

王方旗,陶常飞,林旭波,等.基于高分辨率浅剖与钻孔信息对比的金州湾海底声速的统计特征[J].海洋学报,2020,42(11):112-122,doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.11.011

Wang Fangqi, Tao Changfei, Lin Xubo, et al. Statistical characteristics of seabed sound velocity in the Jinzhou Bay based on high resolution sub-bottom profile data[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(11): 112-122, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.11.011

基于高分辨率浅剖与钻孔信息对比的金州湾海底声速的统计特征

王方旗¹, 陶常飞¹, 林旭波¹, 董立峰¹

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 声波在海底沉积物中的传播速度是一个重要参数,弄清海底沉积物中声速的变化规律具有极其重要的意义。以渤海金州湾海域为例,在进行畸变校正的基础上,基于高分辨率浅地层剖面与钻孔数据的对比分析,实现了全新世沉积层和基岩界面以上沉积层声速的准确反演,并采用统计学方法分析讨论了研究区内的声速特征和变化规律,结果表明,全新世沉积层平均声速的 95% 置信区间为 1 449.60~1 655.72 m/s,平均值为 1 560.34 m/s;基岩界面以上沉积层平均声速的 95% 置信区间为 1 657.96~1 970.80 m/s,平均值为 1 765.63 m/s;研究区内海底地层的声速与埋藏深度之间呈现明显的正线性相关关系,声速梯度为 4.18 s⁻¹。

关键词: 海底声速;声速反演;浅地层剖面;统计特征

中图分类号: P733.23

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)11-0112-11

1 引言

海底地声学是一门研究海底沉积物声学特性的学科,同时也是一门用声学方法研究海底地质特性的学科,是与声学、海洋学、地质学以及地球物理学等多种学科有密切关系的应用性极强的交叉学科。海底地声学是国际海洋科学研究的热点方向之一^[1-2]。海底沉积物声速是海底地声学研究中最基本的物理量之一,是一个重要参数,研究和弄清海底沉积层中声速的变化规律具有极其重要的科学意义、工程意义和军事意义^[3]。

海底沉积物声速研究的传统方法主要有:声速传播的理论推导与数学建模法^[4-9]、取样测量法^[2,10-19]、室内模拟试验法^[20-21]和海底原位声学测量法^[20,22-32]。但由于受到研究方法和条件的限制,分别存在一些难以克服的困难和问题:(1)声传播理论数学模型中有

些未知参数的获取并不容易,甚至根本无法获取;(2)取样后再进行甲板测量或室内测量的方法对样品的扰动和测量误差不可避免,测量值与真实值有偏差,且所取样品限于浅表层几厘米至几米深度范围,成果应用很有限;(3)海底原位声学测量同样存在研究深度浅的问题,只能获取表层沉积物的声学参数。

浅地层剖面仪是基于射线声学的基本原理研发的海底测量仪器,其通过声学换能器向海底发射一定频率的声波,通过记录从海底及以下各声阻抗界面返回的反射波的时间达到探测海底地层结构的目的。射线声学法是一种可以用于间接获得海底地层声速的无扰动测量方法,Bryan^[33]论述了海底薄层中声速的 T^2-X^2 求解方法,并且认为用此方法计算的结果与该地层的深度与厚度之比无关。张叔英^[34-35]将 T^2-X^2 法进行了改进,用于海底任意倾斜地层的声速测量和计算,分析了影响测量精度的因素,并建议在硬地

收稿日期: 2019-09-13; 修订日期: 2020-03-07。

基金项目: 国家自然科学基金(41606056); 国家重点研发计划(2017YFC0306003)。

作者简介: 王方旗(1981—),男,山东省诸城市人,工程师,主要从事海洋地球物理调查技术的研究。E-mail: sdhdwfq0317@fio.org.cn

层中考虑声射线的折射效应以提高声速的测量精度。本文根据射线声学的原理,从声波在海水和海底地层中的几何路径出发,以金州湾海域为例开展基于高分辨率浅地层剖面与钻孔岩心信息对比的地层声速反演研究。首先以大量高分辨率浅地层剖面数据和高密度钻孔数据为基础进行海底地层声速反演,获得研究区内各钻孔处的真实声速值;然后采用统计学方法分析和研究了不同层序的声速分布特征和声速随地层深度的变化规律,为金州湾及附近海域或沉积环境相类似海域的海底地声学研究提供科学依据、方法指导和技术支持。

2 数据和方法

2.1 数据组成

研究区位于渤海金州湾海域内,金州湾为沙砾质基岩海岸上的一个原生湾,大致呈东南-西北走向,湾口朝西北敞向渤海,海岸线总长 65.7 km,海湾面积为 342 km²,湾东部滩涂面积为 17 km²,湾口礁岛面积为 4.2 km²。为配合相关项目的开发建设,在金州湾内进行了详细的浅地层剖面测量和工程地质勘察(图 1)。

浅地层剖面测量采用英国的 AAE CSP-D 2200 地层剖面系统,震源采用 Squid 2000 电火花,激发间隔为 750 ms,激发能量为 500 J,水听器采用荷兰的 GEO-SENSE/24 单道接收电缆,接收段长度为 5 m,数据记录深度为 200 ms,滤波为 0.1~5.0 kHz,总计完成测线约 400 km,资料清晰,穿透深,剖面上可清晰准确地识别出全新世海相层底界面和基岩界面。工程地质勘察共布设了钻孔 328 个(其中穿过浅剖测线的有 185 个),能够准确确定全新世海相层底界面和海底

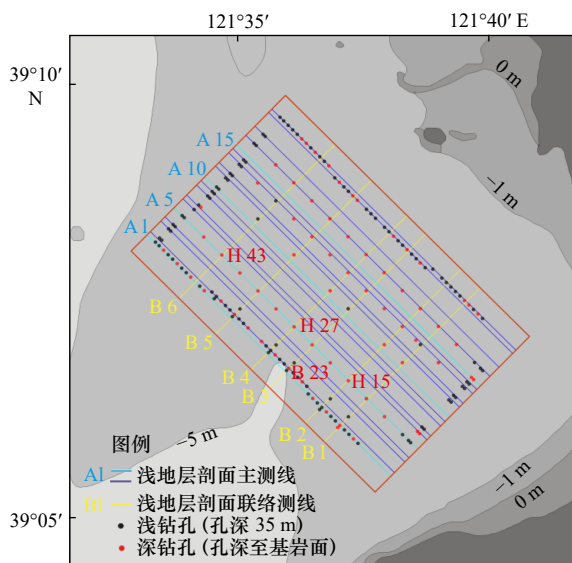


图 1 浅地层剖面测线和钻孔位置

Fig. 1 Location of sub-bottom profile lines and boreholes

沉积层底界面(基岩面)的深度。

金州湾海域属于水下浅滩,水深在 5~8 m,海底地形变化不大,湾区海底第四纪地层连续性好,物质组成较均匀,主要为细粒的黏土和粉质黏土,只在局部夹有粉砂或细砂薄层,这些高分辨率的浅地层剖面资料和高密度分布的钻孔为本区域海底地层声速的研究提供了丰富的数据支持。

