

# 声学地层剖面探测技术在金州湾人工岛场址勘察中的应用\*

王方旗 吴永亭 刘乐军 胡光海 董立峰 陶常飞

(国家海洋局第一海洋研究所青岛海洋工程勘察设计研究院 青岛 266061)

**摘要** 声学地层剖面探测是一种基于声学原理的连续走航式探测水下地层结构和构造的地球物理方法,由于其灵敏度和分辨率高、连续性好且能高效地探测水下地层的地质特征及其分布而在海洋工程勘察中得到了广泛应用。拟在渤海金州湾海域内建造一座人工岛,场址沉积的地层是自晚更新世以来伴随着海平面升降和海侵海退过程而逐渐形成的,自上而下依次为:浅海相淤泥或淤泥质粉质黏土、滨海相淤泥、陆相黏土、滨海相粉质黏土、海陆交互相黏土和粉质黏土。通过对典型声学地层剖面的综合分析和解释,识别出了8个连续的强声学反射界面,主要划定了具有沉积环境意义的6个声学层序,查明了“现代沉积层”的厚度分布和基岩面埋深状况等;并与工程地质钻孔的沉积地层岩性单元对比研究,发现依据声学地层剖面进行的地层划分与钻孔岩芯的地质地层划分有较好的对应关系,由此确定并推断了地层的沉积相。

**关键词** 声学地层剖面 反射界面 沉积层序 渤海金州湾

中图分类号:P631.5 文献标识码:A

## APPLICATION OF ACOUSTIC SUBBOTTOM PROFILING TECHNOLOGY TO PROSPECT THE SITE OF ARTIFICIAL ISLAND IN JINZHOU BAY

WANG Fangqi WU Yongting LIU Lejun HU Guanghai DONG Lifeng TAO Changfei

(Qingdao Marine Engineering Prospecting & Design Institute, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061)

**Abstract** The acoustic subbottom profiling technology is a geophysical method based on acoustical principle to continuously detect underwater stratigraphic structure and tectonics. Because of its high sensitivity, resolution, continuity and the ability of efficiently detecting the characteristics and distributions of underwater geological formations, it has been widely used in marine engineering prospect. An artificial island will be built in the Jinzhou Bay, Bohai Sea, where the sedimentary are gradually formed with the eustatism and transgression or retreat process since late Pleistocene. From top to bottom, the soilstrata are as follows: neritic facies silt or silty clay, littoral facies silt, continental facies clay, littoral facies silty clay, interbedded of marine and continental facies clay and silty clay. The typical acoustic subbottom profiles from Jinzhou Bay, Bohai Sea are analyzed and interpreted. Eight continuous strong acoustic reflection interfaces are recognized, and six acoustic sequences which have depositional environmental significance are confirmed. The thickness distribution of modern sedimentary and the depth distribution of bedrock are analyzed. According to the comparative study with the sedimentary stratigraphic and lithologic units of the

\* 收稿日期: 2012-05-20; 收到修改稿日期: 2012-06-27.

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201005005) 和国家海洋公益性行业科研专项(201005010-01).

第一作者简介: 王方旗, 主要从事海洋地球物理调查技术的研究及应用. Email: sdhdfq0317@fio.org.cn

engineering geological drillings, there is a good correspondence between the acoustic sequences confirmed by the subbottom profile and the geological strata of the drilling core. Therefore, the depositional environment is also deduced.

**Key words** Acoustic subbottom profile, Reflection interface, Depositional sequence, Jinzhou Bay, Bohai Sea

## 1 引言

声学地层剖面探测是一种基于声学原理的连续走航式探测水下地层结构和构造的地球物理方法。随着近海油气资源的大规模开发、国土资源大调查项目的展开、各种近岸和海洋工程建设的不断增加以及各种海底灾害地质现象的频繁发生,声学地层剖面仪以其灵敏度和分辨率高<sup>[1]</sup>,连续性好且能快速地探测水下地层的地质特征及其分布而在海洋调查中得到了广泛的应用,其应用范围涉及到海洋工程勘察、海洋灾害地质调查和海洋地质科学研究等诸多领域<sup>[2~9]</sup>。

声学地层剖面探测技术在海洋调查中所能解决的工程地质问题主要有如下几个:弄清第四系覆盖层的厚度及分布状况,查明基岩面的埋深及展布规律,弄清浅层断裂构造的存在与否及其分布,查明海底障碍物的分布情况(如铁锚、抛石、海底沉船等),了解海洋灾害地质情况(如埋藏古河道、浅层气、浅部断层、海底滑坡等),等等,从而能为海底管线开挖及铺设、码头、电站、桥梁、人工岛等工程的建设提供详尽的地质资料。

## 2 研究区地理位置

金州湾海域大致呈东南—西北走向,湾口朝西北敞向渤海。该湾为沙砾质基岩海岸上的一个原生湾,海岸线总长约 65.7km,海湾面积约为 342km<sup>2</sup>,湾东部滩涂面积为 17km<sup>2</sup>,湾口礁岛面积 4.2km<sup>2</sup>。为加速大连金州湾海域的开发利用,拟在该海域内建造一座人工岛,用于修建新飞机场。项目场址位于金州湾海域,大连市甘井子区大连湾街道毛茔子村养殖场的西北侧的海域,距岸约 4.8km,涉海范围地理坐标为:北纬 39°05′~39°10′,东经 121°33′~121°39′(图 1)。

