

海南岛东南外海海底沉积物特征及其声学物理性质研究

卢 博¹, 李赶先¹, 刘 强¹, 黄韶健², 张福生²

(1 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; 2 中国科学院 南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

摘要: 分析研究了南海北部大陆架西南缘的海南岛东南外海海底沉积物声学物理特性, 在多个航次中进行了海底沉积层取样、海水 CTD 测量、浅地层及旁侧声呐扫测等工作. 在实验室里对沉积物样品进行声学参数、沉积学基本参数、物理力学参数和¹⁴C 年龄测试等分析. 根据多尔特曼公式求解出弹性模量、体积弹性模量、压缩系数、切变模量、泊松比和拉梅常数等六项沉积物弹性参数. 分析结果表明在该海区海底沉积物的压缩波速为 1.474~1.700 m/s, 在不同的海区内有高低声速两类性质的沉积物分布; 沉积物的切变波速为 150~600 m/s; 沉积物在 100 kHz 的声衰减为 35~260 dB/m; 沉积物的密度为 1.4~2.0 g/cm³; 沉积物的孔隙度为 42%~88%.

关键词: 南海; 海南岛东南外海; 海底沉积物; 声学参数; 物理性质

中图分类号: P733.23 文献标识码: A 文章编号: 0253-4193(2007)04-0034-09

1 引言

海南岛东南外海位于南海北部大陆架西南缘, 年平均气温为 25.4℃, 年平均水温为 26.7℃, 表层海水的水温略高于气温; 年平均降雨量为 1315.2 mm, 年平均蒸发量为 2154.3 mm, 蒸发量大于降雨量, 且降雨多集中于每年的 5~10 月间的台风季节; 海水盐度为 32~34. 海区为热带海洋性季风气候, 夏半年以西南季风为主, 冬半年以东北季风为主, 季风控制着沿岸流的流向和流速. 每年平均有台风 2~4 个, 台风一般在西太平洋生成后穿过菲律宾进入南海, 在海区及附近经过和登陆, 每年也偶发南海台风 1~2 个. 潮汐为不规则全日潮, 其中三亚湾多年平均潮差为 0.8 m, 多年最大平均潮差为 2 m; 亚龙湾多年平均潮差为 0.9 m, 多年最大平均潮差为 1.8 m. 从以上看出该海区具有热带海区的特征.

为了认识海区海底沉积物的声学物理性质, 多

年来先后进行了多个航次的海上工作, 包括海底沉积层取样、海水 CTD 测量、浅地层及旁侧声呐扫测等. 在实验室里对沉积物样品进行沉积物声学参数、沉积学参数、沉积物物理力学参数和¹⁴C 年龄测试等分析. 对海底沉积物取样使用了箱式取样器、重力式取样管和活塞重力取样管等, 管内有塑料管, 取样后把塑料管连同沉积物从取样管中拉出来, 切割为长 15~20 cm 后用盖子盖好, 保持垂直堆放和运输以尽量减小对沉积物样品的搅动破坏. CTD 测量是在夏季进行的. 浅地层及旁侧声呐扫测是用美国 Klein 公司生产的 HydroscaN531 型三通道浅地层及旁侧声呐两用仪, 浅地层探测拖鱼输出频率为 3.5 kHz, 旁侧声呐输出频率为 100 kHz. 本文在讨论中引用了合作单位在同航次中所得的一些结果.

2 海底沉积物基本特征和分布概况

海南岛东南外海有海湾、大陆架和大陆坡等海

收稿日期: 2006-09-05; 修订日期: 2006-12-04

基金项目: 中国科学院声场声信息国家重点实验室资助项目(200502); 国家自然科学基金资助项目(40676040).

作者简介: 卢 博(1952-), 男, 广东省江门市人, 研究员, 从事海洋物理和海底沉积声学. E-mail: salu@scsio.ac.cn

底地形地貌单元。海南岛南面的三亚湾是一个典型的螺旋型海湾,它是一个处于岬湾海岸的两个岬角之间的袋形海湾;在它的东边有榆林湾、亚龙湾、陵水湾和较小的土福湾等。这几个海湾的岬角分别是马岭、鹿回头岭、锦母角、白虎角、牙龙角和陵水角。沿岸分布着西瑁岛、东瑁岛、西洲岛、东洲岛等岛屿。往东是陵水湾和万宁湾等较大的海湾,沿海岸线走向的水深很快由几米变深至几十米,大部分海底水深在 200 m 以浅;在它的东南方逐步过渡到水深 200 m 以下的大陆坡,这是西沙海槽的西部,与西沙群岛相望。由浅地层及旁侧声呐扫测结果发现沿岸几个海湾的岬角和岛屿四周水下都有珊瑚礁坪发育或基岩露头,有些是直接裸露在海底,有些被沉积物覆盖,厚度不一。珊瑚礁坪在水下呈舌状向外延伸,宽度几十米到几百米不等,在低潮位时局部或全部出露在水面。