2.2 声速反演

2.2.1 声波走时校正

由于采用的浅地层剖面系统声波激发和水听器接收是分开的,会造成回波信号的走时和振幅发生畸变,因此需要对接收信号进行走时校正,以保证后续沉积层声速计算的准确性。本文采用基于射线声学理论的几何分析法对声波走时进行校正,并经深时转换后得到声波的单程走时。

浅地层剖面资料采集和处理时,总是需预先设置一个经验性的平均声速 V_0 ,既可以实时地对海底地层进行大略了解,也可以方便系统进行数字化采集和处理。采用专业处理软件从剖面上可以直接解译得到近似水深: $H_{0(0)}$,以及各反射层深 $H_{0(1)}$, $H_{0(2)}$, $H_{0(3)}$, ..., $H_{0(n)}$ 。从图 2 的几何关系可以推导出:

海水深度的畸变校正公式为

$$H_0 = 0.5a + 0.5 \sqrt{4H_{0(0)}^2 - d^2}, \quad (1)$$

海底地层的畸变校正公式:

$$H_i = 0.5a + \sqrt{4(H_{0(i)} + H_0)^2 - d^2} - H_0, \quad (2)$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$ 。校正后得到的是以海底为起算面的各地层界面的深度。

根据钻孔资料确定地层界面的深度,结合声学剖面上得到的钻孔处对应地层界面的走时可实现沉积层声速的反演计算,如图 3 为声速反算流程图。其中, t_i 为深时转换后得到的声波到达界面 i 的单程走

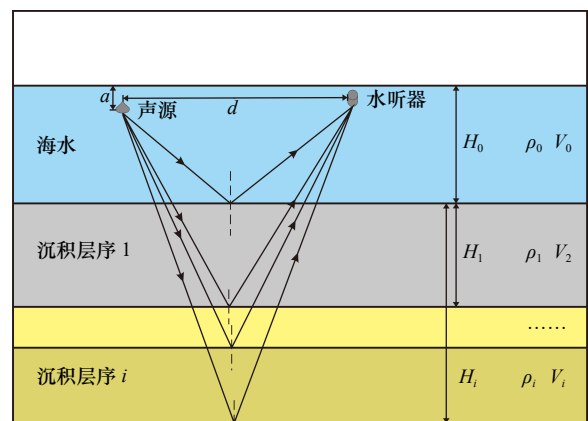


图 2 浅地层剖面探测原理几何关系

Fig. 2 Geometric relation of sub-bottom profile

时; d_i 为钻孔资料在第 i 层的分层深度; \bar{V}_i 为反演得到的界面 i 以上沉积层的平均声速。

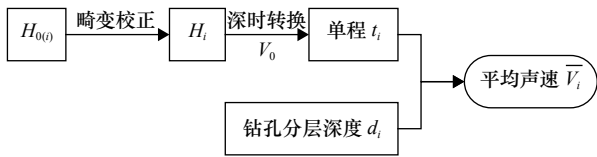


图3 声速反演计算流程

Fig. 3 Flow chart of sound velocity inversion

2.2.2 全新世沉积层声速反演

全新世沉积层, 是自全新世海侵开始以来逐渐沉积的地层, 仍在接受沉积, 一般称为“现代沉积层”。在研究区内将其标记为 A 层, 其厚度从西北方向到东南方向由厚逐渐变薄(图 4, 图 5)。结合钻孔资料, 全新世沉积层为淤泥或淤泥质粉质黏土, 局部区域表层为淤泥质粉砂, 颜色为灰褐色或深灰色, 流塑-软塑, 土质较均匀, 含少量有机质, 偶见贝壳碎片及粉砂团块。

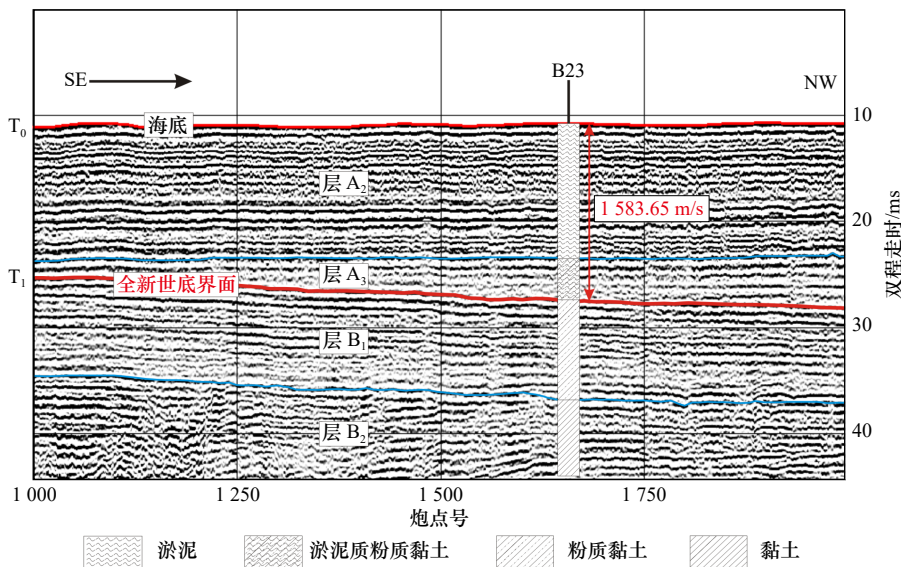


图4 全新世声速反演剖面示例(测线 A2, 见图 1)

Fig. 4 Sound velocity inversion for Holocene sequence (see Line A2 in Fig.1)