为了弄清工程项目涉海范围内的工程地质条件,在结合工程地质钻探的基础上,开展了大范围的声学地层剖面探测,以便能全面的分析岩土层分布特征,查明基岩面的埋深及变化情况、了解第四系沉

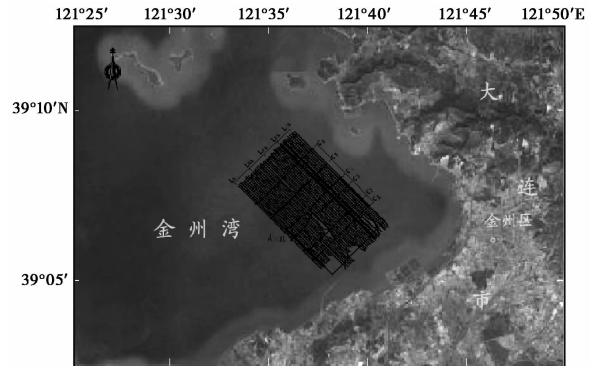


图 1 研究区地理位置及声学地层剖面测线布设

Fig. 1 Locations of the study area and layout of surveying lines

积层的厚度和形态特征等,为人工岛工程设计及施工提供详细可靠的地质资料。

## 3 材料与方法

国家海洋局第一海洋研究所采用美国 Trimble 公司的 212H 双信标 DGPS,定位精度优于 1m。声学地层剖面探测采用英国 AAE 公司研制的 CSP-D 2200 地层剖面系统,由震源、水听器、采集及显示系统三部分组成(图 1)。

**震源:**采用 SQUID 2000 电火花震源,输出电压:2500~4000V,DC;发射功率:300~2000 焦耳(多级可选);充电速度:1500J·s<sup>-1</sup>;电容:240μf。

**水听器:**采用荷兰 GEO-RESOURCE 公司生产的 GEO-SENSE/24 单道接收电缆,接收段长度约 5m,由 24 个高灵敏度陶瓷压电水听器组合,组合间距为 0.2m。

**采集及显示系统:**采用香港 C-Products 公司研制开发的 C-View 1.531 浅地层剖面采集和处理系统,可进行全频率自动采集,具有实时地 AGC、TVG、低通及高通滤波、海底追踪等功能,数据处理时具有定位坐标偏移归位、可控速回放剖面、屏幕数字化解译等功能。

海上作业时采用的工作参数为:激发间隔 750ms,激发能量 500J,记录深度 200ms,滤波为 0.1~5kHz,每间隔 100m 定 mark 号,调查船航速控制

在 4 Knot 左右。

## 4 资料处理与解释

声学地层剖面探测最主要的目的就是确定海底沉积地层中不同岩性土层之间的分界面(在声学剖面上称为反射界面)。因此,准确识别和追踪这些分界面并精确地将其转化为以海底起算的埋藏深度(时深转换)是进行资料处理和解释的关键问题。影响时深转换精度的因素主要有两个:浅水区发收分置导致的浅部地层厚度畸变<sup>[10, 11]</sup>和地层中声速的选取<sup>[12, 13]</sup>。本次调查声学地层剖面仪发射换能器与水听器之间水平距离为 7.2m,而测区内水深为 5~7m,因此需对浅部地层厚度进行校正。在进行时深转换时,50m 以浅地层平均声速采用 1600 m·s<sup>-1</sup>,50m 以深地层平均声速采用 1800m·s<sup>-1</sup>,声学反射界面与钻孔资料能够较好的对应。

### 4.1 声学反射界面特征及地层划分

声学记录剖面的地层划分依据地震剖面层序划分的基本原则进行,空间上从点到线、由线及面的依次展布。声学地层剖面解释是根据沉积物的岩性变化,即沉积物密度、含水性、含气程度及沉积层构造、层面特征、沉积层延伸与错断及侵蚀构造等形成的

反射波记录进行的。通过对声学剖面反射波的振幅、频率、相位、连续性、反射结构、几何形态的组合关系(上超、下超、削截和顶超等)等特征,对相位特点的区分及稳定强相位的追踪,是获得地层分界面的有效方法。对波组形态特征变化的解释也是十分重要的内容,是判别和划分不同时期的侵蚀面和沉积层内部构造,从而推断沉积相和沉积环境的主要依据<sup>[2, 14]</sup>。

#### 4.1.1 声学反射界面特征

根据对声学地层剖面的分析和解译,通过相位、波形特征、振幅和连续性等对比,研究区内海底面以下至声学剖面记录的有效范围内共确定了 8 个连续的强声学反射界面(T<sub>0</sub>、T<sub>1</sub><sup>1</sup>、T<sub>1</sub><sup>2</sup>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>5</sub><sup>1</sup>、T<sub>5</sub><sup>2</sup>)它们的详细特征见表 1。依据这 8 个反射界面可将声学地层剖面划分为 6 个层序(A、B、C、D、E、F)和 4 个亚层序(A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>)。

