

基于主元分析技术的海底沉积物声速预报方程

罗忠辉¹, 卢博²

(1. 广东技术师范学院机电学院, 广东 广州 510665; 2. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

摘要: 通过应用主元分析技术建立预报海底沉积物声速的经验方程, 将前人研究报道的经验方程进行分析研究, 指出其计算误差, 运用南海南部大陆架和大陆坡数据, 建立了主元回归计算模型。从理论上研究了如何在众多影响声速的物理参数中, 排除相互关联的参数, 优选出相互独立的、且对声速有显著影响的少数几个物理参数, 用优选后的物理参数建立了南海南部海域大陆架及大陆坡沉积物的 3 参数(孔隙度 n 、颗粒中值粒径 M_d 、塑限 W_p) 声速预报方程: $C_p = 1774 - 5.0944n + 12.499 M_d + 0.9985W_p$, 该方程的相对预报误差仅为 $-4.48\% - 3.77\%$ 。

关键词: 主元分析技术; 南海; 海底沉积物, 声速经验方程

中图分类号: P733.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5470(2009)03-0029-06

A study on forecasting equation of sound velocity for seafloor sediments based on principle component analysis

LUO Zhong-hui¹, LU Bo²

(1. School of Mechatronics Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China;

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

Abstract: In order to obtain a forecasting equation of sound velocity for seafloor sediments, the authors first apply the technology of principal component analysis and analyze existing empirical equation and its calculation errors. A principle component model is then built up using the measurement data of sediments from the continental slope and shelf in southern South China Sea. The authors also studied in theory how to exclude correlated parameters from a number of parameters that can affect the sound velocity and how to optimize a few parameters that are obviously related to sound velocity without cross-correlation. Using the optimal physical parameters, such as porosity n , median grain size M_d and plastic limit W_p , a three-parameter forecasting equation of sound velocity is established for the continental shelf and slope in southern South China Sea. The equation is $C_p = 1774 - 5.0944n + 12.499 M_d + 0.9985W_p$. The relative forecasting error ranges only from -4.48% to 3.77% .

Key words: principle component analysis technology; South China Sea; seafloor sediment; empirical sound velocity equation

对海底沉积物声学特性的研究, 已经不仅是海洋声学的研究课题, 而且随着海洋科学、海洋沉积学、海洋地质学等学科的发展以及海洋工程和海洋开发的需要, 海底沉积层中声参数与其他物理参量的关系, 越来越受到广泛的重视。在这方面, 近 10 多年来国内外的研究都取得了可喜的进展, 尤

其对声速与沉积物物理参数之间的关系, 建立了各种经验公式。但是这些经验公式是直接或间接测量沉积物各项物理参数和声速数值, 通过对众多的数据作回归分析, 归纳出声速依赖于各物理参量的单参数(或双参数)关系式, 再从多种关系式中选出最佳的关系式而得到的。这些经验公式, 在理论上缺

乏系统性及完备性，在形式上表现多样性。本文试图应用主元分析技术，从多元统计学理论角度深入分析声速与沉积物物理参数之间的关系，给出主元回归计算模型。

1 海底沉积物声速经验公式

1.1 沉积物声学物理参量

常用的沉积物物理参量有孔隙度 $n(\%)$ 、孔隙比 e 、含水量 $\omega(\%)$ 、密度 $\rho(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ 、粘土含量 $c(\%)$ 、饱和度 $s(\%)$ 、粒径 $d(\text{mm})$ 、颗粒中值粒径 M_d 。这些量互有相关性，它们的相关性随着沉积物的沉积环境和沉积条件的不同而不同。

反映土力学指标的参量有液限 $W_L(\%)$ 、塑限 $W_p(\%)$ 、塑性指数 $I_p(\%)$ 、抗压强度 $q_u(\text{kPa})$ 等。液限、塑限和塑性指数都是可塑性指标，实质上也是反映含水量的指标，而且有 $I_p=W_L-W_p$ ，应用于评价沉积物的容许承载力。

反映声学特性的主要参量有声速 $C_p(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 、声阻抗 $Z(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 、声衰减系数 $\alpha(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$ 、声反射系数 A 和海底反射损失 $BL(\text{dB})$ 等。