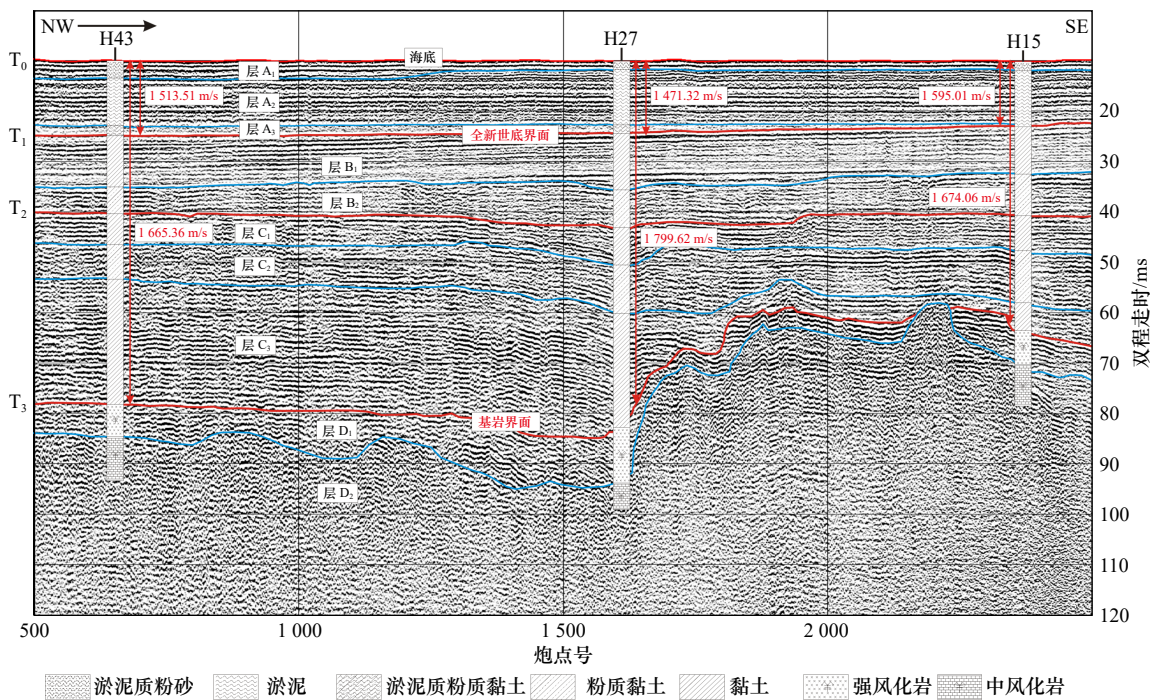


图5 基岩以上沉积层声速反演剖面示例(测线 A5, 见图 1)

Fig. 5 Sound velocity inversion for above-bedrock sequence (see Line A5 in Fig.1)

全新世沉积层底界面, 即 T_1 界面, 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, 由海岸向湾区中心方向倾斜, 无大的起伏, 易追踪。全新世沉积层声速反演就是以此界面为准: 在浅地层剖面穿过相应的钻孔处, 经过畸变校正后得到声波垂直入射至 T_1 界面的单程走时, 然后对比钻孔数据中该层的厚度, 经反演计算得到该层的平均声速值。为保证反演结果的准确性, 对反演采用的钻孔进行了筛选, 将实际位置偏离浅地层剖面测线大于 10 m 的钻孔舍弃, 只保留了 185 个钻孔信息, 经过反演后得到了 213 组声速数据, 限于篇幅, 本文只列举了示例剖面图中的 4 组数据, 见表 1 所示, 在浅地层剖面测线 A2 穿过钻孔 B23 处, 全新世沉积层的声速反演值为 1 583.65 m/s; 在浅地层剖面测线 A5 穿过钻孔 H43、H27 和 H15 处, 全新世沉积层的声速反演值分别为 1 513.51 m/s、1 471.32 m/s 和 1 595.01 m/s。

如图 6 所示为全新世沉积层的反演结果箱型图, 可以看出, 研究区内全新世底界面埋深在 8.10~16.70 m 之间, 95% 置信区间为 9.00~15.30 m, 平均埋深为

12.08 m。根据反演结果, 全新世沉积层的平均声速在 1 399.35~1 686.87 m/s 之间, 95% 置信区间为 1 449.60~1 655.72 m/s, 平均值为 1 560.34 m/s。

2.2.3 基岩面以上沉积层声速反演

晚更新世以来, 全球气候冷暖变化频繁, 海平面随之升降。中国东部沿海发生了 3 次大规模海侵, 3 次海侵之间还经历了两次大规模的海退成陆过程^[36-37]。而金州湾地区也相应的周期性的经历了陆相、滨海相和浅海相等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^[38]。研究区内基岩面以上沉积层即为第四纪松散沉积层, 在本区包含 A、B、C 3 个层, 由于全新世以前的沉积层序较为复杂, 在缺乏年代资料的情况下, 仅依靠钻孔资料和浅地层剖面地震相无法准确划分, 因此将其作为整体进行计算(图 5)。

基岩顶界面: 即 T_3 界面, 是一个极强反射的界面, 易于连续追踪, 界面起伏很大, 反映了基岩的埋藏状况和起伏形态。基岩面以上沉积层声速反演即以基岩顶界面为准: 在浅地层剖面穿过相应的钻孔处, 经过畸变校正后得到声波垂直入射至 T_3 界面的单程

表 1 全新世沉积层声速反演示例

Table 1 Sound velocity inversion for Holocene sequence

| 浅地层剖面数据信息 | | | | | 钻孔数据信息 | | 反演声速/ $m \cdot s^{-1}$ |
|-----------|------|--------|---------|----------|--------|--------|------------------------|
| 测线编号 | 水深/m | 层底埋深/m | 单程走时/ms | 校正后走时/ms | 过孔编号 | 层底埋深/m | |
| A2 | 6.76 | 11.77 | 7.36 | 7.83 | B23 | 12.40 | 1 583.65 |
| A5 | 6.10 | 13.89 | 8.68 | 9.25 | H43 | 14.00 | 1 513.51 |
| A5 | 6.10 | 11.96 | 7.48 | 8.02 | H27 | 11.80 | 1 471.32 |
| A5 | 6.00 | 10.70 | 6.69 | 7.21 | H15 | 11.50 | 1 595.01 |

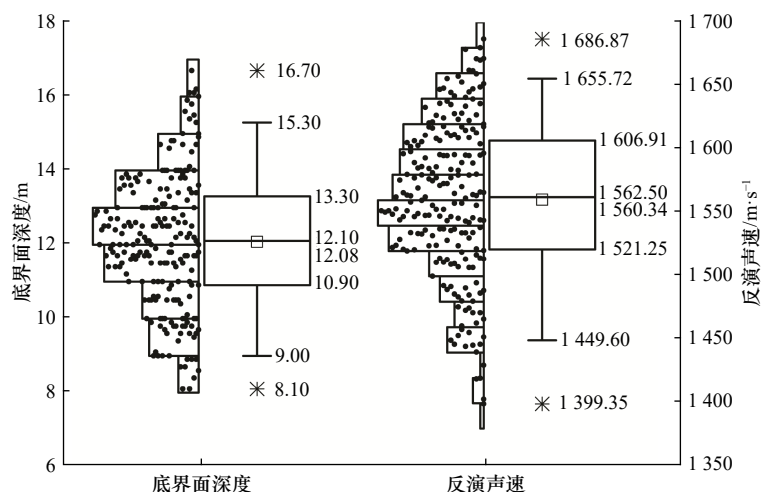


图 6 全新世声速反演结果

Fig. 6 Result of sound velocity inversion of Holocene sequence

走时,然后对比钻孔数据中基岩界面的深度,经反演计算得到基岩面以上沉积层的平均声速值。为保证反演结果的准确性,对反演采用的钻孔进行了筛选,将实际位置偏离浅地层剖面测线大于10 m的钻孔舍弃,只保留了70个钻探深度至中风化岩层的钻孔信息,反演后得到了84组声速数据,限于篇幅,本文只列举了示例剖面图中的3组数据,如表2所示,在浅地层剖面测线A5穿过钻孔H43、H27和H15处,基岩面以上沉积层的声速反演值分别为1 665.36 m/s、1 799.62 m/s和1 674.06 m/s。

如图7所示为基岩界面以上沉积层的反演结果箱型图,从图中可以看出,研究区内基岩界面的埋深一般在42.60~102.50 m之间,其95%置信区间为44.30~81.60 m,平均埋深为61.31 m。根据反演结果,研究区内基岩界面以上沉积层的平均声速在1 621.07~2 072.80 m/s之间,其95%置信区间为1 657.96~1 970.80 m/s,平均值为1 765.63 m/s。