#### 4.1.2 声学地层划分及与钻孔的对比

本文以典型测线 L<sub>3</sub> 的声学剖面为例,与工程地质钻孔 A<sub>23</sub>(39°6.45' N, 121°35.29' E)的岩性资料(图 2)进行对比,对各个声学层序的特征进行描述并确定其岩性,推断其沉积相。图 3 为测线 L<sub>3</sub> 的声学地层剖面及其解释(下图为原始声学剖面,上图为解释图)。L<sub>3</sub> 测线总长约 5.3km,方向为西北—东南向(135°),水深在 3.7~5.4m 之间,本条测线

表 1 声学反射界面及其特征

Table 1 Acoustic reflection interfaces and their characteristics

反射界面	特征描述
T <sub>0</sub>	海底反射界面,即海水与海底地层的分界面,以强振幅、高能量、高连续性为特征。整个研究区内海底反射界面基本光滑平整,向海方向缓缓倾斜,其反射形态反映了海底地形的变化情况。
T <sub>1</sub> <sup>1</sup>	次一级强反射界面,中-强振幅,连续性好,呈水平状或近于水平,与海底反射界面(T <sub>0</sub> )基本平行,可在全区内连续追踪,界面埋深在 4.0~5.3m 之间。
T <sub>1</sub> <sup>2</sup>	是一个强反射上超面,强振幅、高能量、高连续性,由西北向东南方向被逐层上超。全区内该反射界面基本平滑,无大的起伏,可追踪性强,埋深在 8.1~16.8m 之间。
T <sub>2</sub>	是一个较强反射的侵蚀界面,遍布全区,能量强弱变化明显,中-弱连续性,但可以连续追踪,界面大多较平滑,但局部对下伏地层的侵蚀削截较大,表现为局部的起伏形态,埋深在 9.2~18.9m 之间。
T <sub>3</sub>	也是一个较强反射的侵蚀界面,在研究区的大部分地区都有分布,局部缺失,向西北角方向尖灭于 T <sub>2</sub> 。界面在大部分地区可追踪性强,但局部地区反射弱,不易识别;总体较为平滑,局部对下伏地层有较大范围的沟谷状侵蚀下切(下切最深者约为 4m),T <sub>3</sub> 界面埋深在 12.5~19.6m 之间。
T <sub>4</sub>	也是一个较强反射的侵蚀界面,反射能量比较强,但由于沉积物岩性的变化致使反射能量并不均匀,各地不一。该界面在研究区的大部分地区广泛分布,连续性良好,可追踪性强,局部因被侵蚀而有缺失,埋深在 14.3~25.6m 之间。
T <sub>5</sub> <sup>1</sup>	强风化基岩反射界面,是一个极强反射的界面,区内广泛分布,易于连续追踪;界面起伏很大,反射界面的起伏反映了基岩界面的埋藏状况和起伏形态,识别该界面最显著的特征是:界面上下的层序反射波组结构形态完全不同,该界面埋深在 28.2~56.6m 之间。
T <sub>5</sub> <sup>2</sup>	中风化基岩反射界面,在研究区内广泛分布,反射能量较弱,时有时无,呈断线状,但可分辨、追踪。该界面埋深在 31.2~86.8m 之间。

层号	层底埋深 /m	厚度 /m	颜色	土层命名	钻孔柱状图	声学地层	沉积相		
①	5.9	5.9	灰褐色 深灰色	淤泥		A <sub>1</sub>	A 浅海相		
②	11.1	5.2	灰褐色	淤泥质粉质黏土		A <sub>2</sub>			
③	14.3	3.2	灰褐色	淤泥		B	滨海相		
④	17.9	3.6	灰黄色	黏土		C	河湖冲积、洪积相		
⑤	21.3	3.4	灰褐色	粉质黏土		D	滨海相		
⑥	26.5	5.2	灰褐色	黏土		E	可能为海相与陆相 的复合沉积层, 难以 准确识别		
⑦	37.0	10.5	黄褐色 灰褐色	粉质黏土					
⑧	43.0	6.0	灰褐色	黏土					
⑨	53.7	10.7	黄褐色	粉质黏土					
⑩	56.0	2.3	黄褐色	黏土					
⑪	64.3	8.3	黄褐色	粉质黏土					
⑫	66.3	2.0	黄褐色	黏土					
⑬	71.6	5.3	黄褐色	粉质黏土					
⑭	78.1	6.5	灰绿色 棕褐色	强风化辉绿岩				F <sub>1</sub>	F 基岩
⑮	81.2	未揭穿	灰色	中风化板岩				F <sub>2</sub>	

