

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.01.015

利用单道地震反射数据预测海南岛东部近海砂层分布

罗昆, 刘刚, 薛玉龙, 潘燕俊, 陈文

(海南省海洋地质调查研究院, 海口 570206)

摘要:海南岛东部滨海砂矿含有丰富的稀有元素和贵金属, 是一种潜在的矿产资源。根据不同矿物组分的沉积物存在地震波阻抗差异的特点, 采用高分辨率单道地震反射勘探方法可以快速、有效地刻画海洋浅部沉积中砂矿的空间分布特征。介绍了利用地震属性聚类/分类方法对海南岛东部近海采集的单道地震数据进行地震相到沉积相的转换, 实现对这一区域含砂矿沉积层的识别, 然后与钻孔结果对比和综合分析, 进而从空间上刻画砂层空间分布范围, 为砂矿资源量估算提供准确参数。

关键词:砂矿; 单道地震勘探; 地震属性; 分布; 海南岛

中图分类号: P315

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)01-0125-06

滨海砂矿主要指有用矿物在滨海环境下富集而成的具有工业价值的砂矿, 因含有大量稀有和贵金属元素而备受关注, 具有矿物品种多、储量大、品位高、开采方便等特点, 是目前最大的潜在矿产资源之一^[1-3]。在目前的海底矿产资源开发中, 其产值仅次于海底石油和天然气。如澳大利亚、塞拉利昂、莫桑比克、肯尼亚、马达加斯加、印度和越南等国家, 滨海钛铁矿的储量和产量都占据相当重要的地位^[2]。我国海域辽阔, 大陆海岸线长达 18 000 km, 砂质海岸的长度占 1/4, 良好的自然环境、水动力条件、丰富的陆源沉积物来源和沉积环境使得近岸及广阔的大陆架浅海区域成为砂矿富集带。目前我国已经探明具有工业储量的滨海砂矿主要有锆石、钛铁矿、独居石、金红石、磁铁矿、砂锡矿、铬铁矿、铌钽铁矿、石英砂和金等 11 种, 资源储量达三十多亿吨。其中南海北部浅海发现和圈定的主要矿物包括钛铁矿、金红石、锆石、独居石等, 面积约为 9 210 km², 分布于粤西、雷西、桂东、琼东南等近岸滨海带^[4-7]。

海南岛东部近海区域, 其环岛海岸类型多样, 有利于砂矿沉积和富集并形成砂矿资源, 矿种有钛铁矿、锆石、独居石等, 其中锆、钛等砂矿储量居全国前列^[8-10]。2008—2012 年期间, 海南省海洋地质调查研究院在此区域实施“海南岛近岸浅海锆钛砂矿工业指标动态评价”公益科研专项, 开展单道地震测量、单波束同步测深、底质柱状取样、沉积动力调查、

地质浅钻及样品测试分析等工作。初步查明区域内地形地貌、水深变化、沉积物类型及分布特点, 了解海底浅地层结构、沉积动力现状, 分析砂矿的矿物组成及含量、物相、粒度、赋存状态、自然解离度及矿物学等特征, 新发现金红石、锆英石砂矿体 2 处。

本文主要探讨利用单道地震数据, 结合地质取样、浅钻和样品分析结果, 根据砂体在沉积地层中的地震反射特征, 提取能反映砂体存在的多种地震属性, 同时结合波形特征进行聚类分析, 将地震相转化为沉积相, 达到预测砂体分布范围的目的。

1 区域地质背景

研究区位于海南岛东部近浅海, 北起文昌市木兰头, 南至陵水湾北侧陵水角(图 1), 西面基本以岸线为界(跨越岸线长约 350 km), 东部界线大致为 70 m 水深线, 东西向宽约 30 km, 总面积为 4 316 km²。研究区位于华南褶皱系南段, 沉积有不同地质时代地层, 经历了海西、印支、燕山等多期构造运动和岩浆活动, 构成多种矿体富集的基础^[10]。矿体富集区处于被动大陆边缘海岸, 整体表现为海岸向中央海盆呈阶梯状断块层层断落, 其中浅滨海区域依次分布滨岸堆积岸坡(水深一般小于 50 m)、浅海陆架堆积阶地(水深 50~150 m)、陆架外缘斜坡(水深大于 150 m)三大地貌单元^[4,5]。

区域内沉积物的空间分布格局主要受控于末次冰期以来的海平面变化和古环境演变。自现代海岸向陆架方向, 横向上依次为高位体系域沉积、海侵体系域沉积和低位体系域沉积, 大体呈北东向条带状自西向东展布。浅层地震和钻探数据表明, 海南岛

基金项目: 海南省国土环境资源厅项目(HZ2015-235)

作者简介: 罗昆(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地球物理勘查及遥感、海洋地质工作, E-mail: luokun268@163.com

