

# 渤海金州湾海域声学浅地层剖面及其解释\*

王方旗, 胡光海, 吴永亭, 开发庆, 杨 龙, 董立峰, 陶常飞

(国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

**摘 要:**将渤海金州湾海域的声学浅地层剖面进行了综合分析和解释, 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: 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、晚更新世海陆交互相层序 E 和震旦系基岩 F。通过与工程地质钻孔的沉积地层岩性单元对比研究, 发现依据声学浅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, 由此确定并推断了各声学地层的岩性及沉积环境, 并参考前人的研究结果, 对晚更新世以来金州湾地区的沉积过程和环境演化进行了初步探讨。

**关键词:**浅地层剖面; 沉积层序; 晚更新世以来; 渤海金州湾

中图分类号: P631.5

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2013)01-0128-10

大连金州湾海域大致呈 SE-NW 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 65.7 km, 海湾面积为 342 km<sup>2</sup>, 湾东部滩涂面积为 17 km<sup>2</sup>, 湾口礁岛面积 4.2 km<sup>2</sup>[1-2]。为加速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。项目场址位于渤海海区大连金州湾海域, 大连市甘井子区大连湾街道毛茌子村养殖场的西北侧的海域, 距岸 4.8 km, 地理坐标: 39°05'~39°10'N, 121°33'~121°39'E(图 1)。为弄清工程项目涉海范围内的工程地质条件, 需要在结合工程地质钻

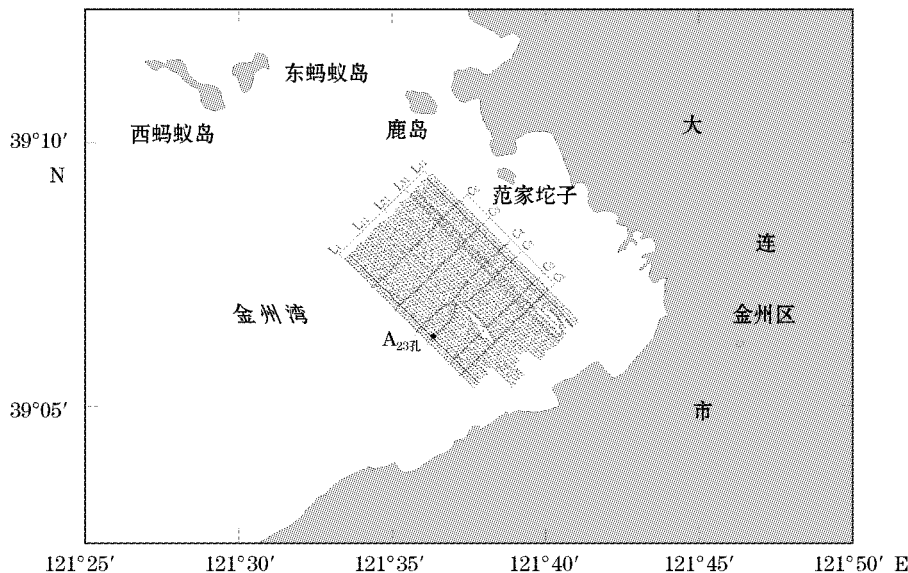


图 1 研究区地理位置及声学地层剖面测线布设

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

\* 收稿日期: 2012-05-04

资助项目: 海洋公益性行业科研专项——近海海底地质灾害预测评价及防控关键技术研究(201005005); 海洋公益性行业科研专项——中国典型海岛地质灾害监测及预警示范研究(201005010-01); 国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项资金项目——基于 GPS 技术的无验潮测量模式研究(GY02-2008T33)

作者简介: 王方旗(1981-), 男, 山东诸城人, 助理工程师, 硕士, 主要从事海洋地球物理调查技术的研究及应用方面研究. E-mail: sdhdw-fq0317@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

探资料的基础上,开展大范围的深层地层剖面探测,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,了解第四系沉积物的厚度和形态特征等,为人工岛工程设计提供详细可靠的地质资料。

## 1 材料与方方法

国家海洋局第一海洋研究所于 2011-07 承担了金州湾人工岛海域地层剖面调查任务,完成地层剖面测线 397.7 km,测线布设见图 1。海上作业采用美国 Trimble 公司的 212H 双信标 DGPS,定位精度优于 1 m。声学地层剖面测量使用英国 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。

1)震源:采用 SQUID 2000 电火花震源,输出电压:2 500~4 000 V,DC;发射功率:300~2 000 J(多级可选);充电速度:1 500 J/s;电容:240  $\mu\text{f}$ 。

2)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 5 m,由 24 个高灵敏度陶瓷压电水听器组合,组合间距为 0.2 m。

3)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:激发间隔 750 ms,激发能量 500 J,记录深度为 200 ms,滤波为 0.1~5 kHz,每间隔 100 m 定标号,船速控制在 4~5 kn。