1.2 沉积物声速经验公式

国内外许多研究者分析了海底沉积物声速与各物理参量之间的关系式，既有单参数公式，也有双参数和多参数公式，简介如下。

1.2.1 单参数公式

1)含水量与声速的关系

卢博^[1]等研究了我国沿海和南海南部海底沉积物含水量与纵波声速的关系(相关系数 $R=0.85$):

$$C_p = 1809.7 - 11.17\omega + 0.08\omega^2 \tag{1}$$

2)孔隙度(n)与声速的关系

Hamilton^[2]、Anderson^[3]、Orsi 等^[4]曾广泛研究了世界大洋海底沉积物各项理化性质对声速的影响，他们都认为除了孔隙度外没有比较满意的结果。周志愚等^[5]、卢博等^[6]同时指出基于孔隙度单参数经验公式与实测声速之间还存在不呈线性关系的较大差异。周志愚等^[5]、唐永禄^[7]在其经验公式中加入底层海水声速 C_0 作为一个修正项。孔隙度与纵波声速的关系，其主要的经验公式如下：

Hamilton^[2]：
$$C_p = 2455.9 - 21.716 n + 0.126 n^2 \tag{2}$$

Anderson^[3]：
$$C_p = 2506 - 27.58 n + 0.1868 n^2 \tag{3}$$

Orsi 等^[4]：
$$C_p = 2527.4 - 27.132 n + 0.1782 n^2 \tag{4}$$

周志愚等^[7]：

$$C_p = 962 + C_0 - 27.58 n + 0.1868 n^2 \tag{5}$$

唐永禄^[7]：
$$C_p = 942 + C_0 - 25.02 n + 0.156 n^2 \tag{6}$$

卢博等^[6]：
$$C_p = 2470.7 - 32.2 n + 0.25 n^2 \tag{7}$$

3) 粒度(M_d)与声速的关系公式
Hamilton^[3]：
$$C_p = 1927.27 - 75.82 M_d + 3.21 M_d^2 \tag{8}$$

Chen 等^[8]：
$$C_p = 2860.449 - 721.958 M_d + 147.548 M_d^2 - 10.157 M_d^3 \tag{9}$$

4)密度(ρ)与声速的关系
Orsi 等^[4]：
$$C_p = 2855.7 - 1885.98 \rho + 652.06 \rho^2 \tag{10}$$

1.2.2 双参数公式

1)液限(W_L)、塑限(W_p)与声速的关系

Atterberg 认为液限(W_L)与塑限(W_p)能较好地反映沉积物的压缩性、膨胀性。卢博等^[6]分析认为只有沉积物中存在可压缩性与膨胀性才有可能使得声波在沉积物中传播，沉积物的可压缩性大小正好决定了声速的变化，并总结了经验公式：

卢博等^[6](相关系数 $R=0.81$):
$$C_p = 1770.8 - 12.78 W_L + 0.11 W_L^2 \tag{11}$$

卢博等^[6](相关系数 $R=0.84$):
$$C_p = 1738.8 - 17.75 W_p + 0.215 W_p^2 \tag{12}$$

2)孔隙度、无侧限抗压强度与声速的关系

梁元博等^[9]比较了前人的研究成果，认为采用一个自然物理参数和一个力学参数来预报声速会更准确，于是得出了采用孔隙度(n)和无侧限抗压强度(q_u)两个参数的经验公式(公式适用于东南沿海大陆架、大陆坡)，在其运用实验数据中拟合得到声速计算偏差较小：

$$C_p = 4195 - 90.5833 n + 0.7695 n^2 - 94.6968 q_u + 64.4603 q_u^2 \tag{13}$$

3)密度、孔隙度与声速的关系
卢博等^[10]分析研究了南海南部海区海底沉积物声速与密度(ρ)和孔隙度(n)的关系，得出双参数公式如下：

$$C_p = 1895.78 - 2525.29\rho + 1041.88\rho^2 + 51.05n - 0.31n^2 - 9.42\rho n \tag{14}$$

1.2.3 多参数公式

Anderson^[3]将海底沉积物按深度小于 1 500m、1 500—3 000m、3 000—4 200m 及大于 4 200m 分为 4 类，对每类沉积物都给出一些回归方程，方程的参量包括孔隙度、孔隙比、平均颗粒度、碳的含量等，有单参量的，也有多参量方程，他的分析结