海湾内海底沉积物主要是石英和长石碎屑以及钙质生物骨屑。沿岸和岛屿周边海底沉积物颗粒较粗,主要为中—粗砂粒级,甚至有砾级沉积物。地质取样和浅地层及旁侧声呐扫测结果表明在三亚湾内水深 5 m 的近岸区海底沉积物是中—粗砂,在水深 10 m 离岸区为粉砂—细砂,在水深 20 m 以粉砂—黏土为主。在榆林湾和鹿回头岭以外水深 30 m 的海底是以粉砂为主的沉积物,从 20 多个站位的分析结果来看,在埋深 1~2 m 的海底中可以划分出七种沉积物类型:细砂、粉砂、粉砂质砂、黏土质砂、砂质粉砂、黏土质粉砂和粉砂质黏土,各站位的各层位样品中每种类型的沉积物颗粒百分含量都不同。

在大陆架边缘海底埋深 0.5~0.6 m 处观察到柱状样沉积物中明显的特征变化,最上面的黏土质粉砂突然过渡到砂质沉积物,有长石、石英砂和岩屑等陆源沉积物,个别粒径在 1 mm 以上,含量在 10%~45%。有潮间带生物化石组合,它们的层厚度不一,在个别地方可能直接出露在海底或仅被薄层的浮泥覆盖,取样管未能在这种沉积物中取得较长的样品,这是一种低海平面时期滨海相残留沉积物,在南海北部大陆架水深 30~100 m 的海底都有比较广泛的分布。

根据浅地层及旁侧声呐扫测结果,发现从锦母角和鹿回头岭向外垂直于海岸线的三条测线中埋深 50 m 的海底沉积物有明显的分层层理结构,黏土质粉砂和砂质沉积物交错出现,各层的厚度不一,最表层是黏土质粉砂;第二层是粉砂质砂;再往下一层是

比较致密的细砂;最下一层的连续反射界面为低海平面时期滨海相残留沉积物和陆源物质,在这个层内也有不连续的分层(图 1)。在牙龙角和陵水角向外的两条测线中未见海底沉积物的分层现象,其浅地层探测图像中声波反射比较强烈,细砂是主要的砂质沉积物,埋深 30 m 以下是连续的反射界面,也是低海平面时期滨海相残留沉积物和陆源物质(图 2)。

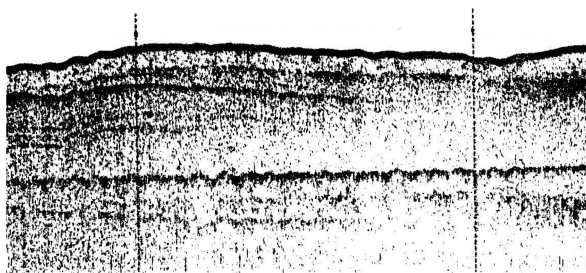


图 1 鹿回头岭向外垂直于海岸线的测线中旁侧声呐对浅地层的扫测结果

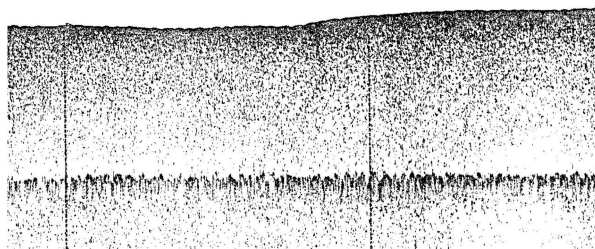


图 2 陵水角向外的测线中旁侧声呐对浅地层的扫测结果

3 海底沉积物声学特性

海底沉积物声学特性的主要参数有沉积物压缩波速、切变波速等;在 2006 年出海航次中对个别站位的样品测量了沉积物的声衰减;根据声速和沉积物密度得出了沉积物弹性性质的六个参数。在实验室里对沉积物样品进行测量的仪器先后用湖南湘潭无线电厂的 SYG-3 型声波参数仪、SYG-2B 型声波参数仪。一对换能器用来激发声脉冲信号的发射和接收,数据采集处理系统为电子计算机,通过 A/D 转换接收到的信号经快速傅立叶变换(FFT)后进入 CJ-1 数据采集处理系统进行频谱分析、数据储存和打印输出,由频谱分析结果可以给出原始波形、频率谱、功率谱和相位谱。SYG-3 和 SYG-2B 型声波参数仪能对长 15~50 cm 的样品进行压缩波速和切变波

速的测量; 后来也用到湖南天鸿电子研究所的 DB4 型多波参数分析仪, 该仪器能对长 15~ 50 cm 的样品进行压缩波速和声衰减的测量, DB4 型多波参数分析仪能进行人机交互、多通道、多参数调节, 可以对数据自动标定, 减小误差. 测量换能器的频率有 50, 100, 200, 500 kHz, 每 2 a 对仪器和换能器进行一次调试标定, 以确保测量结果的可靠性. 测量时室内温度为 25~ 28 °C, 仪器误差为 0.5%~ 1%.