## 2 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 2 个:浅水区发收分置导致的浅部地层厚度畸变<sup>[3-4]</sup>和地层中声速的选取<sup>[5-6]</sup>。本次海上作业时浅地层剖面仪发射换能器与水听器之间水平距离为 7.2 m,而测区内水深为 5~7 m,因此需对浅部地层厚度进行校正。在进行时深转换时,50 m 以浅地层平均声速采用 1 600 m/s,50 m 以深地层平均声速采用 1 800 m/s,声学反射界面与钻孔资料能够较好的对应。

### 2.1 声学反射界面特征及地层划分

通过对声学剖面反射波的振幅、频率、相位、连续性、反射结构和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>[7-8]</sup>。

根据对声学剖面的分析和解译,研究区内海底面以下至剖面记录的有效范围内普遍存在 8 个连续的强声学反射界面( $T_0, T_1^1, T_1^2, T_2, T_3, T_4, T_5^1$  和  $T_5^2$ ),可划分为 6 个层序(A, B, C, D, E 和 F)和 4 个准层序组( $A_1, A_2, F_1$  和  $F_2$ )(图 2~图 4)。

#### 2.1.1 $T_0, T_1^1$ 和 $T_1^2$ 反射界面与层序 A

$T_0$ :海底反射界面,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。

$T_1^1$ :为次一级强反射界面,中一强振幅,连续性好,呈水平状或近于水平,与海底反射界面( $T_0$ )基本平行,可在全区内连续追踪,界面埋深为 4.0~5.3 m。

$T_1^2$ :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,埋深为 8.1~16.8 m。

层序 A:反射界面  $T_0$  和  $T_1^2$  之间的地层,是自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”。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,地层厚度值为 8.1~16.8 m。层序 A 可进一步划分为准层序组  $A_1$  和准层序组  $A_2$ 。

准层序组  $A_1$ :反射界面  $T_0$  和  $T_1^1$  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  $A_1$  层厚度分布均匀、稳定,厚度为 4.0~5.3 m,变化较小,表明区内现代沉积速度比较一致。

准层序组  $A_2$ :反射界面  $T_1^1$  和  $T_1^2$  之间的地层,推断为末次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,逆下伏地层分界面终止尖灭,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  $A_2$  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,厚度值为 4.0~12.5 m。

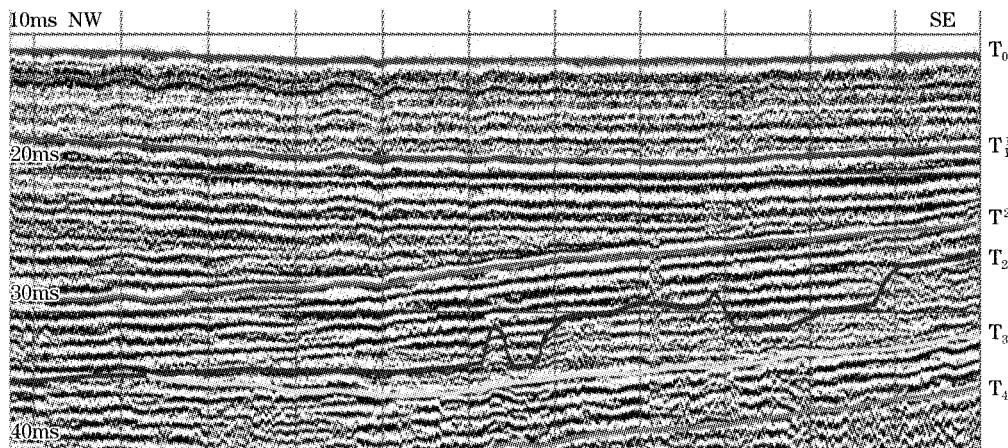


图 2 浅层反射界面示意图

Fig. 2 Typical shallow reflection interfaces

### 2.1.2 $T_2$ 反射界面与层序 B

$T_2$ :是一个较强反射的侵蚀界面,遍布全区,能量强弱变化明显,中一弱连续性,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,埋深为 9.2~18.9 m。

层序 B:反射界面  $T_1^2$  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。层序内部层间反射能量较强,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,为 1.4~5.9 m,厚度分布依赖于层序下边界的起伏和延伸状态。

### 2.1.3 $T_3$ 反射界面与层序 C

$T_3$ :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  $T_2$ 。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 4 m), $T_3$  界面埋深在 12.5~19.6 m 之间。