论认为以孔隙度预报声速要更好些，并认为多参量对预报声速没有什么改进。

邹大鹏等^[11]提出孔隙度(n)和含水量(ω)双参数公式，采用南海海南岛鹿回头外海大陆架数据，运用最小二乘法拟合得出式(15)，其相关系数为 0.893，标准差为 9.983，相对偏差为 $-1.14\% - 0.1\%$ ：

$$C_p = 1973.333 - 7.9462\ n + 0.473929\ \omega \quad (15)$$

2 主元分析原理

主元分析是多元统计中最重要的方法之一，是使一个维数很大的数据矩阵降维，将测试数据中存在的大量相关的变量通过多元统计的方法将多指标问题化为较少的综合指标问题。研究对象为测试过程数据组成的矩阵，建立一个 $n \times m$ 维的过程数据矩阵 \mathbf{X} ，其中 \mathbf{X} 的每一列对应一个变量，每一行对应一个样本，矩阵 \mathbf{X} 可以表示为 n 个向量的外积之和：

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}_m \mathbf{P}_m' = t_1 \mathbf{p}_1' + t_2 \mathbf{p}_2' + \cdots + t_m \mathbf{p}_m' \quad (16)$$

写成矩阵的形式为：
$$\mathbf{X} = \mathbf{T} \mathbf{P}' = \sum_{i=1}^m t_i \mathbf{p}_i' \quad (17)$$

其中 t_i 被称为得分(score)向量，也称主元， $t_i \in \mathbf{R}^n$ ； \mathbf{p}_i 被称为负荷(loading)向量， $\mathbf{p}_i \in \mathbf{R}^m$ ， \mathbf{X} 的得分向量也叫做 \mathbf{X} 的主元。 \mathbf{P} 为负荷向量的矩阵表示形式， \mathbf{T} 为主元向量的矩阵表示形式，上角标“'”表示矩阵转置。

分解向量满足条件：1)各个得分向量之间是正交的；2)各负载向量之间是正交的，且每个负荷向量的长度均为 1，即：

$$\begin{cases} \mathbf{p}_i \mathbf{p}_j = 0 & i \neq j \\ \mathbf{p}_i \mathbf{p}_i = 1 & i = j \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)各项右乘 \mathbf{p}_i ，利用上述条件可得： $t_i = \mathbf{X} \cdot \mathbf{p}_i$ ，每一个得分向量代表了数据矩阵在其相对的负荷向量方向上的投影， t_i 的长度越大，矩阵 \mathbf{X} 在 \mathbf{p}_i 方向上的覆盖程度就越大。若 $\|t_1\| > \|t_2\| > \cdots > \|t_m\|$ ，那么 t_i 将代表数据 \mathbf{X} 变化的第一方向，依次类推。通常数据 \mathbf{X} 的变化主要体现在前 $k < m$ 个负荷向量上的投影变化，这等同于将 m 维数据变量经过投影变换压缩为 k 维数据变量进行分析，从而实现了数据矩阵降维的目的。

合理确定 k 的大小对建立主元模型非常重要，通常以计算主元个数对数据的累计解析程度作为选择主元个数的依据。主元的累计贡献率 η 可由矩阵 \mathbf{X} 的协方差的前 k 个特征值之和除以它所有特征值

之和求得，即： $\eta = \sum_{i=1}^k \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i$ ，显然累计贡献率表示了前 k 个主元所解析的数据变化占全部数据变化的比例。本文采用经验法，即判断前 k 个主元的累计贡献率是否大于 85% 作为选择依据。

主元回归模型可以表示为：

$$Y = b_1 t_1 + b_2 t_2 + \cdots + b_k t_k = \mathbf{T}_k \mathbf{B} \quad (19)$$

其中 $\mathbf{B} = [b_1, b_2, \cdots, b_k]'$ 为主元回归模型系数，可以利用数据拟合得到 $\mathbf{B} = (\mathbf{T}_k' \mathbf{T}_k)^{-1} \mathbf{T}_k' \mathbf{Y}$ 。由于主元是正交的，上述模型可以克服多重共线性带来的干扰。影射回原数据作为输入变量的模型为：

$$Y = \mathbf{T}_k \mathbf{B} = \mathbf{X} \mathbf{P}_k \mathbf{B} = \mathbf{X} \theta$$

其中 θ 为原始变量的模型参数， $\theta = \mathbf{P}_k \mathbf{B} = \mathbf{P}_k (\mathbf{T}_k' \mathbf{T}_k)^{-1} \mathbf{T}_k' \mathbf{Y}$ ， $\mathbf{P}_k = [\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \cdots, \mathbf{p}_k]$ ， \mathbf{Y} 是主元回归建模后的模型表达式。