3 分析与讨论

3.1 地层声速与深度之间的统计关系

Hamilton^[39]根据钻孔和声呐浮标数据采用多项式回归分析建立了3种主要类型沉积物的声速与埋深

之间的经验关系式,结果显示3种沉积物的声速与埋深都呈一定的正相关关系。但实际上,由于海底未固结松散沉积物中可能会存在高含水量的淤泥、软泥或浅层气等,声速会大大减小,形成声速结构异常现象,卢博^[40]提出在中国沿海大陆架可能存在3种海水-沉积物声速结构模式,着重强调在一些特殊海域的海底表层或浅层中可能存在低声速沉积层而导致不正常的声速梯度,即声速与深度之间并非简单的正相关关系。

针对本次研究区内采用反演方法得到的297组地层深度和平均声速的数据,本文采用回归分析方法研究了海底地层声速与深度之间的关系。回归分析采用了线性拟合和二项式拟合两种方法,结果表明两种方法拟合的相关系数相同,即二项式拟合不能提高数据拟合的相关系数,因此本文只给出了线性拟合结果。如图8所示,拟合分析结果表明,研究区内海底地层声速与埋藏深度之间呈现明显的正线性相关关系,拟合方程为

$$V = 1\,509.63 + 4.18d, \quad (3)$$

式中, V 为海底地层的平均声速; d 为以海底为起算面的地层深度;线性拟合的相关系数 R 为0.82。根据拟合数据的范围,式(3)作为声速预报公式的适用范围

表2 基岩面以上沉积层声速反演示例

Table 2 Sound velocity inversion for above-bedrock sequence

| 浅地层剖面数据信息 | | | | | 钻孔数据信息 | | 反演声速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
|-----------|------|--------|---------|----------|--------|--------|------------------------------------|
| 测线编号 | 水深/m | 层底埋深/m | 单程走时/ms | 校正后走时/ms | 过孔编号 | 层底埋深/m | |
| A5 | 6.10 | 59.67 | 37.29 | 38.13 | H43 | 63.50 | 1 665.36 |
| A5 | 6.10 | 66.03 | 41.27 | 42.12 | H27 | 75.80 | 1 799.62 |
| A5 | 6.00 | 49.14 | 30.71 | 31.54 | H15 | 52.80 | 1 674.06 |

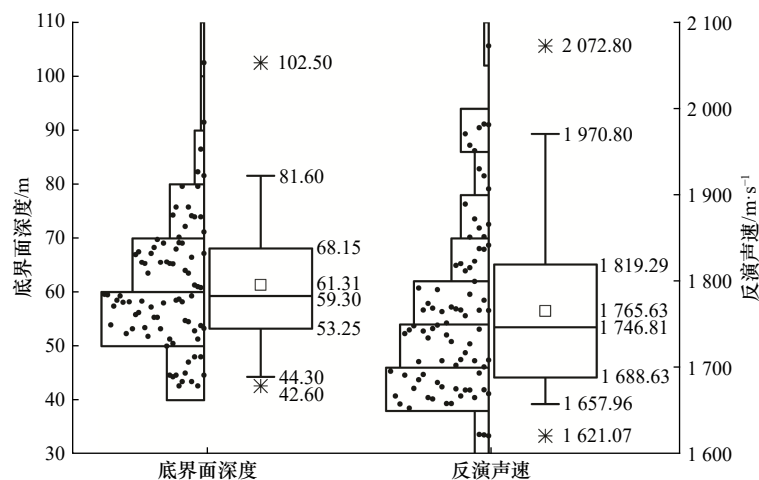


图7 基岩以上沉积层声速反演结果

Fig. 7 Result of sound velocity inversion of above-bedrock sequence

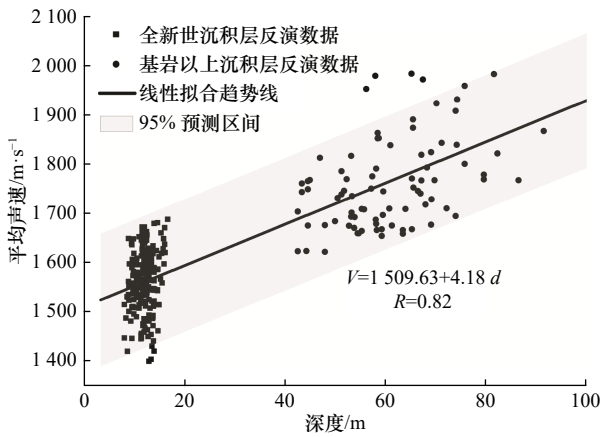


图8 地层声速与深度的拟合关系

Fig. 8 Fitting relation between sound velocity and depth of sediments

为 9.00~81.60 m。

由式(3)可见由于随着埋藏深度的增加, 沉积物压应力增大, 同时在长期固结压实的作用下, 导致了其颗粒间结构更加致密, 因此声速也变大。

从图8可以看出, 反演数据点根据反演层位的不同划分为两个明显的区域, 且由于数据点在深度上的分布不够均匀, T_1 界面处得到的声速点显得较为离散, 是由于研究区内全新世沉积层厚度变化不大且沉积物物理性质横向变化较大引起的。或许增加 T_2 界面以上沉积层(层 A+B)的反演数据效果会更好, 但由于剖面上 T_2 界面的确定和划分难以准确实现, 以及其相对于钻孔数据的对应层深也难以准确界定, 为保证反演的精度和可靠性, 本次未采用 T_2 界面的数据。

3.2 声速与沉积物物理力学性质参数之间的关系

声波在海底沉积物中的传播速度与沉积物的物

理性质之间有密切的关系, 代表沉积物物理力学性质的参数主要有: 含水率、密度、孔隙比、孔隙度、压缩系数和压缩模量等。随着沉积层厚度的增加, 沉积物所受的压应力增大, 其物理力学性质也会随之发生变化。以钻孔 B23 为例说明沉积物物理力学性质参数随深度的变化情况以及地层声速与各物理力学性质参数之间的相关关系, 这里的声速为根据式(3)和沉积物样品的取样深度推算而来。钻孔 B23 共取样品 52 个, 全新世沉积物为淤泥和淤泥质粉质黏土, 全新世以下沉积物为粉质黏土和黏土。

海底沉积物主要是由固体颗粒骨架和颗粒间孔隙中充填的流体组成的, 有时也会掺杂甲烷等气体。当声波在沉积物中传播时, 形象地说, 固相介质提供的是固体颗粒的声速和声波在固相中的传播路径, 而液相介质提供的则是孔隙中流体的声速和声波在液相中的传播路径, 固体颗粒与液相流体一起构成了声波传播的介质, 因此沉积物声速的大小与沉积物的固液两相特征密切相关。孔隙比是表示沉积物中孔隙多少的物理量, 是沉积物中孔隙体积与固体颗粒体积之比, 表征了饱和沉积物内固体颗粒与液体的两相体积的大小关系, 有时也用孔隙度表示。含水量表示沉积物中含水的数量, 是沉积物中水的质量与固体颗粒质量的比值, 含水量的大小间接反映了沉积物中孔隙的多少。图9a和图10a表明沉积物的含水率和孔隙比与取样深度之间都分别呈现较明显的负相关关系; 图9b和图10b表明地层声速与含水率和孔隙比之间也分别具有明显的负相关关系。也就是说, 随着地层深度的增加, 沉积物颗粒间的孔隙越小, 结构越致密, 声速也越大。