图2 A<sub>23</sub>钻孔岩性柱状图Fig. 2 Lithologic column of core A<sub>23</sub>

穿过工程地质钻孔 A<sub>23</sub>孔。

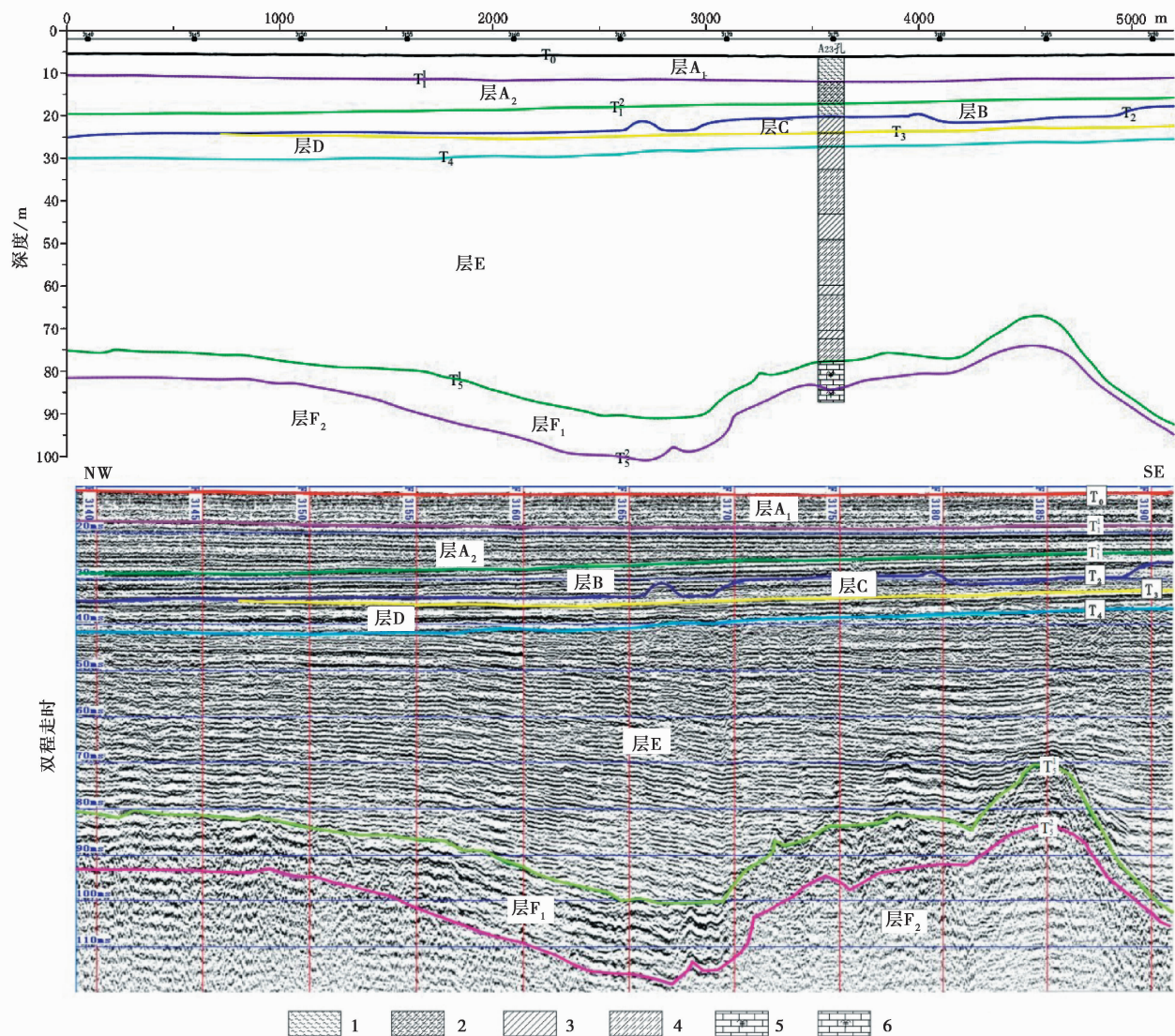
#### 4.1.2.1 层序 A

层序 A 为反射界面 T<sub>0</sub> 和 T<sub>1</sub><sup>2</sup> 之间的地层, 是全新世海侵开始以来逐渐沉积的地层, 属浅海相、滨海相沉积层, 目前仍在接受沉积, 一般称为“现代沉积层”<sup>[15, 16]</sup>。研究区内 A 层厚度分布规律明显, 从西北方向到东南方向由厚逐渐变薄, 地层厚度值在 8.1 ~ 16.8m 之间。层序 A 可根据层内反射波组形态特征的变化进一步划分为亚层 A<sub>1</sub> 和亚层 A<sub>2</sub>。

亚层 A<sub>1</sub>: 反射界面 T<sub>0</sub> 和 T<sub>1</sub><sup>1</sup> 之间的地层, 是研究区内最年轻的地层, 推断为海侵至最大海泛面以后的高水位体系域所沉积的地层, 属浅海相沉积层。该层序组外形呈席状或板状, 层间反射能量很弱, 依稀可辨, 平行结构, 底界面连续、平直, 基本无起伏变化, 向西北方向略微倾斜, 与下伏地层呈平行整合接触关系。测区内 A<sub>1</sub> 层厚度分布均匀、稳定, 在 4.0 ~ 5.3m 之间, 变化很小, 表明区内现代沉积速度比