层序 C: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0~5.5 m之间,平均约为2.8 m。

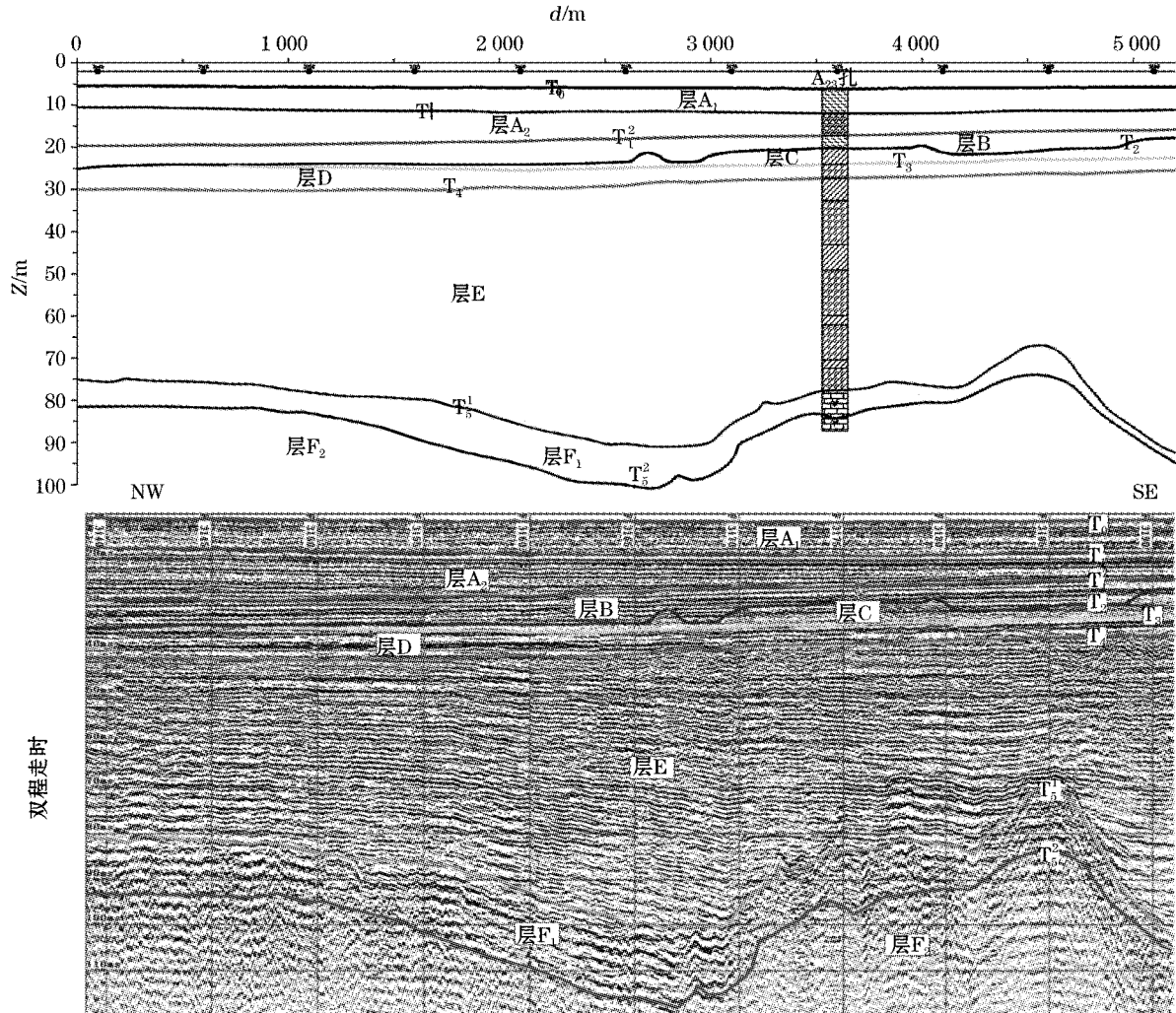


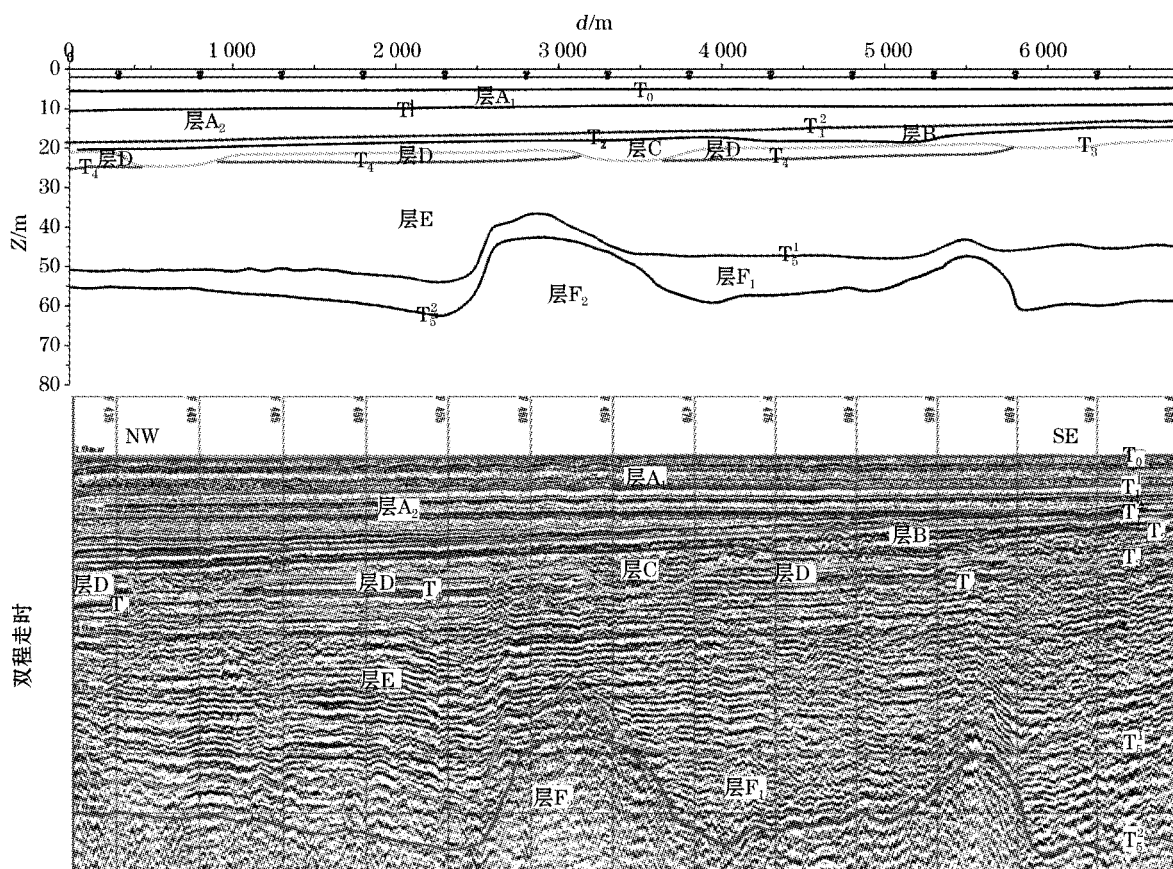
图3 典型声学地层剖面及解释(测线 L<sub>3</sub>)

Fig. 3 Typical acoustic subbottom profile and its interpretation (L<sub>3</sub>)

2.1.4 T<sub>4</sub>反射界面与层序 D

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,埋深为14.3~25.6 m。

层序 D:反射界面 T<sub>3</sub>和 T<sub>4</sub>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,为0~6.1 m,平均约为2.5 m。

图 4 典型声学地层剖面及解释(测线 L<sub>40</sub>)Fig. 4 Typical acoustic subbottom profile and its interpretation (L<sub>40</sub>)

### 2.1.5 T<sub>5</sub><sup>1</sup> 反射界面与层序 E

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, 该界面埋深为 28.2~56.6 m。

层序 E: 反射界面 T<sub>4</sub> 和 T<sub>5</sub><sup>1</sup> 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, 因缺乏测年和古体微生物资料而难以详尽分析, 暂且列为一大层。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, 为 12.9~33.5 m。