密度表示沉积物质量与体积的比值, 一定程度上

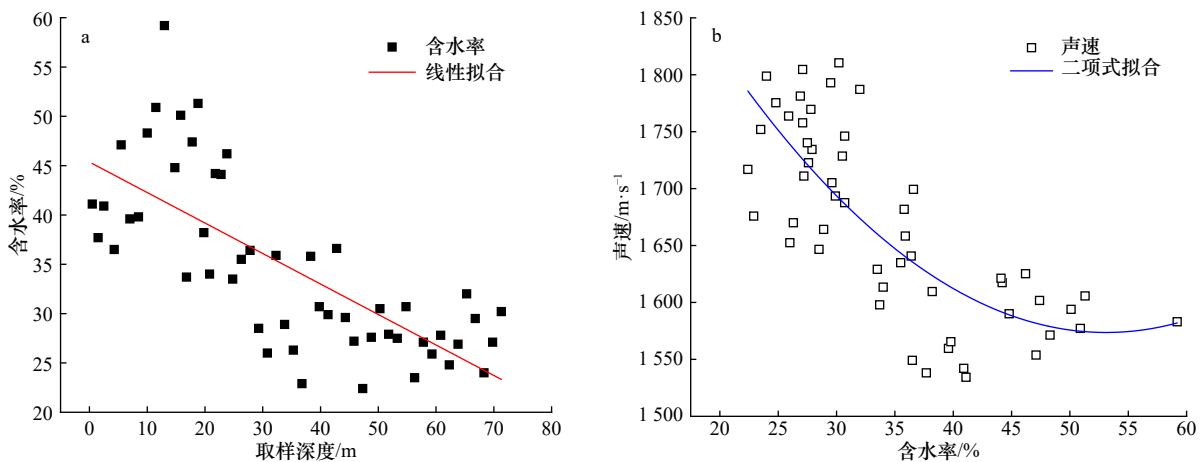


图9 含水率随深度的变化关系(a)及声速与含水率的关系(b)

Fig. 9 Water content versus depth (a) and sound velocity versus water content (b)

反映了沉积物的骨架成分和致密程度。一般来说,沉积物的密度越大,说明颗粒间接触越紧密,孔隙度越小。图 11a 和图 12a 表明沉积物的湿密度和干密度与

取样深度之间分别呈现较明显的正相关关系;图 11b 和图 12b 表明地层声速与湿密度和干密度之间也分别具有明显的正相关关系。也就是说,随着地层深度

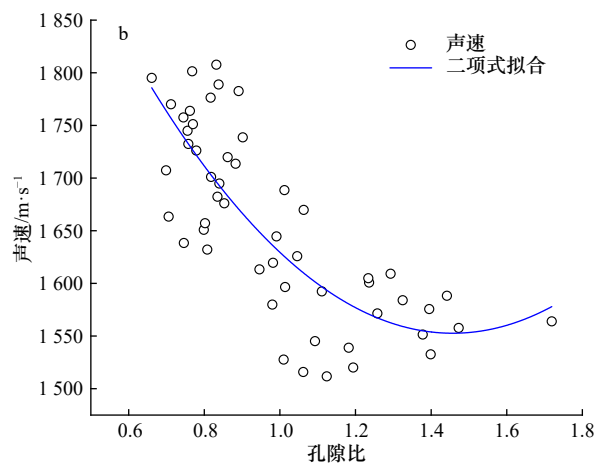
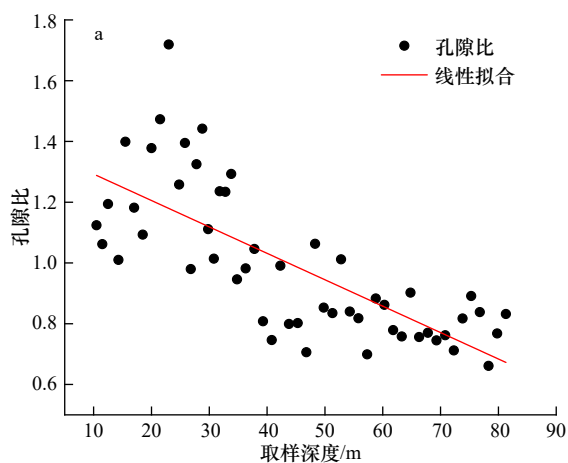


图 10 孔隙比随深度的变化关系(a)及声速与孔隙比的关系(b)

Fig. 10 Void ratio versus depth (a) and sound velocity versus void ratio (b)

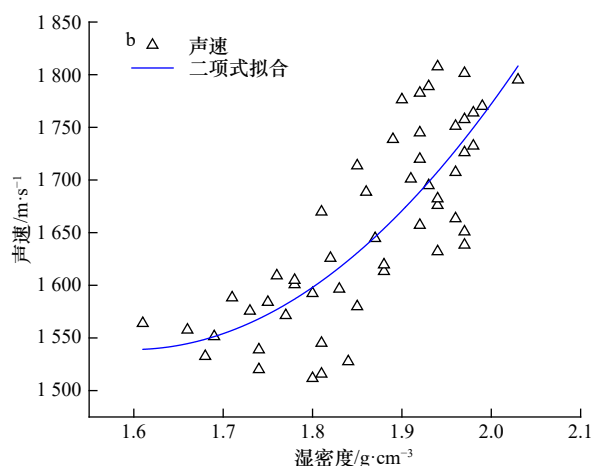
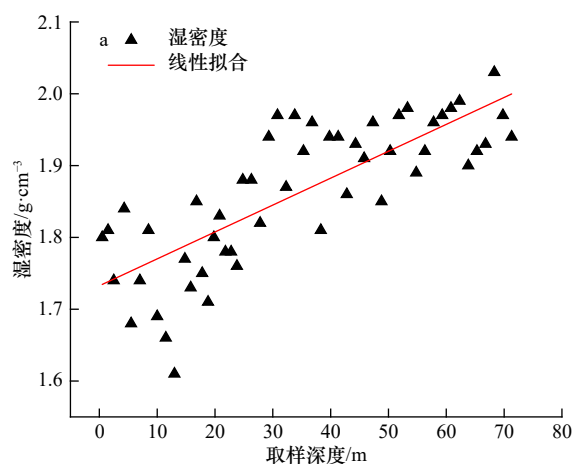


图 11 湿密度随深度的变化关系(a)及声速与湿密度的关系(b)

Fig. 11 Wet density versus depth (a) and sound velocity versus wet density (b)