较一致。根据工程地质钻孔资料, 本亚层对应第①层, 为灰褐色、深灰色的淤泥, 有腥臭味, 流塑-软塑, 饱和, 土质较均匀, 含少量有机质, 偶见贝壳碎片及粉砂团块, 局部夹淤泥质黏土或淤泥质粉质黏土。

亚层 A<sub>2</sub>: 反射界面 T<sub>1</sub><sup>1</sup> 和 T<sub>1</sub><sup>2</sup> 之间的地层, 推断为末次冰期冰后期海侵开始以来至到达最大海泛面期间海侵体系域沉积的地层, 属浅海相、滨海相沉积层。该层序组外形在倾向上为楔状, 在走向上呈席状, 层间反射能量较强, 基本平行于海底, 逆下伏地层界面终止尖灭, 表明在水域不断扩大的情况下逐层超覆的沉积现象, 也就是逐层上超, 与下伏地层呈角度不整合接触关系。研究区内 A<sub>2</sub> 层厚度分布规律较为明显, 从西北方向到东南方向由厚逐渐变薄, 厚度值在 4.0 ~ 12.5m 之间。根据工程地质钻孔资料, 本亚层对应第②层, 为灰褐色的淤泥质粉质黏土, 软塑, 饱和, 土质均匀, 偶见贝壳碎片及粉砂团块, 局部夹淤泥或淤泥质黏土。

图3 典型声学地层剖面及解释(测线  $L_3$ )Fig. 3 Typical acoustic subbottom profile and its interpretation( $L_3$ )

1. 淤泥;2. 淤泥质粉质黏土;3. 黏土;4. 粉质黏土;5. 强风化基岩;6. 中风化基岩

#### 4.1.2.2 层序 B

层序 B 为反射界面  $T_1^1$  和  $T_2$  之间的地层,与上覆地层呈角度不整合接触关系,属滨海相沉积层。主要标志是其内部反射结构与下伏的声学反射地层单元明显不同,且伴有特定的赋存边界及外部形态,层间反射能量较强,前积反射结构,层序顶部同相轴连续、清晰,空间延展范围大,层序底部受到原有地形的影响同相轴有侵蚀错断,不连续;与下伏地层呈角度不整合接触关系,局部地区下切较深。研究区内 B 层厚度变化很大,在 1.4 ~ 5.9m 之间,厚度分布依赖于层序下边界的起伏和延伸状态。根据工程地质钻孔资料,本层对应第③层,为灰褐色的淤泥,流塑状态,饱和,土质均匀,偶见贝壳碎片及粉砂

团块,局部夹淤泥质黏土或淤泥质粉质黏土。

#### 4.1.2.3 层序 C

层序 C 为反射界面  $T_2$  和  $T_3$  之间的地层,与上覆地层呈角度不整合接触关系,属河湖冲积、洪积相沉积层。内部反射杂乱,不连续、不平行、无次序排列,反映了高能环境下的沉积作用;局部赋存小范围的亚平行、弱反射波组,可能为局部古洼地或古河道的充填。与下伏地层呈角度不整合接触或假整合接触关系。C 层因遭受后期侵蚀而导致在区内厚度分布变化剧烈,局部地区缺失(西北角),该层厚度值在 0 ~ 5.5m 之间,平均约为 2.8m。根据工程地质钻孔资料,本层对应第④层,为灰褐色、灰黄色的黏土,稍湿,可塑-硬塑,切面光泽,土质均匀,含少



量铁质氧化物,偶见粉砂斑点。

#### 4.1.2.4 层序 D

层序 D 为反射界面  $T_3$  和  $T_4$  之间的地层,与上覆地层呈角度不整合或假整合接触关系,属滨海相沉积层。内部反射能量强,同相轴清晰、连续,延展长,呈向海方向倾斜的前积反射结构,局部由于沉积物岩性的变化使得同相轴变得略微模糊,反映了较低能环境下的沉积作用,与下伏地层呈角度不整合或假整合接触关系。研究区内 D 层厚度变化较大,在 0~6.1m 之间,平均约为 2.5m。根据工程地质钻孔资料,本层对应第⑤层,为灰褐色、灰绿色的粉质黏土,稍湿,可塑-硬塑状态,切面较光泽,干强度中,土质较均匀,含少量铁质氧化物,偶见贝壳碎片,偶见粉砂斑点或粉土团块。

#### 4.1.2.5 层序 E

层序 E 为反射界面  $T_4$  和  $T_5^1$  之间的地层,与上覆地层呈角度不整合或假整合接触关系该层应属滨海相、河湖冲积相和洪积相以及残积相、坡积相的复合沉积层,可能经历了几次海侵海退过程,沉积了相应的海陆相沉积层,并且在不同时期分别遭受剥蚀,因缺乏测年和有孔虫资料而难以详尽分析,列为一大层。该层内部总体反射能量较强,反射结构比较复杂,能够识别出的反射结构主要有几种:波状反射、丘状上超充填、发散状充填、杂乱反射等。该层与下伏地层呈角度不整合接触关系,在研究区内广泛分布,厚度变化较大,在 12.9~33.5m 之间。根据工程地质钻孔资料,本层与第⑥、⑦、⑧、⑨、⑩、⑪、⑫、⑬层对应,其岩性为黄褐色黏土和粉质黏土互层,湿,可塑-硬塑状态,切面较光泽,干强度中,土质较均匀,含少量铁质氧化物,偶见粉砂斑点。