在水深 50 m 的海湾内外有海底沉积物柱状取样站 31 个, 主要在三亚湾和榆林湾, 样品的平均长度为 140 cm, 最长的为 280 cm. 分层测量样品 76 个, 压缩波速(c_p) 为 1.481~ 1.700 km/s, 平均值为 1.555 km/s; 表层沉积物的压缩波速为 1.481~ 1.659 km/s. 切变波速(c_s) 为 150~ 350 m/s, 平均值为 229 m/s. 根据夏季 CTD 测量结果换算出来的海水声速(c_0) 为 1.530~ 1.531 km/s, 可以看出在三亚湾和榆林湾内海底沉积物有高、低声速的现象, 即表层沉积物的压缩波速大于海水的声速(声速比 r 小于 1) 和表层沉积物的压缩波速小于海水声速(声速比大于 1). 低声速沉积物主要集中在三亚湾和榆林湾, 一直延伸到水深 66 m 处的海底. 高声速的沉积物分布在低声速沉积物的两边, 图 3 给出了高、低声速的沉积物(声速比大于 1 或小于 1) 的分界和大致

致的分布. 对于可近似视为均匀的浅表层沉积物, 一般可得到瑞利反射系数(r_R). 把这里的海底最上层 100 cm 的沉积物近似地看成均匀介质, 不考虑散射损失因素, 用下式求出海底反射损失(l_b):

$$l_b = -20 \lg \left[(c_p \rho - c_0 \rho) / (c_p \rho + c_0 \rho) \right].$$

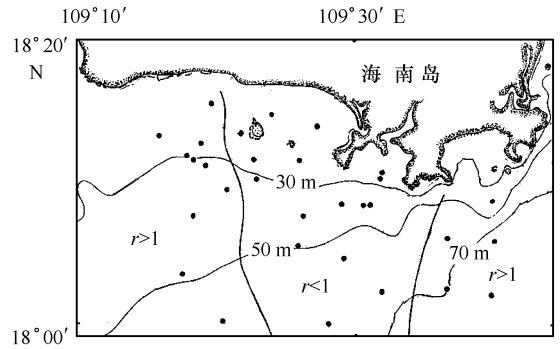


图 3 海湾内外海底高、低声速沉积物的分界和大致的分布
图中的黑圆点是沉积物柱状样的取样位置

表 1 给出的是海湾内外 31 个站位海底高、低声速沉积物的声速比、反射系数和海底反射损失的最大值、最小值和平均值. 就平均值而言, 高声速的沉积物的海底反射损失要小于低声速沉积物的, 这说明高声速海底的水声传播条件要优于低声速海底的.

表 1 海湾内外高、低声速沉积物若干声学参数

海底分类	数值分类	r	r_R	l_b /dB
高声速的 沉积物	最大值	1.108	0.314	11.825
	最小值	1.005	0.259	10.067
	平均值	1.055	0.278	11.133
低声速的 沉积物	最大值	0.998	0.339	12.881
	最小值	0.971	0.227	9.332
	平均值	0.988	0.251	12.016

海区大陆架海底的沉积物基本上具有高声速的性质, 在个别地点具低声速的性质. 2004 年冬季南海海洋声学试验航次的 5 个沉积物取样站位于海南岛南部偏西水深 100 m 以浅的大陆架海底, 沉积物样品共 5 段, 一共分成 12 节, 每节的长度约为 25 cm, 实测到的沉积物压缩波速为 1.585~ 1.648 km/s, 平均值为 1.618 km/s; 切变波速为 188~ 264

m/s, 平均值为 224 m/s. 在 04-N 站压缩波速为 1.617 km/s, 切变波速为 228 m/s; 在 04-W 站压缩波速为 1.600 km/s, 切变波速为 211 m/s; 在 04-L 站压缩波速为 1.636 km/s, 切变波速为 225 m/s; 在 04-M 站压缩波速为 1.621 km/s, 切变波速为 228 m/s; 在 04-E 站压缩波速为 1.596 km/s, 切变波速为 222 m/s.

2006年夏季出海航次中15个站位于海南岛南部 $108^{\circ}\sim 109^{\circ}5'E$,水深 $17\sim 102\text{ m}$ 的海湾和大陆架海底,样品平均长度约为 28 cm ,在实验室测到的15个站位的沉积物的压缩波速为 $1.474\sim 1.602\text{ km/s}$,在14个站位 100 kHz 换能器的声衰减(α)为 $35\sim 207\text{ dB/m}$,其中有1个站位的沉积物中有两块较大的贝壳,影响到声波的透射,没有测到声衰减值。