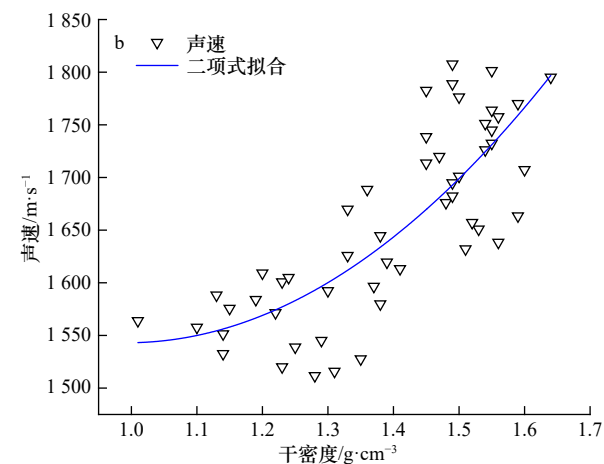
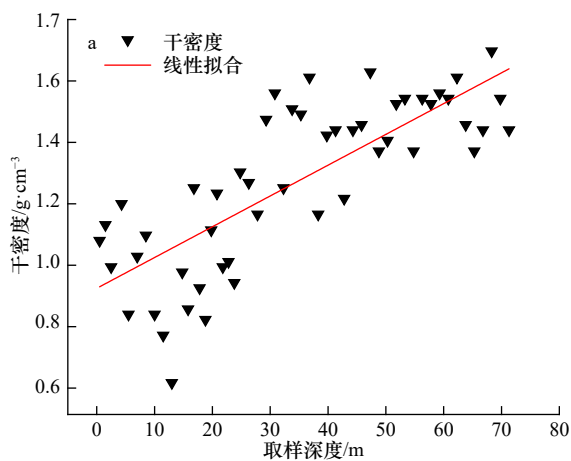


图 12 干密度随深度的变化关系(a)及声速与干密度的关系(b)

Fig. 12 Dry density versus depth (a) and sound velocity versus dry density (b)

的增加, 沉积物的密度越大, 声速也越大。

沉积物的压缩性是初始孔隙比(或孔隙、含水量、密度)和其微组分体积刚度的函数。此外, 还可能与其胶结状态和颗粒强度有关。压缩性反映了沉积物颗粒组分的性质、沉积环境、沉积后生物地球化学过程和应力历史等^[41]。压缩系数和压缩模量都是用于描述沉积物压缩性大小的常用物理量。压缩系数是指侧限压缩试验所得的孔隙比-有效应力曲线上 100~200 kPa 压力段的割线的斜率。压缩模量是在侧限情况下受到的竖向压应力与竖向总应变的比值。图 13a 和图 14a 表明沉积物的压缩系数和压缩模

量与取样深度之间分别呈现较明显的负相关和正相关关系; 图 13b 和图 14b 表明地层声速与压缩系数和压缩模量之间也分别呈现较明显的负相关和正相关关系。也就是说, 随着地层深度的增加, 沉积物的可压缩性越小, 产生相同的竖向变形量所需要的压应力越大, 声速也越大。

3.3 声速反演误差分析

本文声速反演的误差主要来源于两个方面: 浅地层剖面的界面划分和钻孔数据的分层深度, 其误差范围如表 3 所示, 对声速反演误差的影响分析如下:

(1) 浅地层剖面的界面划分误差来源于解释人员

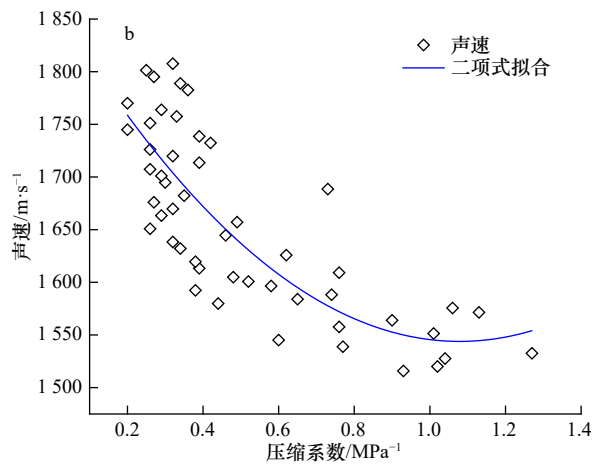
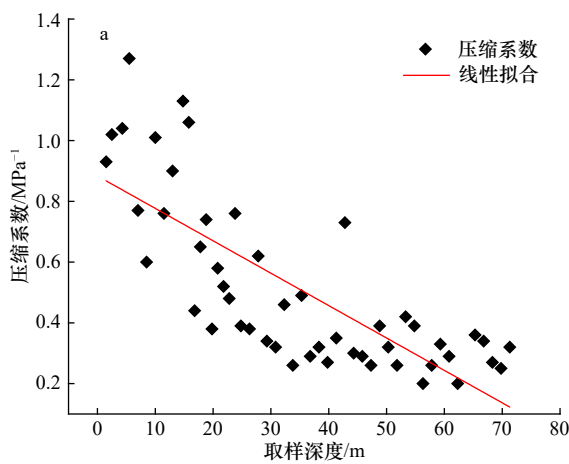


图 13 压缩系数随深度的变化关系(a)及声速与压缩系数的关系(b)

Fig. 13 Compressibility versus depth (a) and sound velocity versus compressibility (b)

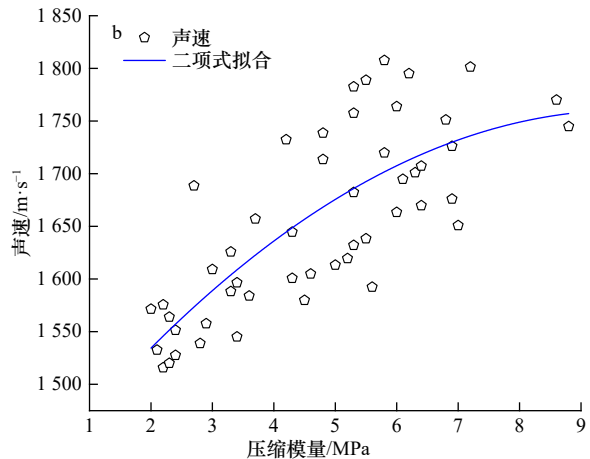
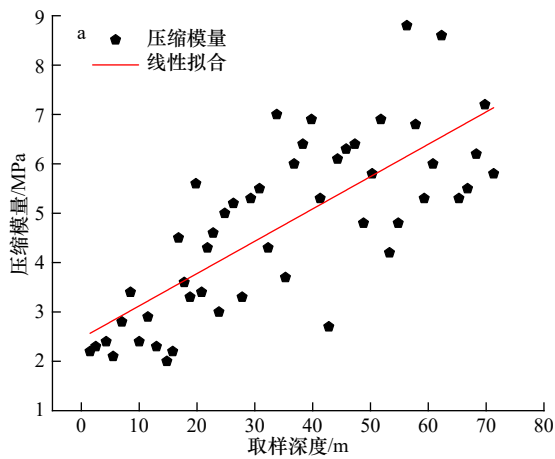


图 14 压缩模量随深度的变化关系(a)及声速与压缩模量的关系(b)

Fig. 14 Compressive modulus versus depth (a) and sound velocity versus compressive modulus (b)