3 海底沉积物声速主元回归计算模型

表 1 是卢博等^[10]在南海南部海域大陆架海区

表 1 南海南部海域大陆架沉积物参数
Tab. 1 Sediment parameters of continental shelf
in southern South China Sea

站号	Cp/(m · s ⁻¹)	n/ %	ω/ %	e	ρ/(g· cm ⁻³)	M _d	q _u / kPa	W _L / %	W _p / %
93-12-58	1549	65.5	71.8	1.899	1.57	5.930	1.3	46.9	30.3
93-12-56	1490	69.6	87.9	2.294	1.50	6.033	0.1	55.3	27.6
93-12-53	1622	59.4	56.6	1.462	1.66	5.862	3.5	41.4	17.1
93-12-30	1654	50.7	39.4	1.030	1.84	3.119	11.1	31.2	17.3
94-9-38	1470	82.2	159.3	2.763	1.84	3.687	3.4	23.5	12.4
94-9-60	1555	40.7	45.2	0.678	1.75	4.891	9.0	33.9	22.6
94-9-59	1514	65.8	73.0	1.909	1.57	5.019	0.2	43.1	26.1
94-9-62	1652	50.6	41.6	1.024	1.84	3.891	10.7	38.2	24.1
94-9-65	1742	54.1	48.5	1.177	1.76	3.860	3.6	31.8	21.6
94-9-67	1551	80.2	167.0	4.057	1.32	3.547	0.1	62.3	41.4
94-9-68	1546	65.7	76.4	1.917	1.56	6.066	0.1	46.1	31.0
94-9-70	1679	52.4	41.8	1.098	1.77	3.871	5.4	37.9	22.4

所得到的海底沉积物声学物理性质数据。文献资料表明对沉积物声速 C_p 有影响的物理参数主要有：孔隙度 n 或孔隙比 e 、含水量 ω ，颗粒中值粒径 M_d ，密度 ρ 、抗压强度 q_u 、流变性参数液限 W_L 、塑限 W_p ，其中对 C_p 有较大影响的沉积物物理参数为孔隙度 n 、含水量 ω 和颗粒中值粒径 M_d ，一般规律是孔隙度和含水量越大，声速越小^[1-4]。从定义上可以看出孔隙度、孔隙比、含水量这三个参数是相互关联的。用一元线性回归方法，对表 1 中的 n ， ω ， e 进行回归分析，可以得到以下本文的回归公式：

相关系数 $R = 0.9088$ ；
$$n = 41.8726 + 0.258\omega \quad (20)$$

相关系数 $R=0.9253$;
 $n=39.6672+12.2439e$ (21)
相关系数 $R=0.9422$;
 $\omega=-2.2659+43.9126e$ (22)

从统计学的角度，由图 1—图 3 中的式(20)，(21)，(22)曲线中可以看出：孔隙度、孔隙比、含水量三参数是高度相关的，相关系数达到 0.9 以上。

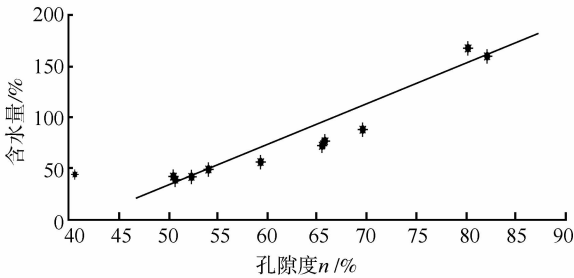


图 1 孔隙度 n 与含水量 ω 之关系，相关系数 $R=0.9088$
Fig. 1 Correlation of porosity n with water content ω , with correlation coefficient $R=0.9088$

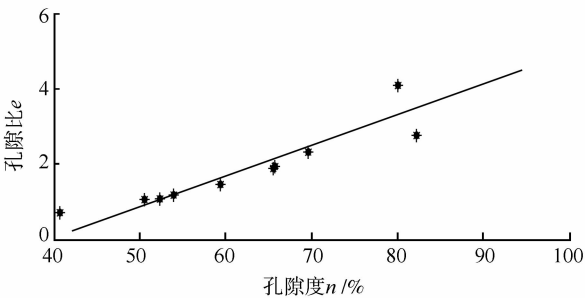


图 2 孔隙度 n 与孔隙比 e 之关系，相关系数 $R=0.9253$
Fig. 2 Correlation of porosity n with void ratio e , with correlation coefficient $R=0.9253$