在鹿回头岭西南偏西水深 100 m 左右的大陆架海底,柱状取样站位有3个,分成10节,据分析基本上是黏土质粉砂,个别层位是黏土-砂质粉砂,表层为黄褐色黏土和青灰色粉砂,含水量大,可流动,20 cm以下以青灰色粉砂为主,较致密,含水量中等,可塑性较大。表层20 cm沉积物压缩波速比较低,分别是 $1.496, 1.515$ 和 1.520 km/s ,而每个站位的压缩波速的平均值分别为 $1.537, 1.549$ 和 1.580 km/s ;这里的沉积物的切变波速比海湾的要高一些,切变波速为 $304\sim 538\text{ m/s}$,平均值为 383

m/s 。

在锦母角东南水深 100 m 的大陆架海底布置了49个取样站位,实际取得37个沉积物柱状样,最长的有 32 m ,最短的为 0.8 m ,分成186节,根据37个站位的沉积物平均压缩波速结果和相应站位的底层海水声速的结果,可以分出高声速($r > 1$)和低声速($r < 1$)两类性质的海底沉积物,低声速性质的主要是黏土质粉砂或粉砂质黏土,实测到的沉积物压缩波速为 $1.514\sim 1.523\text{ km/s}$,平均值为 1.520 km/s ;切变波速为 $150\sim 202\text{ m/s}$,平均值为 188 m/s 。高声速性质的沉积物主要是细砂以及一部分无法取得柱状样品的粗砂-砾-珊瑚礁碎屑,实测到的沉积物的压缩波速为 $1.586\sim 1.673\text{ km/s}$,平均值为 1.622 km/s ;切变波速为 $156\sim 273\text{ km/s}$,平均值为 228 m/s 。由图4a和b的对比可以看出高、低声速区域与沉积物类型分布结果吻合得相当好,仅在低声速区域的一个角落上有一个站位的沉积物压缩波速与底层海水声速一样,可把它视为高声速。

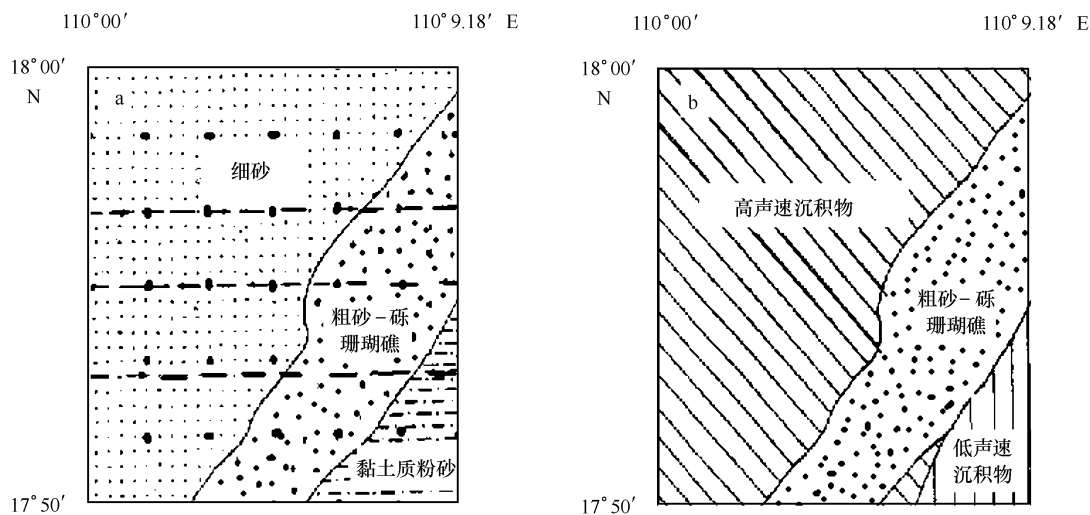


图4 大陆架海底沉积物取样站位的分布示意图和用声速比区分出来的两类海底沉积物的分布和界线

图中的黑圆点是沉积物柱状样的取样位置,虚线是浅地层及旁侧声呐扫测测线

在万宁以东外海大陆架水深 200 m 以浅的海底有A和B两个区域,在每个区域取5个柱状样。在A区水深 100 m 以浅,最浅的一个站位的水深是 82 m ,沉积物以砾、砂和粉砂为主,实际取样3个,实测到的沉积物压缩波速为 $1.563\sim 1.595\text{ km/s}$,平均值为 1.578 km/s ;B区水深为 200 m 左右,最

浅的一个站位的水深是 178 m ,沉积物以细砂、粉砂和黏土为主,有贝壳碎屑等,实际取样5个,实测到的沉积物压缩波速为 $1.516\sim 1.657\text{ km/s}$,平均值为 1.561 km/s 。表2给出的是万宁以东外海大陆架A和B两个区域海底沉积物的声速比、反射系数和海底反射损失的最大值、最小值和平均值。

表 2 万宁以东 A 和 B 区海底沉积物若干声学参数

海区分类	数值分类	r	r_R	I_b /dB
A 区	最大值	1.032	0.282	12.601
	最小值	1.015	0.235	11.060
	平均值	1.025	0.266	11.567
B 区	最大值	1.048	0.250	12.661
	最小值	0.994	0.235	12.111
	平均值	1.015	0.240	12.416

对大陆坡的具体分析研究的海区主要在海南岛外的西南大陆坡和万宁以东大陆坡(水深大于 200 m). 2006 年春季在海南岛西南水深 700~ 1 000 m 的大陆坡上, 先后在 10 个站位用箱式取样器进行取样, 样品长度平均为 0.4 m. 海底沉积物最表层 10~ 18 cm 是可流动的黄褐色淤泥, 以下是可塑性很大的青灰色黏性土. 样品的声学测量是在调查船上的实验室里进行的, 10 个站位的沉积物压缩波速为 1.453~ 1.565 km/s, 平均值为 1.522 m/s; 6 个站位的沉积物的 100 kHz 的声衰减为 200~ 260 dB/m, 声衰减是由下式得出的^[1]:

$$\alpha = 20 \lg(A_2/A_1) / (L_2 - L_1),$$

式中, A_1, A_2 分别为声压振幅(μPa); L_2, L_1 分别为不等的固定测量间距(m).