表 3 声速反演的误差分析

Table 3 Error analysis of sound velocity inversion

| 误差来源 | 误差大小 | 分层界面最浅时反演误差 | 分层界面最深时反演误差 |
|--------|-------------|-------------|-------------|
| 浅剖界面划分 | ±0.1 ms | ±14.02 m/s | ±1.10 m/s |
| 钻孔分层深度 | ±1 m/±1.5 m | ±92.59 m/s | ±10.98 m/s |

对界面的准确确定和数字化误差,由于文中反演界面选用的是全新世沉积层底界面 T_1 和基岩界面 T_3 ,容易识别和追踪,可避免界面确定误差的产生;而在界面的数字化时通过专业软件的局部放大功能可将其误差控制在 ± 0.1 ms。当界面深度最浅,即 8.10 m 时,换算到反演声速的误差为 ± 1.39 m/s,当界面深度最深,即 102.50 m 时,换算到反演声速的误差为 ± 1.10 m/s。

(2) 钻孔数据的分层深度误差主要来源于钻探取样的深度间隔,本次钻孔的取样间隔根据钻孔深度有所不同:20 m 以浅时为 1 m,在 20 m 以深时为 1.5 m。因此可认为在全新世沉积层反演时钻孔分层深度的最大误差为 ± 1 m,在基岩以上沉积层反演时钻孔分层深度的最大误差为 ± 1.5 m。钻孔深度误差对声速反演误差的影响与反演界面的深度有关,当界面深度最浅,即 8.10 m 时,换算到反演声速的误差为 ± 92.59 m/s,当界面深度最深,即 102.50 m 时,换算到反演声速的误差为 ± 10.98 m/s。因此,考虑浅地层剖面界面划分和钻孔分层深度的综合影响,声速反演的综合最大误差为 ± 106.61 m/s。可以看出,影响声速反演精度的最主要因素为钻孔的分层深度误差,且对全新世沉积层的反演精度影响较大。因此若仅仅有单个或少数几个钻孔数据,本文的反演方法不太适用,反演精度不高,意义不大。若有大量的钻孔数据则可以形成多组反演数据,这时采用统计分析方法才具有较大的实际意义。

参考文献:

- [1] Hamilton E L. Geoacoustic models of the sea floor[M]//Hampton L. Physics of Sound in Marine Sediments. Boston, MA: Springer, 1974: 181-221.
- [2] Hamilton E L. Geoacoustic modeling of the sea floor[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68(5): 1313-1340.
- [3] 王方旗. 海底沉积物声速研究的意义、方法及展望[J]. *海洋技术学报*, 2016, 35(6): 96-104.
Wang Fangqi. Significance, methods and prospect of the research on sound velocity in seabed sediments[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2016, 35(6): 96-104.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
Zou Dapeng, Wu Baihai, Lu Bo. Analysis and study on the sound velocity empirical equations of seafloor sediments[J]. *Haiyang Xuebao*, 2007, 29(4): 43-50.
- [8] 邹大鹏. 海底沉积物压缩波声速比与物理特性的关系[J]. *声学学报*, 2018, 43(1): 41-51.
Zou Dapeng. Relationship between the sound speed ratio of the compressional wave and the physical characteristics of seafloor sediments[J]. *Acta Acustica*, 2018, 43(1): 41-51.
- [9] 龙建军, 李赶先. 海底沉积物声速与物理性质的理论关系[J]. *声学学报*, 2015, 40(3): 462-468.
Long Jianjun, Li Ganxian. Theoretical relations between sound velocity and physical-mechanical properties for seafloor sediments[J]. *Acta Acustica*, 2015, 40(3): 462-468.

4 结语

本文以渤海金州湾海域为例,基于高分辨浅地层剖面数据和大量对应的钻孔数据进行了全新世沉积层和基岩界面以上沉积层的声速反演研究:全新世沉积层平均声速的95%置信区间为1 449.60~1 655.72 m/s,平均值为1 560.34 m/s;基岩界面以上沉积层平均声速的95%置信区间为1 657.96~1 970.80 m/s,平均值为1 765.63 m/s;误差分析表明,声速反演精度受钻孔分层深度误差的影响较大,需有多组反演数据进行统计分析才具有较大的实际意义;拟合分析结果表明,研究区内海底地层声速与埋藏深度之间呈现明显的正线性相关关系,梯度为 4.18 s^{-1} ,可为附近及沉积环境类似海域的地声学模型的建立及浅地层剖面探测资料的解释提供声速参考。

本文基于高分辨率浅地层剖面信息的地层声速反演方法与传统的声速研究方法相比具有一定的优势:(1)浅地层剖面是非常成熟的探测海底浅层到深层的技术,数据采集和处理都具有稳定性和可靠性,可保证数据的可信度;(2)以原位声学反射数据为主,钻孔数据为辅,不存在样品扰动和测量误差等因素,声速反演只受浅地层剖面仪的分辨力和钻孔分层精度的影响;(3)若采用Boomer震源,既能保证高分辨率,又能实现较深的穿透,克服了当前多数研究方法只局限于海底表层的缺点,而这对于研究成果的实际应用非常重要。