#### 4.1.2.6 层序 F

层序 F 为反射界面  $T_5^1$  以下的地层,属基岩层,与上覆地层呈角度不整合接触关系。可进一步划分为亚层  $F_1$  和亚层  $F_2$ 。

亚层  $F_1$ : 反射界面  $T_5^1$  和  $T_5^2$  之间的地层,属强风化基岩层。层序内部反射以波状反射为主,反射能量从上往下至  $T_6$  反射界面逐渐变弱,反映了从上往下基岩风化程度逐渐变弱的趋势。该层在研究区内广泛分布,厚度分布受基岩风化程度的控制,变化范围较大,在 1.8~16.6m 之间。根据工程地质钻孔资料,本层与第⑭层对应,为灰绿色、棕褐色的强风化辉绿岩,辉绿结构,块状构造,主要成分为辉石、角闪石,原岩结构清晰,遇水软化崩解,节理裂隙很发

育,岩芯呈碎块状,一般粒径为 1~3cm,最大粒径为 5cm。

亚层  $F_2$ : 为中风化基岩,反射界面  $T_2$  5 以下的地层。根据工程地质钻孔资料,本层与第⑮层对应,为中风化灰岩,灰色,隐晶质结构,层状构造,主要成分以方解石为主,节理裂隙较发育,岩芯呈柱状,一般长度 10~20cm,最长 25cm,不易击碎,该层未穿透,为震旦系基岩。

## 4.2 结果及分析

渤海及环渤海平原是在第三纪基底构造的背景下形成和演化的,在第三纪时期,渤海及环渤海平原呈整体下降;到早更新世初期,周边山体继续上升,并遭受侵蚀剥蚀作用,平原进一步沉降,部分准平原开始解体,当时冀鲁平原与下辽河平原连在一起,为统一的平原,渤海尚不存在;到中更新世,新构造活动仍以垂直升降为主,平原迅速扩大,此时期内,曾有 1~2 次由世界洋面升高造成的海侵发生,此时渤海已显雏形,但并未达到现今的规模;晚更新世气候变化剧烈,由初期的温暖变为中期的寒冷,至晚期又有偏暖波动,此时形成了两次大规模的海侵,渤海基本形成现今的规模<sup>[16, 17]</sup>。

晚更新世以来,全球气候冷暖变化频繁,海平面随之升降,在中国东部沿海平原发生了 3 次海侵,3 次海侵之间还经历了两次大规模的海退成陆过程<sup>[6]</sup>。当气候变暖时,海平面上升,淹没金州湾地区,就会沉积海相地层;当气候变冷时,海平面随之下降,金州湾地区裸露成陆,就会相应的沉积陆相地层。金州湾海域基岩面以上的沉积层就是在海平面升降和海侵海退过程中逐渐形成的。本文主要对研究区的现代欠固结沉积层和基岩埋深情况进行详细讨论。

### 4.2.1 “现代沉积层”

主要是指全新世中期约 6.5kaB. P. 以来高海平面时期陆架浅海相、滨海相的沉积层,在金州湾海域为 A 层(图 2, 图 3)。“现代沉积层”沉积时间短(目前仍在接受沉积),在自重应力下尚未达到固结稳定,属欠固结土,为软弱土层,因此查明该层的厚度及分布情况为本次勘察任务的重点内容之一(图 4),研究区内该层分布规律明显,厚度在 8.1~16.8m 之间,西北角区域该层厚度最厚,向东南方向逐渐变薄。根据工程地质钻孔资料,本层岩性为深灰色、灰褐色淤泥和淤泥质粉质黏土,饱和,流塑-可塑,略具腥臭味,含少量腐殖质,黏性较强,刀切面

光滑,有光泽,干强度、韧性中等,无地震反应,局部夹少量呈透镜状及薄片状的粉细砂,含量约占10%,土体强度随深度增加而略有增强,局部土质为淤泥质土。本层地基土承载力容许值 $f=45\text{kPa}$ ,变形参数建议值 $E_s=1.81\text{MPa}$ ,基床系数建议值 $k_0=2.0\times 10^3\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