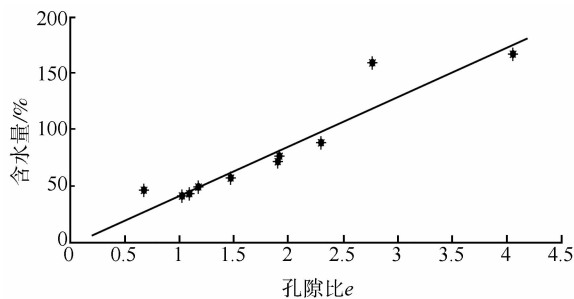


图 3 含水量 ω 与孔隙比 e 之关系，相关系数 $R=0.9422$
Fig. 3 Correlation of water content ω with void ratio e , with correlation coefficient $R=0.9422$

根据主元分析原理，以 n 、 ω 、 e 、 ρ 为列向量构成一个 12×4 维数据矩阵，计算该数据矩阵的相关系数矩阵 R ，再计算 R 的特征根。将特征根按降序排列 $[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4] = [3.3106, 0.5816, 0.0938, 0.0141]$ ，相应的特征向量记为 $[p_1, p_2,$

$p_3, p_4]$ 。显然，第 1 个特征根较大，第 2 个特征根较小，第 3、第 4 个特征根很微小。因此，取前两个主元就可以解析数据矩阵的变化，此时前两个主元的贡献率为：

$$\eta = (\lambda_1 + \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) = 3.8922 / 4 = 97.3\%$$

其中，第 1 主元的贡献率：

$$\eta_1 = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) = 82.8\%;$$

第 2 主元的贡献率：

$$\eta_2 = \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) = 14.5\%;$$

通过上述主元分析说明 n 、 ω 、 e 、 ρ 这 4 个参数中，只用一个参量就能基本上解析整个数据的信息，解析程度为 82.8%；如用两个参量来表达，则解析程度达到 97.3%。

现忽略第 3、第 4 主元的影响，选择第 1、第 2 个主元来建立回归模型，即：

$$Y = t_1 b'_1 + t_2 b'_2 = T_k B = X P_k B = X \theta$$

$$\theta = P_k B = P_k (T_k' T_k)^{-1} T_k' Y$$

式中： $T_k = [t_1, t_2]$ ， $B = [b_1, b_2]'$ ， $P_k = [p_1, p_2]'$ 。

计算结果为： $Y = -374.76 t_1 - 526.18 t_2$ ， $\theta = [50.7878, -12.7835, 190.8869, -614.9214]$ 。

影射回原参数作为输入变量的模型，则得到沉积物声速的预测模型为：

$$C_p = 50.7878n - 12.7835\omega + 190.8869e - 614.9214\rho \quad (23)$$

用式(23)预测声速与实际测量值存在较大的误差，其主要原因是预测公式中不宜含有高度线性相关的参数，否则会相互干扰，影响预测的精度；其次，本文公式是在声速与 n 、 ω 、 e 、 ρ 成线性关系的假设下推导的，卢博等研究结果表明沉积物声速与孔隙度、含水量等物理参数并非完全成线性关系。

同理，对文献资料中常用于预报声速的 8 个参数：孔隙度、孔隙比、含水量、密度、平均颗粒度、抗压强度、液限、塑限，应用主元分析方法，由表 1 中的数据组成 12×8 维的数据矩阵 $X = [n, e, \omega, \rho, M_d, q_u, W_L, W_p]$ ，作 X 的相关系数矩阵 R ；求 R 的特征值并按降序排列 $\lambda = [4.9890, 1.7320, 0.9298, 0.1774, 0.0987, 0.0593, 0.0130, 0.0007]$ 。则第 1、第 2、第 3 主元对数据矩阵的解析程度为：

$$\eta = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) / (\sum \lambda_i) = 7.6508 / 8 = 95.6\%$$

据此可知，该 12×8 维数据矩阵 X 可以变换为 3 个相互独立的变量，而其他 5 个变量是相互关

联的。因此，在作声速预报回归方程时，参数的个数不宜超过 3 个。取 3 个主元，建立主元回归方程为： $Y=35.1777t_1+25.6510t_2-12.5138t_3$ ，

$$\theta = [6.6272, -0.0972, 5.0965, -19.0264, 26.5291, 20.5913, 17.9673, 13.0198]$$

