1350.
[7] Holland C W,Brunson B A. The Biot-Stoll sediment model: An experimental assessment [J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1988,84(4): 1437－1443.
[8] 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.
[9] Hamilton E L. Geoacoustic modeling of the sea floor[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1980,68(5): 1313－1340.
[10] Anderson R S. Statistical correlation of physical properties and sound velocity in sediments[M]//Physics of sound in marine sediments. Springer US,1974: 481－518.
[11] 汪德昭,尚尔昌. 水声学[M]. 北京: 科学出版社,1981: 32－46.
[12] 卢博. 海底浅层沉积物声速与物理性质[J]. 科学通报,1994,39(5): 435－437.
[13] 卢博,李赶先,孙东怀,等. 中国东南近海海底沉积物声学物理性质及其相关关系[J]. 热带海洋学报,2006,25(2): 12－17.
[14] Orsi T H,Dunn D A. Sound velocity and related physical properties of fine-grained abyssal sediments from the Brazil Basin (South Atlantic Ocean)[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1990,88(3): 1536－1543.
[15] 周志愚,杜继川,赵广存. 南海、黄海海底声速垂直分布的测量结果[J]. 海洋学报,1983,5(5): 543－552.
[16] 唐永禄. 海底沉积物孔隙度与声速的关系[J]. 海洋学报,1998,20(6): 39－43.
[17] Chen Minpen,Shieh Y T,Chyan J M. Acoustic and physical properties of surface sediments in northern Taiwan strait[J]. Acta Oceanographica Taiwanica,1988,21: 92－118.
[18] 钱正明. 台湾东南外海海底沉积物物理、土力学和声学研究[D]. 台北:台湾大学,1989.
[19] 梁元博,卢博. 海底沉积物力学性质影响声速的物理机制[J]. 海洋学报,1985,7 (1): 111－119.
[20] 卢博,李赶先,黄韶健. 南沙海域浅层沉积物声速与物理参数的相关关系[C]//南沙海域声光场研究论文集. 北京: 海洋出版社,1996: 9－22.
[21] 邹大鹏,吴百海,卢博. 海底沉积物声速经验方程的分析和研究[J]. 海洋学报,2007,29(4): 43－50.
[22] Hashin Z,Shtrikman S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,1963,11(2): 127－140.
[23] 同济大学数学系. 高等数学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社,2007: 139－145.
[24] Buckingham M J. Compressional and shear wave properties of marine sediments: Comparisons between theory and data[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,2005,117(1): 137－152.
[25] Hamilton E L. Prediction of deep-sea sediment properties: state-of-the-art[M]//Deep-Sea Sediments. Springer US,1974: 1－43.
[26] Hamilton E L. Prediction of in-situ acoustic and elastic properties of marine sediments[J]. Geophysics,1971,36(2): 266－284.
[27] Mavko G,Mukerji T,Dvorkin J. The rock physics handbook: Tools for seismic analysis of porous media[M]. London: Cambridge University Press,2009.
[28] Hamilton E L. Sound velocity and related properties of marine sediments,North Pacific[J]. Journal of Geophysical Research,1970,75(23): 4423－4446.
[29] Bachman R T. Acoustic and physical property relationships in marine sediment[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1985,78(2): 616－621.

Theoretical relations of longitudinal wave velocity and physical-mechanical properties for seafloor sediments and comparison

Long Jianjun[1,2], Li Ganxian[3], Zou Dapeng[1]

(1. *School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou* 510060, *China*; 2. *Sanya Institute of Deep sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya* 572000, *China*; 3. *Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510301, *China*)

Abstract: To describe a longitudinal wave velocity of seafloor sediments, a ratio of the density variation (RDV) and a ratio of the effective elastic modulus variation (REEMV) are introduced, and then we conclude that the ratio of density variation is a composite parameter consisting of porosity, seawater density and density of solid phase of seafloor sediment. The longitudinal wave velocity can be expressed as a Taylor polynomial function of both the RDV and the REEMV. On basis of univariate analysis, the longitudinal wave velocity can be also written as a product of a reference wave velocity and a modulation function, and the theoretical results show that the reference wave velocity is determined by the physical properties of seafloor sediments, and a theoretical model of the composite parameter-longitudinal wave velocity is attained. By means of the model, the analysis of the some main presented empirical formulas of longitudinal wave velocity as a function of porosity shows that the reference wave velocity of these formulas are different each other but the modulation functions derived from these formulas are mutually equivalent. It shows that the proposed relationship between longitudinal wave velocity and physical-mechanical properties of seafloor sediments has turned out to be valid.

Key words: acouso-physical properties; wave velocity; seafloor sediment; polynomial model