### 2.1.6 T<sub>5</sub><sup>2</sup> 反射界面与层序 F

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。该界面埋深为 31.2~86.8 m。

层序 F: 反射界面 T<sub>5</sub><sup>2</sup> 以下的地层, 属基岩层, 与上覆地层呈角度不整合接触关系。可进一步划分为准层序组 F<sub>1</sub> 和准层序组 F<sub>2</sub>。

准层序组 F<sub>1</sub>: 反射界面 T<sub>5</sub><sup>1</sup> 和 T<sub>5</sub><sup>2</sup> 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<sub>6</sub> 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, 为 1.8~16.6 m。

准层序组  $F_2$ : 为中风化基岩, 反射界面  $T_5^2$  以下的地层。

### 2.2 声学地层与钻孔对比

为全面综合分析研究区内的岩土层分布特征, 在区内进行了一系列的工程地质钻探工作, 选取具有代表性的  $A_{23}$  孔 ( $39^{\circ}6'27''$  N,  $121^{\circ}35'17.4''$  E) 的钻孔资料与声学地层剖面进行对比和研究。  $A_{23}$  钻孔孔口标高为  $-6.70$  m, 总进尺深度为  $81.2$  m, 自上而下共分为 15 层(图 5):

①淤泥( $Q_4^m$ ): 灰褐色、深灰色, 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, 层厚  $5.9$  m。本层对应声学地层  $A_1$  层, 属浅海相沉积层;

②淤泥质粉质粘土( $Q_4^m$ ): 灰褐色, 软塑, 饱和, 土质均匀, 偶见贝壳碎片及粉砂团块, 层厚  $5.2$  m。本层对应声学地层  $A_2$  层, 属浅海相或滨海相沉积层。