收稿日期: 2016-07-11; **改回日期:** 2016-10-25. 文凤英编辑

东部岸坡至陆架的沉积物在纵向上也具有明显分段特征,上中下段沉积物与横向上的体系域对应^[4]。

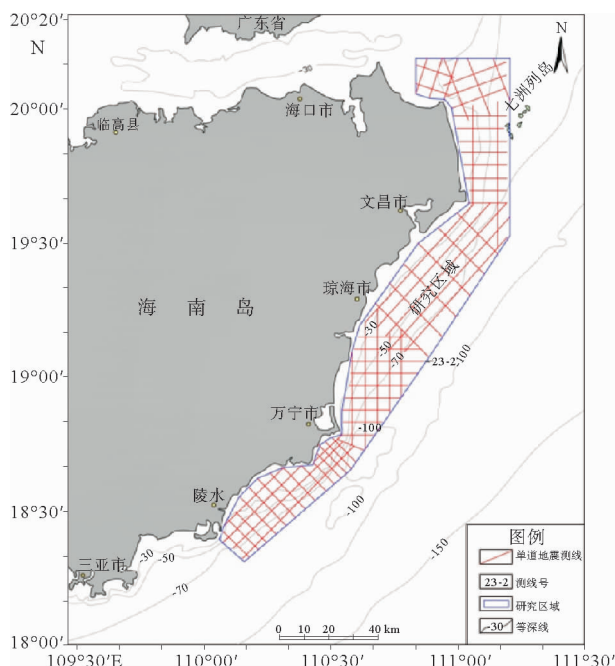


图 1 研究区位置图

Fig. 1 The location of study area

第四纪以来,研究区发育下更新统秀英组(Qp^1z 、 Qp^1x)、中更新统北海组(Qp^2b)、上更新统八所组(Qp^3bs)、下全新统万宁组(Qh^1w)、中全新统琼山组(Qh^2q)和上全新统烟墩组(Qh^3y)共 6 组地层。矿体主要赋存于约 50~70 m 水深的海底表层,以平缓、近层状产出于第四系上更新统至下全新统万宁组(Qp^3-Qh^1w)粉细砂-泥质粉砂层中,垂直等深线向东南倾斜。组成物质以粉细粒含金红石、锆石石英砂为主,有用矿物以金红石、锆英石为主,伴生有钛铁矿、白钛石,并含少量稀土矿^[9,10]。

2 单道地震反射数据采集处理及属性聚类分析

2.1 地震数据采集

研究区单道地震数据采集采用拖曳等时激发模式。采集系统为英国 AAE 公司生产的 SBP,可在水深小于 2 000 m 的海域作业。激发采用 Sparker 电火花震源,能量为 50~2 400 J,激发频率为 500 Hz~12 kHz,可穿透深度为 80 m(泥质底层)。检波器响应频率为 140~10 kHz,灵敏度优于 -167 dBV/ μ Pa。导航定位系统由 Trimble

SPS351 信标机、南方自由行导航软件与其他外设组成,定位误差优于 0.5 m。数据采集间隔为 0.051 ms,记录长度为 300 ms。

2.2 地震数据处理

高分辨率采集的海洋单道地震数据通常存在较大噪音,主要包括洋流波浪、机械振动、船动力、海洋生物等引起环境噪音,以及由震源或次生震源形成的干扰背景,如直达波、多次波、绕射波和气泡效应等。在勘探区域水深较浅时,影响最大的是风浪和涌浪干扰。浪的存在使震源激发、检波点接收不能处于一个相对稳定的深度,造成数据反射同相轴常出现波浪状起伏,在地震反射剖面上出现反射层位错乱,严重影响数据的分辨率与信噪比。水深越浅,涌浪造成的激发、接收点深度变化(上升或下降)对数据品质的影响越明显^[11-14]。

图 2 上图为原始单道数据,噪音类型主要为涌浪背景噪音、多次波及随机噪音干扰等。由于研究区水深较浅,地震数据采集频率较高、地震子波周期短,涌浪导致海底及沉积地层的反射同相轴不清晰,在横向上“抖动”现象严重(见图 2 内置放大图)。为了保证数据的后续可利用性,处理主要集中在背景噪音消除、涌浪静校正、多次波和随机噪音压制等几个方面,其中涌浪静校正最为关键。背景噪音消除采用带通滤波方法,涌浪静校正采用统计模型道互相关分析与中值均值滤波技术,分别消除长周期低频涌和短周期浪的影响;基于地震反射剖面上多次波与有效反射相交的特点,其压制采用模式识别方法;随机噪音压制主要采用 FX 域滤波方法。图 2 下图为处理后地震反射数据,其海底形态、微地貌及地层反射特征均得到突出,数据的信噪比和分辨率明显提高。