- [10] Hamilton E L, Shumway G, Menard H W, et al. Acoustic and other physical properties of shallow-water sediments off San Diego[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1955, 28(1): 1007.
- [11] Hamilton E L. Low sound velocities in high-porosity sediments[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(1): 16–19.
- [12] Stokes T L, Dunn D A. Acoustic and physical property correlation of marine sediments from the texas-louisiana continental shelf[C]// *Oceans 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, 2001: 2624–2633.
- [13] 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.
Liang Yuanbo, Lu Bo. The physical mechanism of the influence of the mechanical properties of seabed sediments on the sound velocity[J]. *Haiyang Xuebao*, 1985, 7(1): 111–119.
- [14] 卢博, 梁元博. 海洋沉积物声速与其物理-力学参数的相关性[J]. *热带海洋*, 1991, 10(3): 96–100.
Lu Bo, Liang Yuanbo. Correlation of sound velocities and physico-mechanical parameters of marine sediments[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 1991, 10(3): 96–100.
- [15] 卢博, 梁元博. 中国东南沿海海洋沉积物物理参数与声速的统计相关[J]. *中国科学: B辑*, 1994, 24(5): 556–560.
Lu Bo, Liang Yuanbo. Statistical correlation between sound velocity and physical parameters of marine sediments in southeast china coast[J]. *Science in China: Series B*, 1994, 24(5): 556–560.
- [16] 卢博, 李传荣, 黄韶健, 等. 海底沉积物在应力-应变过程前后的微区变化特征[J]. *海洋学报*, 2000, 22(4): 130–136.
Lu Bo, Li Chuanrong, Huang Shaojian, et al. The Micro-area variance features of the seafloor sediment in stress-strain course back and forth[J]. *Haiyang Xuebao*, 2000, 22(4): 130–136.
- [17] 王方旗, 亓发庆, 姚菁, 等. 基于时间平均的海底沉积物声速预测[J]. *海洋学报*, 2012, 34(4): 84–90.
Wang Fangqi, Qi Faqing, Yao Jing, et al. A study on forecasting sound velocity of sea-floor sediments based on the time-average method[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(4): 84–90.
- [18] 侯正瑜, 郭常升, 王景强. 南沙海域深水表层沉积物声速与孔隙度相关关系[J]. *海洋科学*, 2013, 37(7): 77–82.
Hou Zhengyu, Guo Changsheng, Wang Jingqiang. Surface sediments acoustic velocity and porosity correlation in Nansha sea area abyssal region[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(7): 77–82.
- [19] 李赶先, 龙建军. 南海南部海域岛礁区海底珊瑚砂声速影响因素的初步研究[J]. *海洋学报*, 2014, 36(5): 152–160.
Li Ganxian, Long Jianjun. A preliminary study of the sound velocity influence factors of submarine coral sand of islands sea area in southern South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(5): 152–160.
- [20] Gorgas T J, Wilkens R H, Fu S S, et al. In situ acoustic and laboratory ultrasonic sound speed and attenuation measured in heterogeneous soft seabed sediments: Eel River shelf, California[J]. *Marine Geology*, 2002, 182(1/2): 103–119.
- [21] Kim H S, Cho G C, Kwon T H. Effect of CO₂ hydrate formation on seismic wave velocities of fine-grained sediments[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(6): 1787–1799.
- [22] Fu S S, Wilkens R H, Frazer L N. Acoustic lance: New *in situ* seafloor velocity profiles[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, 99(1): 234–242.
- [23] Best A I, Roberts J A, Somers M L. A new instrument for making in-situ acoustic and geotechnical measurements in seafloor sediments[J]. *Underwater Technology*, 1998, 23(3): 123–131.
- [24] Richardson M D, Briggs K B, Bibee L D, et al. Overview of SAX99: Environmental considerations[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(1): 26–53.
- [25] Buckingham M J, Richardson M D. On tone-burst measurements of sound speed and attenuation in sandy marine sediments[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(3): 429–453.
- [26] Richardson M, Briggs K, Reed A, et al. Characterization of the environment during SAX04: Preliminary results[C]. *Proceedings of the International Conference "Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results"*, 2005: 285–292.
- [27] Robb G B N, Best A I, Dix J K, et al. Measurement of the in situ compressional wave properties of marine sediments[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2007, 32(2): 484–496.
- [28] Ojha M, Sain K. Velocity-porosity and velocity-density relationship for shallow sediments in the kerala-konkan basin of western indian margin[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2014, 84(2): 187–191.
- [29] 陶春辉, 金肖兵, 金翔龙, 等. 多频海底声学原位测试系统研制和试用[J]. *海洋学报*, 2006, 28(2): 46–50.
Tao Chunhui, Jin Xiaobing, Jin Xianglong, et al. Development of multi-frequency in-situ marine sediment geoacoustic measuring system[J]. *Haiyang Xuebao*, 2006, 28(2): 46–50.
- [30] 郭常升, 窦玉坛, 谷明峰. 海底底质声学性质原位测量技术研究[J]. *海洋科学*, 2007, 31(8): 6–10.
Guo Changsheng, Dou Yutan, Gu Mingfeng. Development of in situ marine sediment acoustic measurement technique[J]. *Marine Sciences*, 2007, 31(8): 6–10.
- [31] 阚光明, 刘保华, 韩国忠, 等. 原位测量技术在黄海沉积声学调查中的应用[J]. *海洋学报*, 2010, 32(3): 88–94.
Kan Guangming, Liu Baohua, Han Guozhong, et al. Application of in-situ measurement technology to the survey of seafloor sediment acoustic properties in the Huanghai Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2010, 32(3): 88–94.
- [32] 侯正瑜, 郭常升, 王景强, 等. 一种新型海底沉积物声学原位测量系统的研制及应用[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(6): 1976–1984.

- Hou Zhengyu, Guo Changsheng, Wang Jingqiang, et al. Development and application of a new type in-situ acoustic measurement system of seafloor sediment[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(6): 1976–1984.
- [33] Bryan G M. Sonobuoy Measurements in Thin Layers, *Physics of Sound in Marine Sediments*[M]. New York: Plenum Press, 1974: 119–130.
- [34] 张叔英. 海底任意倾斜层的声速测量 (T^2-X^2 法的分析)[J]. *声学学报*, 1989, 14(3): 178–189.
Zhang Shuying. Acoustic velocity measurements of arbitrarily dipped sediment layers (the T^2-X^2 approach) [J]. *Acta Acustica*, 1989, 14(3): 178–189.
- [35] 张叔英. 海底薄地层和硬地层声速测量方法的研究 (射线参数法和折射法分析)[J]. *声学学报*, 1991, 16(3): 187–198.
Zhang Shuying. A study of measuring acoustic velocities of thin and hard sea-bed layers[J]. *Acta Acustica*, 1991, 16(3): 187–198.
- [36] 段永侯. 渤海海岸带变迁及其环境地质效应[J]. *水文地质与工程地质*, 2000, 27(3): 1–5.
Duan Yonghou. Coastline changes of Bohai Sea and their environmental-geological effect[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000, 27(3): 1–5.
- [37] 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 the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(1): 33–40.
- [38] 王方旗, 胡光海, 吴永亭, 等. 渤海金州湾海域声学浅地层剖面及其解释[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(1): 128–137.
Wang Fangqi, Hu Guanghai, Wu Yongting, et al. Acoustic subbottom profile and their interpretations in the Jinzhou Bay of the Bohai Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(1): 128–137.
- [39] Hamilton E L. Sound velocity gradients in marine sediments[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1979, 65(4): 909–922.
- [40] 卢博. 海水—沉积物声速结构模式[J]. *海洋通报*, 1995, 14(2): 42–47.
Lu Bo. Model of sound velocity structure in seawater-sediments[J]. *Marine Science Bulletin*, 1995, 14(2): 42–47.
- [41] Brandes H G, Silva A J, Walter D J. Geo-acoustic characterization of calcareous seabed in the Florida Keys[J]. *Marine Geology*, 2002, 182(1/2): 77–102.

Statistical characteristics of seabed sound velocity in the Jinzhou Bay based on high resolution sub-bottom profile data

Wang Fangqi¹, Tao Changfei¹, Lin Xubo¹, Dong Lifeng¹

(1. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Abstract: The sound velocity of marine sedimentary sequence is an important parameter. Finding out the changing rule of the seabed sound velocity is of extremely important significance. On the basis of distortion correction, by comparatively analyzing of high resolution sub-bottom profile data and borehole data, the accurate inversions of sound velocity in Holocene and above-bedrock sedimentary sequence are achieved in the Jinzhou Bay, Bohai Sea, China. Then, the characteristics and changing rules of seabed sound velocity in the study area are analyzed and discussed by statistical method. The 95% confidence interval of sound velocity of Holocene sequence is 1 449.60 m/s to 1 655.72 m/s, and the average is 1 560.34 m/s. The 95% confidence interval of sound velocity of above-bedrock sequence is 1 657.96 m/s to 1 970.80 m/s, and the average is 1 765.63 m/s. There is a significant positive linear correlation between the sound velocity of the sedimentary sequence and the burial depth in the study area, and the gradient of sound velocity is 4.18 s^{-1} .

Key words: seabed sound velocity; sound velocity inversion; sub-bottom profile; statistical characteristics