声学地层 A 层与钻孔的第①、②层对应, 属现代海洋沉积层, 目前仍在接受沉积。

③淤泥( $Q_4^m$ ): 灰褐色, 流塑, 饱和, 土质均匀, 偶见贝壳碎片及粉砂团块, 层厚  $3.2$  m。该层与声学地层 B 层对应, 属滨海相沉积层。

④粘土( $Q_{al+pl4}$ ): 灰褐色、灰黄色, 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, 层厚  $3.6$  m。该层与声学地层 C 层对应, 属河湖冲积相、洪积相沉积层。

⑤粉质粘土( $Q_4^{pc}$ ): 灰褐色、灰绿色, 稍湿, 可塑-硬塑, 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, 层厚  $3.4$  m; 该层与声学地层 D 层对应, 属滨海相沉积层。

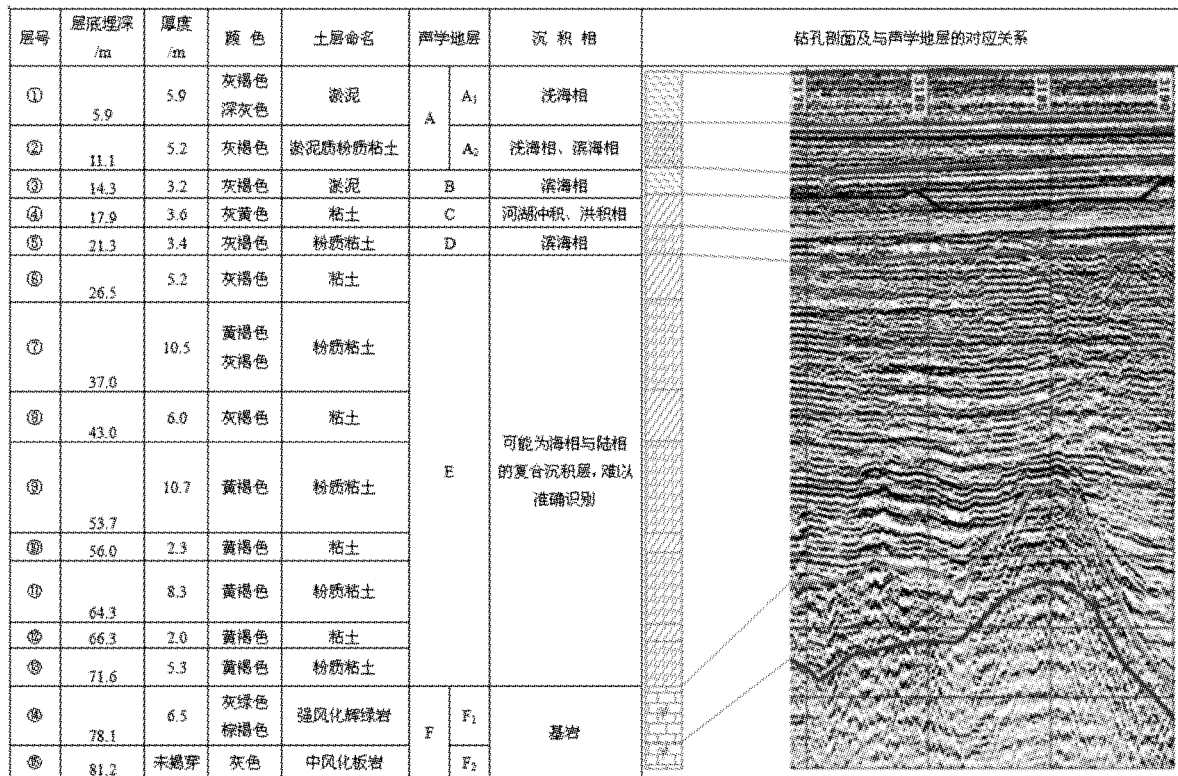


图 5 金州湾声学地层与钻孔  $A_{23}$  的对比

Fig. 5 Correlation of the strata resulted from the acoustic subbottom profiles to the stratigraphic units in Core  $A_{23}$  in the Jinzhou Bay

⑥粘土( $Q_4^{mc}$ ):灰褐色,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,层厚 5.2 m;

⑦粉质粘土( $Q_4^{mc+al+pl}$ ):灰褐色、黄褐色,稍湿,可塑-硬塑,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,层厚 10.5 m;

⑧粘土( $Q_4^{mc+al+pl}$ ):灰褐色,湿,硬塑,切面光泽,土质均匀,含少量铁质氧化物,偶见粉砂斑点,层厚 6.0 m;

⑨粉质粘土( $Q_4^{al+pl}$ ):黄褐色,湿,硬塑,切面较光泽,干强度中,土质均匀,含少量铁质氧化物,含少量粉砂斑点,层厚 10.7 m;