2.3 属性聚类分析

地震属性是由地震数据衍生出的几何形态、运动学、动力学以及统计特征的特别量度,能够反映地质条件与岩性的变化。根据预测目标的地震反射波特征,联合利用多种地震属性可以检测某些特殊的地质体^[15,16]。滨浅海沉积物的地层展布整体上较稳定,但其矿物含量在不同地层存在一定的差异并导致波阻抗的差异,这也构成地震方法得以应用的前提条件。当沉积层含有较多的砂质成分时,其阻抗相对于泥质背景变大,在地震反射剖面上呈现强反射特征,其振幅类属性也表现为强值。

图 3 为研究区 Z3-2 地震测线的瞬时振幅、甜点

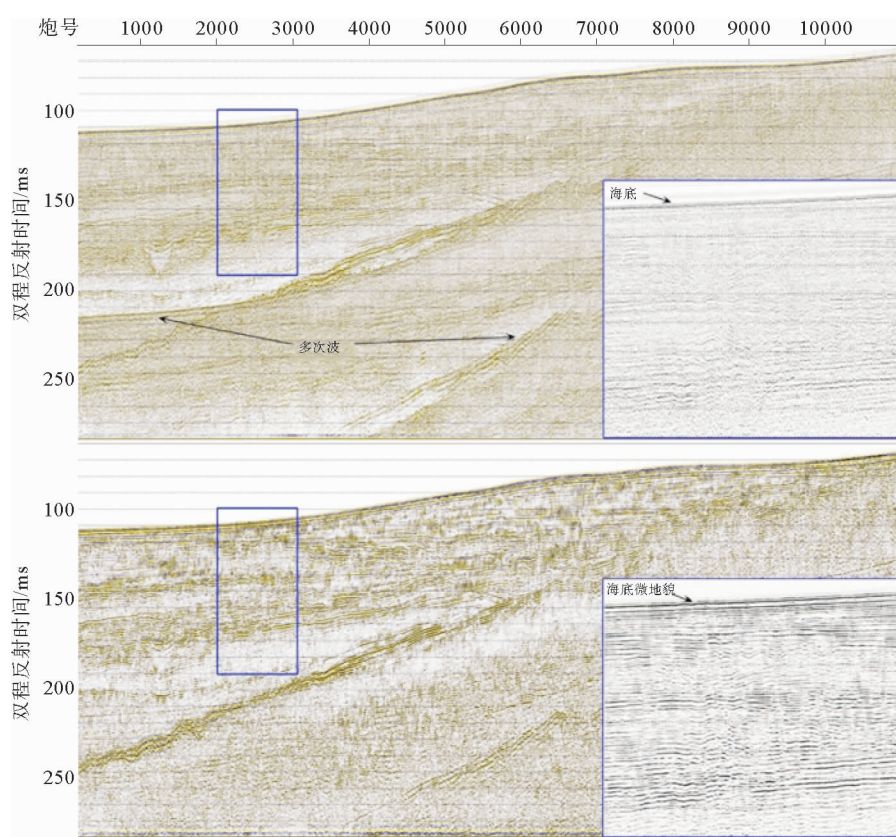


图 2 原始地震数据及处理后数据剖面对比

Fig. 2 Comparison of a seismic profile with that after de-noising

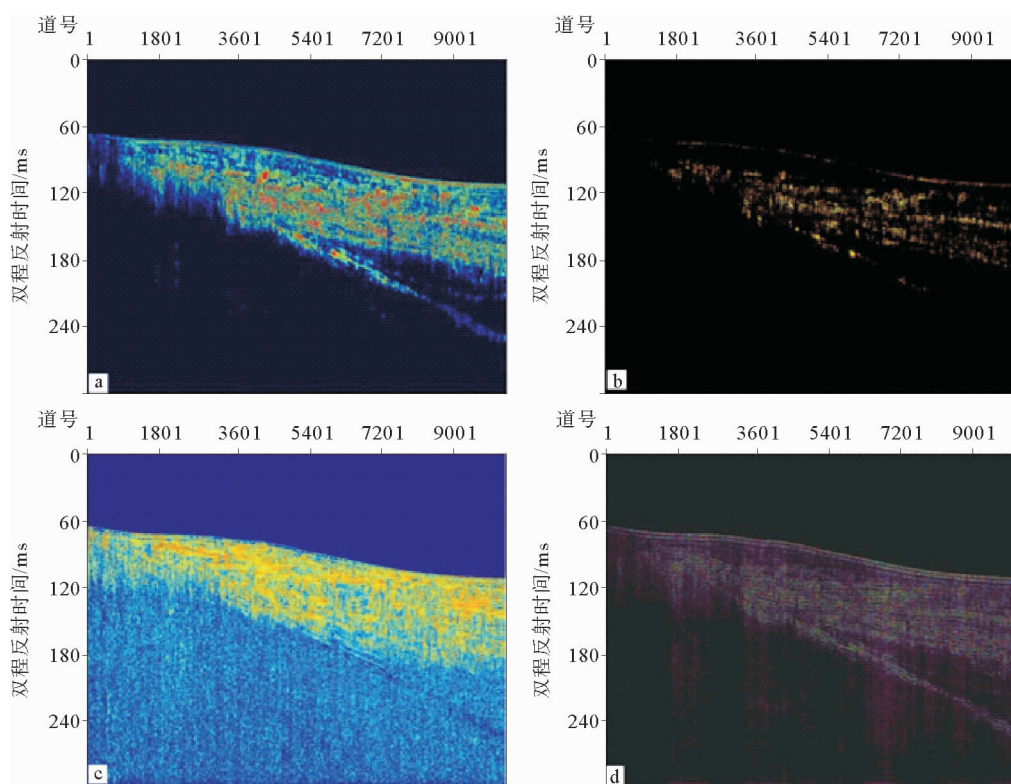


图 3 (a)瞬时振幅、(b)甜点、(c)瞬时频率及(d)相对波阻抗属性

Fig. 3 (a)Attributes of instantaneous amplitude, (b)sweet, (c)instantaneous frequency and (d)relative impedance