100 kHz 在海底沉积物的声衰减变化范围与钱正明^[2]所报道的台湾岛东南海域海底沉积物声衰减数据颇为接近. 钱正明报道 200 kHz 在海底沉积物的声衰减仅出现在子溪河, 而在后龙河和浊水溪河口一带高于 300 dB/m, 压缩波速变化范围为 1.489~ 1.838 km/s. 对台湾岛东南台东外海取样分析得出砂质沉积物的压缩波速为 1.610 km/s 以上, 而泥质沉积物的压缩波速为 1.500~ 1.650 km/s, 个别站位的声衰减为 380 dB/m. 另外, 对台湾岛东北和平外海海底沉积物进行了声学物理性质分析研究, 得出压缩波速为 1.523~ 1.611 km/s, 切变波速为 135~ 500 m/s, 声衰减为 192~ 426 dB/m.

在海南岛万宁以东外海大陆坡水深 350~ 400 m 的海底有 4 个取样站位, 柱状样长度为 0.7~ 1.1 m, 沉积物以青灰色的粉砂为主, 沉积物压缩波速为 1.442~ 1.536 km/s, 平均值为 1.510 km/s, 低于海水的声速, 海底反射损失为 13.4~ 15.6 dB.

在大约 1.5~ 1.6 m 的垂直分层的海底沉积物

中压缩波速随埋深的增加有三种不同的变化特征. 图 5 是 3 根柱状样的压缩波速随沉积物埋深的增加的变化曲线, 其中图 5a 是三亚湾内的站位, 水深为 27 m, 样品长度为 1.62 m, 最表层沉积物的压缩波速是 1.485 km/s, 在 1.62 m 处的沉积物的压缩波速是 1.550 km/s; 压缩波速基本上随埋深的增加而加大. 图 5b 是万宁以东大陆架的站位, 水深 101 m, 样品长度为 1.42 m, 最表层沉积物的压缩波速是 1.618 km/s, 1.42 m 处的沉积物的压缩波速是 1.485 km/s; 压缩波速基本上随埋深的增加而减小. 图 5c 是陵水东南大陆架的站位, 水深 107 m, 样品长度为 1.52 m, 最表层沉积物的压缩波速是 1.560 km/s, 1.52 m 处的沉积物的压缩波速是 1.550 km/s; 在 65~ 115 cm 埋深有三个测量结果: 1.510, 1.512 和 1.500 km/s, 它们明显低于上层和下层沉积物的压缩波速, 这表明有一个厚度约 50 cm 的低声速夹层. 上述结果反映了海区海底沉积物的声速结构的小尺度特征. 周志愚等^[3]用反射法和折射法在南海 12 个测点进行了海底沉积物的声速测量, 指出在南海海底表层普遍有低声速, 比海水声速低 10~ 20 m/s, 并给出了海底沉积物的声速结构的中尺度特征.

4 海底沉积物的物理参数与声速的关系

对海南岛东南外海海底沉积物进行物理分析研究的参数有粒度(Md)、密度(ρ)、含水量(w)、孔隙度(n)、抗压强度(q_u)等, 这些参数的分析测量和沉积物命名均是按照国家标准和有关规范来进行的^[4,5]. 海湾内外的海底沉积物的组成主要是石英和长石碎屑以及钙质生物骨屑, 沿岸和岛屿周边的海底沉积物颗粒较粗, 主要为中-粗砂, 甚至有砾级沉积物. 从分析结果看, 可以划分出 7 种沉积物类