⑩粘土( $Q_4^{al+pl}$ ):黄褐色,湿,硬塑,切面光泽,土质均匀,含少量铁质氧化物,偶见粉砂斑点,层厚 2.3 m;

⑪粉质粘土( $Q_4^{al+pl}$ ):黄褐色,湿,硬塑,切面较光泽,干强度中,土质均匀,含少量铁质氧化物,偶见粉砂斑点,层厚 8.3 m;

⑫粘土( $Q_4^{dl+el}$ ):黄褐色,湿,硬塑,切面光泽,土质较均匀,含少量铁质氧化物,偶见粉砂斑点,偶见碎石,层厚 2.0 m;

⑬粉质粘土( $Q_4^{dl+el}$ ):黄褐色,湿,硬塑,切面较光泽,干强度中,土质较均匀,含少量铁质氧化物,含少量粉砂斑点,偶见粒径约为 20 mm 的碎石,层厚 5.3 m;

声学地层 E 层与钻孔的第⑥、⑦、⑧、⑨、⑩、⑪、⑫、⑬层对应,可能为浅海相、滨海相、河湖冲积相、洪积相以及残积相、坡积相的复合沉积层,仅依赖声学剖面 and 工程地质钻孔资料无法准确识别。

⑭强风化辉绿岩( $\beta_{\mu}$ ):灰绿色、棕褐色,辉绿结构,块状构造,主要成份为辉石、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,层厚 6.5 m。本层对应声学地层 F<sub>1</sub>层。

⑮中风化灰岩( $Z_{gb}$ ):灰色,隐晶质结构,层状构造,主要成份以方解石为主,节理裂隙较发育,岩芯呈柱状,不易击碎,该层未穿透,为震旦系基岩。本层对应声学地层 F<sub>2</sub>层。

声学地层 F 层与钻孔的第⑭、⑮层对应。

### 3 沉积层序及环境演化

#### 3.1 沉积层序

前人对中国黄渤海晚更新世以来的沉积地层、环境演变等做了大量工作<sup>[9-16]</sup>。其中尤以渤海中部偏东的 BC-1 孔<sup>[9]</sup>、渤海南部的 S<sub>3</sub>孔<sup>[10]</sup>的资料较为典型,对渤海的沉积层序作了较全面的阐述:渤海晚更新世以来的地层,主要是海水进退所形成的地层:当冰期来临时,海平面大幅度降低,海水退出渤海,形成陆地或者变为渤海湖,接受陆相沉积;当间冰期或亚间冰期来临时,海水复又进入,再度形成渤海,接受海相沉积。由于渤海地区基本上处于沉降区,所以无论是冰期时形成的陆相地层,还是间冰期形成的海相地层,都能够连续地记载下来<sup>[9]</sup>。

金州湾海域位于渤海的东岸,其相应的沉积地层自然与渤海的沉积环境演化和沉积过程有着密不可分的关系。参考相关资料并对照 BC-1 孔和 S<sub>3</sub>孔对研究区的沉积层序进行如下讨论:

海相层序 A:代表了 8.2 ka B. P. 以来的全新世浅海相、滨海相沉积层,岩性为深灰色、灰褐色淤泥和淤泥质粉质粘土。本层对应于 BC-1 孔的黄骅海侵层和 S<sub>3</sub>孔的第一海相层。其中 A<sub>1</sub>层(0~5.9 m)代表了全新世中期约 6.5 ka B. P. 以来高海平面时期陆架浅海相沉积层;A<sub>2</sub>层(5.9~11.1 m)为全新世约 8.2 ka B. P. 至约 6.5 ka B. P. 之间海平面上升阶段形成的浅海相、滨海相沉积层。

海相层序 B:代表了全新世早期海侵未达到最高海平面之前受潮汐影响的滨海相沉积层,岩性为灰褐色淤泥、淤泥质粉质粘土。

陆相层序 C:到末次冰期冰盛期,约 18 ka B. P.,海平面下降到最低点,整个渤海大部分海域裸露成陆,

形成侵蚀地表或陆相地层。而金州湾海域位于渤海东岸,比渤海中部更长时间内处于陆相沉积环境,或者原有沉积地层被侵蚀,或者接受河湖冲积、洪积等陆相沉积。

海相层序 D:推断该层沉积可能代表了玉木冰期上亚间冰期的滨海相沉积层,局部在末次冰期冰盛期时受到侵蚀,其岩性为灰褐色、灰绿色的粉质粘土。本层可对应于 BC-1 孔的献县海侵层和 S<sub>3</sub> 孔的第二海相层。