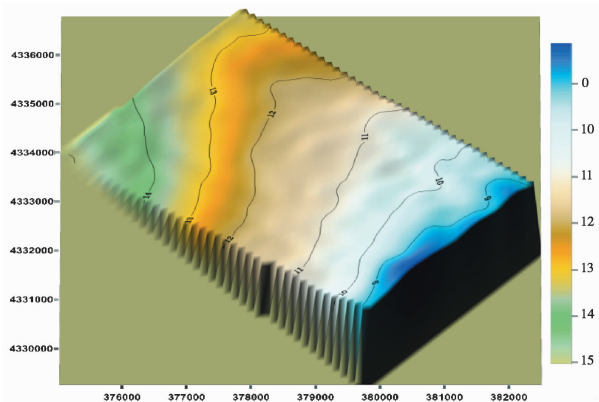


图4 现代沉积层(A层)厚度等值线图

Fig. 4 Thickness contour figure of Modern sedimentary

#### 4.2.2 基岩埋深

研究区内基岩面以上的地层即为第四系沉积层,基岩埋深也即是第四系沉积层的厚度。

如图5所示,研究区内基岩面埋藏深度总体在32~84m之间,西北角区域基岩面较为平缓,埋深在65m左右,其他区域明显显示出基岩面凹凸不平的特点,并存在有局部的高地。根据工程地质钻孔资料,研究区内基岩为震旦系辉绿岩和板岩:辉绿岩为灰绿色、棕褐色,辉绿结构,块状构造,主要成分为辉石、角闪石,原岩结构清晰,遇水软化崩解,节理裂隙很发育,岩芯呈碎块状,一般粒径为1~3cm,最大粒

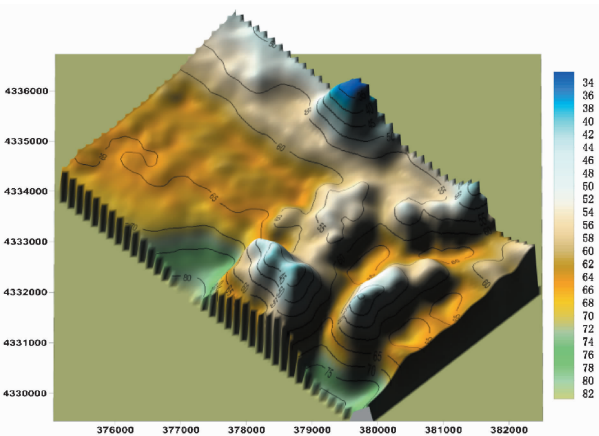


图5 基岩埋深等值线图

Fig. 5 Depth contour figure of bedrock

径为5cm;板岩为灰色,隐晶质结构,层状构造,主要成分以方解石为主,节理裂隙较发育,岩芯呈柱状,一般长度10~20cm,最长25cm,不易击碎。

## 5 结语

声学地层剖面探测技术因其可以连续、高效地获取水下地层多种地球物理参数和详细的地质信息,而越来越多的应用于海洋工程勘察、海洋灾害地质调查和海洋地质科学研究等。本文通过工程实例阐述了声学地层剖面探测技术在海洋工程场址勘察中的应用及其效果,主要得出以下结论:

(1)声学地层剖面探测技术由于其高效性和高分辨率而在查明第四系覆盖层的厚度及分布状况,弄清基岩面的埋深及分布规律,了解海洋灾害地质情况等方面显示出了极其重要的作用。但由于它只是一种间接的地球物理方法,因此需要对比工程地质钻探资料才能获得精确的勘探效果。在处理和解释声学地层剖面资料过程中,沉积层声速的选取是一个关键问题,直接关系到所得到的各地层界面埋深和地层厚度的准确性。需充分参考前人的相关资料,选取合适的沉积层声速值,才能得到准确的解释结果。

(2)金州湾海域海底面以下至声学剖面记录的有效范围内识别出8个连续的强声学反射界面,可主要划分为6个声学层序:全新世浅海相层序A、全新世滨海相层序B、晚更新世末期陆相层序C、晚更新世滨海相层序D、晚更新世早中期海陆交互层序E和震旦系基岩F。金州湾海域海底地层的发育与气候暖冷交替变化而导致的海平面升降变化密切相关:当气候变暖时,海平面上升,淹没金州湾地区,就会沉积海相地层;当气候变冷时,海平面随之下降,金州湾地区裸露成陆,就会相应的沉积陆相地层。在本次获取的声学地层剖面上能够较清晰的反映出地层沉积与海侵海退之间的关系。

## 参 考 文 献

- [1] 王琪,刘雁春,暴景阳. 浅剖仪垂直探测分辨力分析[J]. 海洋科学, 2003, 27(6): 77~80.  
Wang Qi, Liu Yanchun, Bao Jingyang. An analysis of vertical resolving power for subbottom profiler. Marine Science, 2003, 27(6): 77~80.
- [2] 赵铁虎,张训华,王修田,等. 广东珠江口—东平近海浅地层剖面的声学特征及地质意义[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29