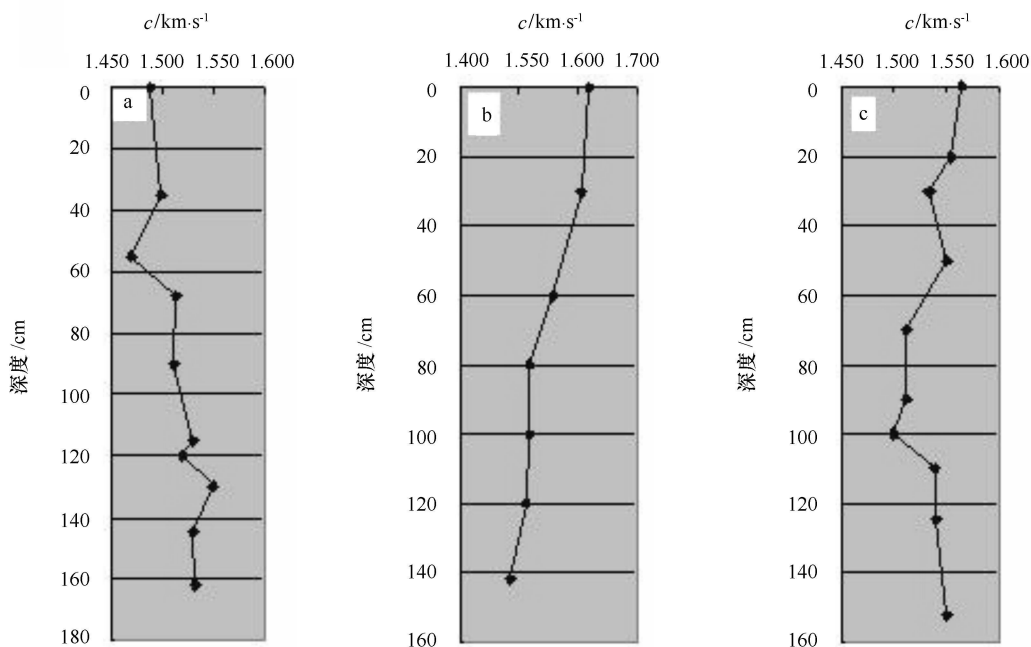


图5 海底沉积物柱状样的压缩波速随沉积物埋深的增加而变化的曲线

型: 细砂、粉砂、粉砂质砂、黏土质砂、砂质粉砂、黏土质粉砂和粉砂质黏土。在水深 30 m 以外海底基本上是由未充分固结的晚更新世以来疏松饱和的沉积物, 从 ^{14}C 年龄分析结果看沉积物的平均沉积速率为 0.48 mm/a , 因此最大厚度在 20 m 的疏松饱和的沉积物全部为末次冰期以来的产物。在水深 60 m 以外的海底基本上以细砂质的沉积物为主。在水深 200 m 以外的大陆坡海底基本上是粉砂质和黏土质沉积物混合组成的分布格局。

Hamilton^[6]、Anderson^[7] 曾广泛地研究过世界大洋海底沉积物各项物理性质对声速的影响, 他们认为除了孔隙度以外没有比较满意的结果。周志愚和孟金生^[8]、卢博^[9] 和卢博等^[10, 11] 得出的基于孔隙度经验公式与实测声速之间还有不呈线性关系的较大差异。周志愚和孟金生^[8] 及唐永禄^[12] 在其经验公式中加入底层海水声速作为一个修正项。预报海底沉积物声速的经验方程很多, 它们都是基于有局限性的单参数模型而试图通过某两个能够揭示海底沉积物综合特性的物理参数与声速的关系, 从而建立的模型更具有物理意义。从沉积物物理力学的意义中看出, 含水量是表述沉积物中两相物质质量比的参数, 孔隙度是表述沉积物中水的体积含量的参数。含水量能够体现出沉积物中相对密度的情况, 含水量高则骨架物质的相对密度小, 含水量低则骨架物

质的相对密度大; 孔隙度体现沉积物的密实程度, 也就是颗粒骨架的疏松程度, 对于同一种物质, 越致密的物质声速就越高。本文基于这一点通过最小二乘法的回归分析建立了适用于本海区的经验方程:

$$c_p = 288.4 + 103.17n - 1.77n^2 - 2327.95e - 510.99e^2 + 66.49ne,$$

$$r = 0.84,$$

式中, n 是沉积物孔隙度 (%); e 是沉积物的孔隙比; r 是复相关系数, 在 0.01 的水平下显著。该式适用于海南岛东南外海海底沉积物压缩波速的预报。

表 3 给出的是海南岛东南外海海底沉积物物理力学参数中的密度、含水量、孔隙度、抗压强度、颗粒粒径的最大值、最小值和平均值; 表中分三种水深类型: 在水深 50 m 以浅的近岸和海湾取样站位有 21 个; 在水深 50~200 m 的大陆架取样站位有 70 个; 在水深 200~1000 m 的大陆坡取样站位有 14 个。表中所给出的数据包括了多年来的箱式样和柱状样的各个分层实测结果。就平均值而言, 在水深 50 m 以浅的近岸和海湾海底沉积物的密度较大, 在水深 200~1000 m 的大陆坡海底沉积物的密度较小; 在水深 50 m 以浅的近岸和海湾海底沉积物的含水量较小, 在水深 200~1000 m 的大陆坡海底沉积物的含水量较大; 在水深 50 m 以浅的近岸和海湾海底沉积物的孔隙度较小, 在水深 200~1000 m 的大陆

坡海底沉积物的孔隙度较大;在水深 50~200 m 的大陆架海底沉积物的抗压强度较大,在水深 200~1 000 m 的大陆坡海底沉积物的抗压强度较小;在水深 30~200 m 的大陆架以浅海底沉积物的颗粒粒

径较大,在水深 200~1 000 m 的大陆坡海底沉积物的颗粒粒径较小.最大值和最小值之间的数据经过所建立的预报计算海底沉积物的压缩波速经验方程最小二乘法的回归分析处理.