海陆交互层序 E:本层可能包含了多次海相沉积和陆相沉积,因缺乏测年和有孔虫等相关资料而难以详细划分,作为一层。

### 3.2 环境演化

晚更新世以来,全球气候冷暖变化频繁,海平面随之升降。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 2 次大规模的海退成陆过程<sup>[13,17]</sup>。

在约 70 ka B. P.,随着里斯—玉木间冰期的结束,进入玉木 I 阶段,海水退出渤海干冷的气候和强劲的西北风使陆架上风沙肆虐,河道向渤中延伸,广泛发育了陆相沉积<sup>[18]</sup>,金州湾地区裸露成陆,接受陆相沉积。进入玉木冰期的下亚间冰期后,世界气候转暖,海平面上升,海水逐渐进入渤海,约 65 ka B. P. 海水到达渤中。这次海侵称为渤海海侵,此次海侵范围较小,持续时间短<sup>[9]</sup>,这一阶段金州湾应该处于浅海相或滨海相沉积环境。约 53.5 ka B. P.,进入玉木冰期的玉木 II 阶段,气候变冷,海水退出渤海,金州湾再次成为陆相环境,主要为河流冲积、洪积相。在此背景下,金州湾地区经历了陆—海—陆的交替过程,形成了沉积层序 E。

到玉木冰期的上亚间冰期,气候变暖,再次发生海侵,至约 25 ka B. P.,海侵达最大范围,在渤海湾西岸曾经远达河北献县,称为献县海侵,这次海侵范围大,持续时间长<sup>[9]</sup>,金州湾可能处于滨海相沉积环境,形成了海相地层 D。

约 22 ka B. P.,进入玉木冰期的末次冰期,世界气候又逐渐变冷,至约 18 ka B. P. 的盛冰期,海平面降到了最低位置,降到水深约 140~160 m 处的现代陆架边缘附近,这时中国的渤海、黄海、东海和南海的陆架区几乎全部裸露成陆,并与中国大陆连为一体成为广泛的陆架平原区<sup>[18]</sup>。只有部分地区能保持原始的沉积层序,而大部分海区则发生了沙漠化,形成沙漠化环境所特有的混杂堆积,当初的沉积层序已经不复存在<sup>[19]</sup>。此时,金州湾处于陆相环境,可能遭受剥蚀或接受河流相沉积,形成陆相层序 C。

进入冰后期,全球气温再次转暖,海平面开始回升。大约于 11 ka B. P.,海水开始快速上升,大约于 8.5 ka B. P. 进入渤海,于 7 ka B. P. 左右到达现今的海岸线附近,约 6.5 ka B. P. 海侵至最大范围,至今渤海一直被水淹没,这次海侵被称为黄骅海侵<sup>[10]</sup>。这一时期内,金州湾地区形成了海相层序 B 和 A,目前仍在接受沉积,依据 A<sub>23</sub> 钻孔所揭露的 A 层厚度计算,沉积速率约为 1.7 mm/a。

总体来看,自晚更新世以来,研究区在经历了陆相—滨海相—陆相—滨海相—陆相—滨海相—浅海相的多期沉积演化过程后,最终演化成为现代以潮汐为主要动力的浅海沉积环境。

## 4 结 论

通过与工程地质钻孔资料的对比研究,对研究区渤海金州湾海域声学地层剖面进行了综合分析和解释,初步得到以下结论:

1) 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(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> 和 T<sub>5</sub><sup>2</sup>),可划分为 6 个声学层序。通过与钻孔资料的对比分析,确定出了各声学地层的岩性性质及空间分布规律,根据沉积物岩性及地震相推断了各地层的沉积相。

2) 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(References):