根据 θ 的各分量值及其对应的参量的大小，可以选出 n 、 M_d 、 W_p 作为因变量， C_p 作为函数，建立 3 元一次线性回归方程，用 Matlab 语言编程实现。求出的回归方程(相关系数 $R=0.75$)为：

$$C_p=1958.4-4.2324n-28.559M_d+0.798W_p \tag{24}$$

把表 1 中的 n 、 M_d 、 W_p 数据代入式(24)，得到声速的预报值为： $C_p' = [1536, 1513.6, 1553.3, 1668.6, 1515.1, 1664.5, 1557.4, 1652.4, 1636.5, 1550.7, 1531.9, 1644]$ 。预报值的误差范围为： $-105.54-109.53$ ，相对误差范围为： $-6.05\%-7.04\%$ 。

本文尝试与邹大鹏等、Anderson、卢博等预报计算经验方程计算结果对比，预报误差如表 2 所示。

表 2 几个公式的声速预报误差表
Tab. 2 Velocity prediction error

	误差范围	相对误差范围
邹大鹏公式(15)	-175.5709—116.3443	-10.08%—7.48%
Anderson 公式(3)	-266.3676—61.2175	-15.29%—4.16%
卢博公式(7)	-286.2896—81.7584	-16.43%—5.56%
本文公式(24)	-105.54—109.53	-6.05%—7.04%

* 注：计算数据来自表 1

从上面的验算中可以看出，本文用主元分析方法获得的海底沉积物声速预报方程，其预报误差最小。

为了进一步验证主元分析方法在建立多参数声速预报方程的优越性能，以表 3 中的南海南部海域大陆坡沉积物参数 n ， ω ， e ， ρ ， M_d ， q_u ， W_L ， W_p 为列向量，组成数据矩阵，按相同的方法建立了如下三参数预报方程($R=0.78$)：

$$C_p=1774-5.094n+12.499M_d+0.9985W_p \tag{25}$$

把表 3 中的 n 、 M_d 、 W_p 数据代入式(25)，得到声速的预报值为 $C_p' = [1490.5, 1462.4, 1505.7, 1549.9, 1517.3, 1489.4, 1533.1, 1502.2, 1494.1, 1461.2, 1466.5, 1478.5, 1463.8, 1483.8, 1489.9, 1471.2, 1475.5, 1476.3, 1477.5, 1499.9, 1480.5]$ 。预报值的误差范围为： $-58.1691-63.8794$ ，相对误差为： -4.48%

—3.77%。

表 3 南海南部海域大陆坡沉积物参数
Tab. 3 Sediment parameters of continental slope in southern South China Sea

站号	$C_p/(m \cdot s^{-1})$	$n/\%$	$\omega/\%$	e	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	M_d	q_u/kPa	$W_L/\%$	$W_p/\%$
93-5-6	1446	77.1	130.0	3.364	1.37	5.976	20.4	90.7	34.6
93-5-7	1490	80.3	155.6	4.072	1.31	6.126	6.1	78.8	20.9
93-5-8	1506	71.9	95.0	2.563	1.45	5.809	16.2	67.7	25.4
93-5-9	1522	63.3	62.0	1.723	1.63	5.809	19.3	48.1	25.8
93-5-11	1508	76.2	118.9	3.203	1.38	5.588	12.2	70.5	61.7
93-5-12	1514	72.6	98.0	0.74	1.46	4.804	11.2	67.7	25.3
93-5-13	1591	72.0	95.2	2.565	1.50	6.038	18.3	64.9	50.5
93-5-15	1484	76.6	124.3	3.276	1.39	5.381	7.5	80.2	51.3
93-12-13	1471	75.4	124.8	3.069	1.37	5.735	0.1	77.6	32.6
93-12-18	1460	79.9	147.5	3.968	1.34	5.566	0.1	77.9	24.7
93-12-19	1476	81.9	168.7	4.517	1.31	5.877	0.1	90.4	36.3
93-12-59	1466	78.5	153.5	3.650	1.33	6.044	0.2	83.4	28.9
93-12-63	1483	80.6	163.0	4.159	1.31	5.969	1.4	96.4	25.8
93-12-65	1542	80.3	160.2	4.064	1.31	6.047	1.1	100.5	43.4
93-12-67	1426	81.7	175.5	4.446	1.30	6.079	0.4	98.4	56.2
93-12-69	1429	81.6	174.4	4.424	1.30	6.100	0.8	100.8	36.7
93-12-71	1441	81.3	164.2	4.344	1.30	6.099	0.4	99.6	39.5
93-12-72	1431	81.5	173.1	4.398	1.29	6.207	1.1	95.7	40.0
93-12-47	1505	79.9	157.9	3.983	1.33	6.548	0.9	85.2	28.7
93-12-49	1541	81.9	182.5	4.541	1.30	5.970	0.1	97.7	68.6
93-12-51	1537	79.8	156.8	3.962	1.33	6.060	0.2	88.8	37.4