表 3 海底沉积物若干物理力学参数的最大值、最小值和平均值

海区分类	数值分类	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$w (\%)$	$n (\%)$	q_u / kPa	Md / mm
50 m 以浅	最大值	2.030	80.80	81.28	10.6	0.882
	最小值	1.655	52.51	42.25	2.7	0.038
	平均值	1.789	58.78	62.26	5.5	0.089
大陆架	最大值	1.648	98.79	77.35	12.1	0.982
	最小值	1.414	44.76	44.77	4.1	0.022
	平均值	1.565	76.66	63.40	7.4	0.112
大陆坡	最大值	1.548	142.90	88.33	6.6	0.084
	最小值	1.434	66.55	66.88	1.8	0.002
	平均值	1.515	88.40	70.21	4.6	0.050

5 海底沉积物的弹性参数

求解海底沉积物的弹性参数有两种方法:静态的等温模量测试法和动态的绝热模量算法.本文使用动态的方法,通过直接测量海底沉积物的压缩波速、切变波速和沉积物的密度等,然后用计算公式求解其他的弹性参数.声速测量采用透射法,发射和接收换能器紧贴在沉积物样品的两端,测得声波在样品中的走时(t)和用游标卡尺测量出的样品长度(l),用公式 $c = l/t$ 来计算得出声速(c).显而易见,这种方法的好处是可重复,同时可得到一个样品中多个海底沉积物的弹性参数.

物体中声传播是一绝热过程,利用声学测量方法得到的沉积物弹性参数被称为绝热弹性模量,亦称为动力学弹性模量.第一种方法用压缩、拉伸、弯曲、剪切测得的等温弹性模量被称为静力学弹性模量,它与绝热弹性模量可以换算,它们之间相差一个系数(用转换函数得出),其关系式大致为 $E_{ms} = 0.005 E_{md}^2$,式中 E_{ms} 和 E_{md} 分别为静、动力学弹性模量.由于海底沉积物并非完全的理想弹性体,特别是沉积物中的饱和水受压缩性和流变性的影响,沉积物的压缩波速和切变波速都很低,一般只有岩石的 1/3 或 1/2.较早研究海底沉积物弹性性质的 Hamilton^[13] 推导出用压缩波速和沉积物密度来求解弹性参数,但是由他的公式不能直接得出体积

弹性模量,只能用沉积物的孔隙度与体积弹性模量之间的经验关系来估算.梁元博和卢博^[14] 用这些公式计算了南海北部大陆架和大陆坡海底沉积物的弹性性质.卢博^[15] 给出了岩石的 6 个弹性参数的计算公式:

$$\text{体积弹性模量} (\text{GN/m}^2) K = \rho (c_p^2 - 4/3c_s^2);$$

$$\text{压缩系数} \beta = \kappa^{-1};$$

$$\text{拉梅常数} \lambda = \frac{3K(3K - E)}{9K - E};$$

$$\text{切变模量} (\text{GN/m}^2) G = 3/2(\kappa - \lambda);$$

$$\text{泊松比} \sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)};$$

$$\text{弹性模量} (\text{GN/m}^2) E = [\lambda(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)] / \sigma$$

上述 6 个沉积物的弹性参数的物理含义和应用意义请看文献[16].卢博等^[16] 用这些公式求解南海南部 100 多个站位海底沉积物的弹性参数.

卢博等^[16] 公式要求被测的沉积物样品同时要有压缩波速和沉积物的密度数据,本文所报道的海南岛东南南海 90 多个取样站位海底沉积物的声学 and 物理参数测量结果满足了卢博等^[16] 公式计算动力学弹性参数的要求.对比分析了 Hamilton 公式和卢博等^[16] 公式,两者在数值上并没有很大的差别.研究海底沉积物弹性性质的目的是为了了解海洋工程的地基稳定性、沉降计算等的需要,同时研究海区海底声学特性和建立海底地声模型的基础研究中也需加入海底沉积物的弹性参数.在深入研究海底沉

积物声学特性与物理力学之间的关系时常采用应力-应变分析, 在一般的应力-应变分析中需要引用弹性参数, 如弹性模量、切变模量、泊松比等。因此, 对海南岛东南外海海域海底沉积物弹性参数的分析研究有着广泛的应用意义。

表 4 给出了海南岛东南外海三个地文单元的海

底沉积物的 6 个弹性参数, 其中弹性模量变化为 $0.222 \sim 1.934 \text{ GN/m}^2$, 体积弹性模量的变化为 $2.767 \sim 4.096 \text{ GN/m}^2$, 压缩系数的变化为 $0.517 \sim 0.421$, 泊松比的变化为 $0.421 \sim 0.487$, 切变模量的变化为 $0.077 \sim 0.680 \text{ GN/m}^2$, 拉梅常数的变化为 $2.659 \sim 3.648$