- [1] FU W X, HE B L, LIU W. Characteristics and distribution of quaternary strata along coast of Liaodong Peninsula[J]. Marine Science Bulletin, 1992, 11(4): 58-64. 符文侠, 何宝林, 刘伟. 辽东半岛沿海第四纪地层特征及其分布[J]. 海洋通报, 1992, 11(4): 58-64.
- [2] The Compilation Committee of Bays in China. Bays in China: part 2[M]. Beijing: Marine Press, 1997. 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志:第二分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1997.
- [3] ZHAO T H, ZHANG Z X, XU F. Analysis of typical problem for shallow acoustic surveying in the shallow waters[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 24(3): 215-219. 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.
- [4] WANG F Q, QI F Q, YAO J, et al. Distortion and correction of the C-Boom subbottom profile from shallow sea areas[J]. Advances in Marine Science, 2011, 29(1): 47-53. 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.
- [5] ZHUANG J Z, WANG S Z, LAN Z G. Some issues during interpreting subbottom profile data[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 1996, (2): 16-24. 庄杰枣, 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.
- [6] WANG F Q, QI F Q, YAO J, et al. Application of sound velocity forecasting equations in processing sub-bottom profile data[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(5): 493-495. 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): 493-495.
- [7] BAI D P, ZHAO T H, GU X Q, et al. Shallow seismic stratigraphy and geohazard indicators in Nanpu, Jidong[J]. Marine Geology Letters, 2010, 26(10): 16-23. 白大鹏, 赵铁虎, 顾雪晴, 等. 冀东南堡近岸海域浅地层层序划分及灾害地质因素分析[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(10): 16-23.
- [8] ZHAO T H, ZHANG X H, WANG X T, et al. Profiling (SBP) acoustic characteristics and geological interpretation on offshore from Pearl River Estuary to Dongping in Guangdong Province[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(3): 183-188. 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.
- [9] QIN Y S, ZHAO Y Y, ZHAO S L, et al. Geology of the Bohai Sea [M]. Beijing: Science Press, 1985. 秦蕴珊, 赵一阳, 赵松龄, 等. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [10] ZHUANG Z Y, XU W D, LIU D S, et al. Division and environmental evolution of late quaternary marine beds of S<sub>3</sub> hole in the Bohai Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999, 19(2): 27-35. 庄振业, 许卫东, 刘东升, 等. 渤海南部 S<sub>3</sub> 孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 27-35.
- [11] WANG G Z, GAO S, LI F Y. Holocene mud deposits in the west of the northern Yellow Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(4): 125-134. 王桂芝, 高抒, 李凤业. 北黄海西部的全新世泥质沉积[J]. 海洋学报, 2003, 25(4): 125-134.
- [12] WU J Z, SUN H G, QI F Q, et al. Stratigraphic structure and environmental evolution in the northern Liaodong Bay since the middle stage of late pleistocene[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(4): 452-459. 吴建政, 孙洪光, 亓发庆, 等. 辽东湾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.
- [13] SONG Z J, ZHANG Z X, HUANG H J. Characteristics and depositional setting of the high resolution shallow seismic profile in south Yellow Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2005, 25(1): 33-40. 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.
- [14] LI F L, WANG H, WANG Y S, et al. Stratigraphic division and establishment of a formation for the holocene stratotype section in the coastal of the Bohai Bay[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(2): 124-135. 李凤林, 王宏, 王云生, 等. 渤海湾滨海平原全新统层型剖面地层划分与建组[J]. 地质通报, 2005, 24(2): 124-135.
- [15] YAN Y Z, WANG H, LI F L, et al. Sedimentary environment and sea-level fluctuations revealed by borehole BQ1 on the west coast of the Bohai Bay, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(3): 357-382. 阎玉忠, 王宏, 李凤林, 等. 渤海湾西岸 BQ1 孔揭示的沉积环境与海面波动[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 357-382.
- [16] CHEN X H, LI R H, XU X D. Shallow seismic records and late pleistocene stratigraphy of the North Yellow Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2011, 31(3): 17-22. 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.
- [17] DUAN Y H. Coastline changes of Bohai Sea and their environmental-geological effect[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2000, (3): 1-5. 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.

- [18] LI P Y CHENG Z B, LV H Y, et al. The coastal zone loess of the Liaodong Peninsula[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1992, 66(1): 82-94. 李培英, 程振波, 吕厚远, 等. 辽东海岸带黄土[J]. *地质学报*, 1992, 66(1): 82-94.
- [19] YU H J. A new exploration of shelf environment during the Last Stage of the Late Pleistocene[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1995, (1): 26-32. 于洪军. 晚更新世末期黄、渤海陆架环境的新探讨[J]. *海洋湖沼通报*, 1995, (1): 26-32.

## Acoustic Subbottom Profile and Their Interpretations in the Jinzhou Bay of the Bohai Sea

WANG Fang-qi, HU Guang-hai, WU Yong-ting, QI Fa-qing,  
YANG Long, DONG Li-feng, TAO Chang-fei  
(*First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*)

**Abstract:** Acoustic subbottom profiles in the Jinzhou Bay of the Bohai Sea are synthetically analyzed and interpreted. Eight continuous strong acoustic reflection interfaces are recognized and six acoustic sequences which are significant for depositional environment are identified. These sequences include Holocene neritic sequence A, Holocene littoral sequence B, Late Pleistocene continental sequence C, Late Pleistocene littoral sequence D, Late Pleistocene marine continental interbedded sequence E and Sinian bedrock F. According to the comparison with the sedimentary stratigraphic and lithologic units resulted from the engineering geological drillings, the stratigraphic divisions based on the acoustic subbottom profiles are well corresponding to the geological strata of the drilling cores. Therefore, the lithology and depositional environment of the acoustic sequences are established and deduced, respectively. Combining with the previous studies, the sedimentary processes and environmental evolution experienced in the area of the Jinzhou Bay since the Late Pleistocene are preliminary discussed.

**Key words:** subbottom profile; depositional sequence; since the Late Pleistocene; Jinzhou Bay; Bohai Sea

**Received:** May 04, 2012