- (3): 183 ~ 188.
- Zhao Tiehu, Zhang Xunhua, Wang Xiutian, et al. Profiling (SBP) acoustic characteristics and geological interpretation on offshore from pearl river estuary to Dongping in Guangdong province. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, **29**(3): 183 ~ 188.
- [3] 张志忠, 顾兆峰, 刘锡清, 等. 南黄海灾害地质及地质环境演变[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, **27**(5): 15 ~ 22.
- Zhang Zhizhong, Gu Zhaofeng, Liu Xiqing, et al. Hazardous geology and marine geologic environmental evolution in the South Yellow Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2007, **27**(5): 15 ~ 22.
- [4] 李海东, 杨作升, 王厚杰, 等. 现代黄河水下三角洲地质灾害现象的空间分布[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, **26**(4): 37 ~ 43.
- Li Haidong, Yang Zuosheng, Wang Houjie, et al. Factors of geohazards in the modern Yellow River subaqueous delta. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, **26**(4): 37 ~ 43.
- [5] 吴建政, 孙洪光, 亓发庆, 等. 辽东北北部晚更新世中期以来的地层结构及环境演化[J]. *海洋科学进展*, 2005, **23**(4): 452 ~ 459.
- Wu Jianzheng, Sun Hongguang, Qi Faqing, et al. Stratigraphic structure and environmental evolution in the northern Liaodong bay since the middle stage of Late Pleistocene. *Advances in Marine Science*, 2005, **23**(4): 452 ~ 459.
- [6] 宋召军, 张志珣, 黄海军. 南黄海西部海域高分辨率声学地层及其沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, **25**(1): 33 ~ 40.
- Song Zhaojun, Zhang Zhixun, Huang Haijun. Characteristics and depositional setting of the high resolution shallow seismic profile in South Yellow Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2005, **25**(1): 33 ~ 40.
- [7] 陈国祥, 贾学天, 陈哲. 工程物探方法在浅海域地质调查中的应用[J]. *江苏地质*, 2004, **28**(3): 145 ~ 148.
- Chen Guoxiang, Jia Xuetian, Chen Zhe. Application engineering geophysical prospecting method in shallow sea geological survey. *Jiangsu Geology*, 2004, **28**(3): 145 ~ 148.
- [8] 金翔龙. 海洋地球物理研究与海底探测声学技术的发展[J]. *地球物理学进展*, 2007, **22**(4): 1243 ~ 1249.
- Jin Xianglong. The development of research in marine geophysics and acoustic technology for submarine exploration. *Progress in Geophysics*, 2007, **22**(4): 1243 ~ 1249.
- [9] 陈晓辉, 李日辉, 徐晓达. 北黄海浅层声学地层[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, **31**(3): 17 ~ 22.
- Chen Xiaohui, Li Rihui, Xu Xiaoda. Shallow Seismic Records and Late Pleistocene Stratigraphy of the North Yellow Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2011, **31**(3): 17 ~ 22.
- [10] 赵铁虎, 张志珣, 许枫. 浅水区浅地层剖面测量典型问题分析[J]. *物探化探计算技术*, 2002, **24**(3): 215 ~ 219.
- Zhao Tiehu, Zhang Zhixun, Xu Feng. Analysis of typical problem for shallow acoustic surveying in the shallow waters. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2002, **24**(3): 215 ~ 219.
- [11] 王方旗, 亓发庆, 姚菁, 等. 浅海区 C-Boom 型浅地层剖面地层畸变及校正[J]. *海洋科学进展*, 2011, **29**(1): 47 ~ 53.
- Wang Fangqi, Qi Faqing, Yao Jing, et al. Distortion and correction of the c-boom subbottom profile from shallow sea areas. *Advances in Marine Science*, 2011, **29**(1): 47 ~ 53.
- [12] 庄杰杰, 王绍智, 兰志光. 浅地层剖面记录地质解释的若干问题[J]. *海洋测绘*, 1996, (2): 16 ~ 24.
- Zhuang Jiejie, Wang Shaozhi, Lan Zhiguang. Some issues during interpreting subbottom profile data. *Hydrographic Surveying and Charting*, 1996, (2): 16 ~ 24.
- [13] 王方旗, 亓发庆, 姚菁, 等. 声速预测方程在浅地层剖面资料处理中的应用[J]. *海洋通报*, 2011, **30**(5): 492 ~ 495.
- Wang Fangqi, Qi Faqing, Yao Jing, et al. Application of sound velocity forecasting equations in processing sub-bottom profile data. *Marine Science Bulletin*, 2011, **30**(5): 493 ~ 495.
- [14] 白大鹏, 赵铁虎, 顾雪晴, 等. 冀东南堡近岸海域浅地层划分及灾害地质因素分析[J]. *海洋地质动态*, 2010, **26**(10): 16 ~ 23.
- Bai Dapeng, Zhao Tiehu, Gu Xueqing, et al. Shallow seismic stratigraphy and geohazard indicators in Nanpu, Jidong. *Marine Geology Letters*, 2010, **26**(10): 16 ~ 23.
- [15] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第二分册)(辽东半岛西部和辽宁省西部海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1997.
- The Compilation Committee of Bays in China. *Bays in China* (part 2). Beijing: Marine Press, 1997.
- [16] 秦蕴珊, 赵一阳, 赵松龄, 等. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Zhao Songling, et al. *Geology of the Bohai Sea*. Beijing: Science Press, 1985.
- [17] 段永侯. 渤海海岸带变迁及其环境地质效应[J]. *水文地质工程地质*, 2000, (3): 1 ~ 5.
- Duan Yonghou. The coastal zone changes and its environmental effect. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000, (3): 1 ~ 5.