表 4 海底沉积物 6 个弹性参数最大值、最小值和平均值

海区分类	数值分类	$E/\text{GN} \cdot \text{m}^{-2}$	$K/\text{GN} \cdot \text{m}^{-2}$	β	σ	$G/\text{GN} \cdot \text{m}^{-2}$	λ
50 m 以浅	最大值	1.934	4.096	4.386	0.487	0.680	3.642
	最小值	0.228	2.939	0.517	0.421	0.077	2.888
	平均值	1.248	3.781	2.266	0.461	0.289	3.039
大陆架	最大值	1.699	4.044	2.144	0.474	0.594	3.648
	最小值	0.466	2.961	0.589	0.430	0.158	2.856
	平均值	1.325	3.616	2.301	0.459	0.277	3.022
大陆坡	最大值	0.507	3.562	2.111	0.476	0.172	3.448
	最小值	0.473	2.767	1.973	0.471	0.161	2.659
	平均值	0.499	3.028	2.001	0.474	0.168	3.012

6 结语

通过本文的初步分析研究发现, 海南岛东南外海海底沉积物及其声学物理性质有如下基本特点: 海底沉积物类型多样且复杂, 从黏土级到砂砾级有近 10 个颗粒组分组; 海底沉积物的声学物理参数之间有着密切的相关关系, 通过多元线性回归方法建立的经验公式, 可以利用沉积物的孔隙度和孔隙比来预报海底沉积物的压缩波速, 海底沉积物物理

力学参数变化范围较大; 在不同的海区内有高、低声速两类性质的沉积物分布, 高声速海底的声传播条件要优于低声速的海底。就三个地文单元的平均值而言, 海底沉积物的 6 个弹性性质参数中弹性模量的差别较大, 其余的 5 个参数的差别不明显。海底沉积物的声学物理性质作为沉积层的边界条件, 对于建立海底地声模型、波动方程、海洋声场研究和海洋工程地质研究等都具有十分重要的科学意义。

参考文献:

- [1] GB 12763.5-91, 海洋调查规范——海洋声、光要素调查[S].
- [2] 钱正明. 台湾东南外海海底沉积物物理、土力学和声学特性研究[D]. 台北: 台湾大学, 1989
- [3] 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
- [4] GB/T 13909-92, 海洋调查规范——海洋地质地球物理调查[S].
- [5] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S].
- [6] HAMILTON E L. Geoacoustic modeling of the sea floor[J]. J Acoust Soc Am, 1980, 68: 1313- 1340
- [7] ANDERSON R S. Statistical correlation of physical properties and sound velocity in sediments[A]. Physical of Sound in Marine Sediment [C]. NY: Plenum Press, 1974 481- 518
- [8] 周志愚, 孟金生. 由爆炸声反射波遥测海底表面稀薄层的某些参数[J]. 热带海洋, 1985, 4(2): 38- 43
- [9] 卢 博. 海底浅层介质切变波的初步研究[J]. 热带海洋学报, 2004, 26(3): 11- 18
- [10] 卢 博, 李赶先, 黄韶健, 等. 南海北部大陆架海底沉积物物理性质研究[J]. 海洋工程, 2004, 25(3): 48- 55
- [11] 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.
- [12] 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
- [13] HAMILTON E L. 深海沉积物性质的预报: 发展现状[A]. 深海沉积物——物理及工程性质[C]. 梁元博, 卢 博译. 北京: 海洋出版社,

1981. 1- 30

- [14] 梁元博, 卢博. 某海区陆架低声速底质的声学物理参数[J]. 热带海洋, 1983, 2(3): 1- 9
- [15] ' . 岩石和矿物的物理性质[M]. 蒋宏耀译. 北京: 科学出版社, 1985. 63- 92
- [16] 卢博, 李赶先, 张福生, 等. 南海南部海域海底沉积物弹性性质及其分布[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(3): 47- 54

A study on seafloor sediment and its acousto-physical properties in the southeast offshore sea area of Hainan Island in China

LU Bo¹, LI Gan-xian¹, LIU Qiang¹, HUANG Shao-jian², ZHANG Fu-sheng²

(1 Key Laboratory of Marginal Sea Geology of Chinese Academy of Sciences, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2 South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Abstract: Acousto-physical properties of seafloor sediments in the southeast offshore sea area of Hainan Island at the northern continental shelf of South China Sea are analyzed. In many cruises CTD measurements of seawater, measurements of shallow stratum and side-scan sonar have been made. Acoustic parameters, basic sedimentary parameters, physico-mechanical parameters and ¹⁴C age, etc. have been measured. Sediment elastic parameters, including Young's modulus, bulk modulus, constrained modulus, rigidity modulus, Poisson's ratio, Lame's constant, etc., have been calculated. Results show that the compression wave velocity of the seafloor sediment in the sea area ranges from 1.474 to 1.700 km/s, and there are high and low sound velocity sediment types in the different sea areas; the shear wave velocity is 150~ 600 m/s; at 100 kHz the sediment sound attenuation is 35~ 260 dB/m, the sediment density is 1.4~ 2.0 g/cm³; the sediment porosity is 42%~ 88%. Sound field parameters and describing sound reciprocity between sea and seafloor are described.

Key words: South China Sea; southeast offshore of Hainan Island in China; seafloor sediment; acoustic parameters; acousto-physical properties