4 讨论

自然物理力学参数是海底沉积物最基本的参数性质，在整体上决定了声传播过程的各种声学参数，但对声传播过程的现象还应根据结构特征进行分析。动力学弹性性质是沉积物在声波作用下所表现出的弹性性质，它与沉积物自然物理力学性质之间存在一种必然的联系。

海底沉积物是由颗粒与液体双相介质所组成，它的声传播(特别是压缩波)在很大程度上是由双相介质的可压缩性共同来决定。孔隙度 n 的大小是由沉积物的液、固两项介质的体积之比来决定，其比值不同，说明固、液两相的组分不同，直接导致声传播速度的不同；孔隙度在一定程度上还反映了沉积物结构的疏密程度，因此在声速预报方程中，孔隙度是一个较好的参数。

颗粒中值粒径 M_d 是沉积物一项重要指标，它是在样品中长期保持不变的参数。Hamilton 的研究资料表明^[6]：在大陆台阶与深海环境中，颗粒中值粒径与声速有较理想的线性关系。陈本民等根据台湾海峡资料也总结出海底沉积物的声速与颗粒中值粒径的经验公式(见本文公式(9))。卢博研究了海底沉积物声传播机理，提出了两种与颗粒状态有

关的声线传播模型，认为沉积物颗粒的粒径影响声线传播的过程及路径，若沉积物颗粒的粒径大于声波的波长，则声速较快。

沉积物的塑限 W_p 是可塑性指标，主要用作确定沉积物由可塑状态过度到流动状态，它与颗粒组成、矿物成分等有关，因此较好地反映了沉积物的性状。文献^[6]表明，在南海北部大陆架上，沉积物声速与塑性有良好的相关关系。Atterberg 认为塑限能较好地反映沉积物的压缩性、胀缩性，而只要沉积物存在可压缩性，才有可能使声波在沉积物中传播。因此，在某种意义上，沉积物的可压缩性大小正好决定了声速的变化。

5 结论

本文把主元分析技术引入海底沉积物多参数声速预报方程研究中，从理论上研究了如何在众多影响沉积物声速的物理参数中，排除相互关联的参数，优选出相互独立的、且对声速有显著影响的少数几个物理参数，用优选后的物理参数建立了南海南部海域大陆架和大陆坡海底沉积物的孔隙度 n 、颗粒中值粒径 $M_d(\varphi)$ 、塑限 W_p 3 参数声速预报方程，该方程的相对预报误差仅为 $-4.48\%—3.77\%$ 。

参考文献：

[1] 卢博，梁元博. 中国东南沿海海洋沉积物物理参数与声速

统计相关[J]. 中国科学：B 辑，1995，5(24)：556—560.
[2] HAMILTON E L. Geoacoustic Modeling of the Sea Floor [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, 68: 1313—1340.
[3] ANDERSON R S. Statistical correlation of physical properties and sound velocity in sediments[C] //Physical of Sound in Marine Sediment. NY: Plenum Press, 1974: 481—518.
[4] ORSI T H, DUNU D A. Sound velocity and related physical properties of fine grained adyssal sediments from the Brazil Basin (South Atiantic Ocean) [J]. J Acoust Soc Am, 1990, 88(3): 1536—1542.
[5] 周志愚，杜继川，赵广存，等. 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.
[6] 卢博，李赶先，孙东怀，等. 中国东南近海海洋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.
[7] 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.
[8] CHEN MINPEN, SHIEH Y T, CHYAN J M. Acoustic and physical properties of surface sediments in northern Taiwan Strain [J]. Acta Oceanographica Taiwanica, 1988, 21: 92—118.
[9] 梁元博，卢博. 海洋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.
[10] 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，1996，5：9—22.
[11] 邹大鹏，吴百海，卢博. 海底沉积物声速经验方程分析和研究[J]. 海洋学报，2007，29(4)：43—50.