(振幅与频率的组合)、瞬时频率和相对阻抗等 4 种地震属性剖面图,在海底之下 60 ms 左右的时窗内,呈现强振幅和优良甜点的属性特征,同时呈现低频属性和强波阻抗特征,其中瞬时振幅与甜点属性对强阻抗具有较强的刻画能力。由于单属性具有多解性,为了更明显地突出强阻抗特征并减少预测的不确定性,将这两种地震属性与地震反射波形结合进行属性聚类分析,可以得到强振幅反射体的空间分布(图 4)。

3 讨论

利用单道地震反射数据并结合周边区域的地质研究成果,对地震反射特征进行地质解释并初步确定 4 个反射界面(图 5),结合钻孔资料,对其地质属

性进行了厘定,其中 T_1 对应上全新统烟墩组(Qh^3y)底界,属滨海砂堤——潟湖系列的沉积,岩性为灰、灰白、灰黄色砂,灰黑色黏土质砂、有机质黏土、粉砂质黏土及海滩岩,厚 5~20 m; T_2 对应中全新统琼山组(Qh^2q)底界,为滨海潟湖相沉积,岩性以灰、深灰色黏土、亚黏土为主,局部富含有机质; T_3 对应下全新统万宁组(Qh^1w)底界,属河口三角洲相沉积,岩性为深灰色黏土、粉砂质黏土夹砾质中粗砂; T_4 对应上更新统八所组(Qp^3bs)底界,岩性主要为棕红、棕黄色砂,向下递变为黄色砂及灰白色砂,在研究区非常发育。需要指出的是,由于这一区域仅有少量的钻探数据,尤其是浅部地层可能存在缺失,因此仅仅根据单道地震数据的反射特征确定地层并不准确,反射界面也并不是与沉积地层界面完全对应。

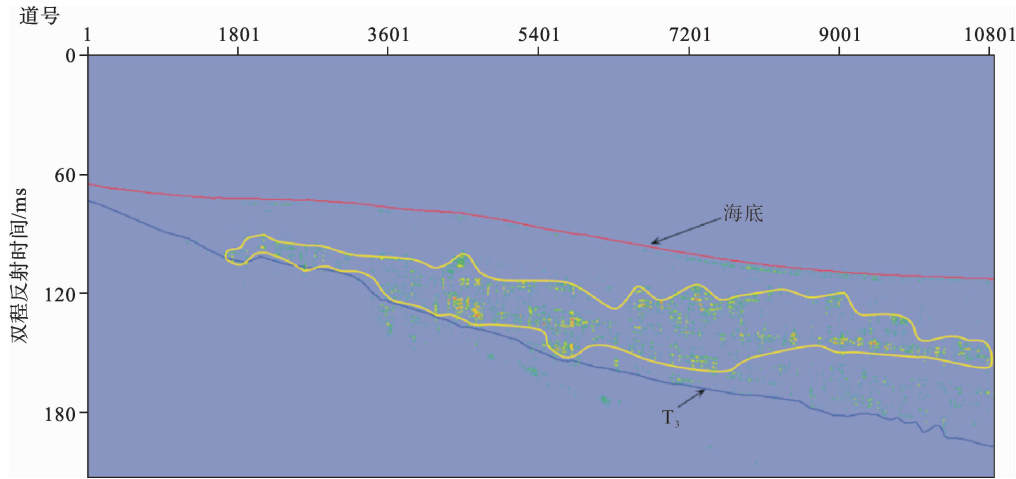


图 4 属性聚类分析结果
Fig. 4 The result of attributes clustering analysis

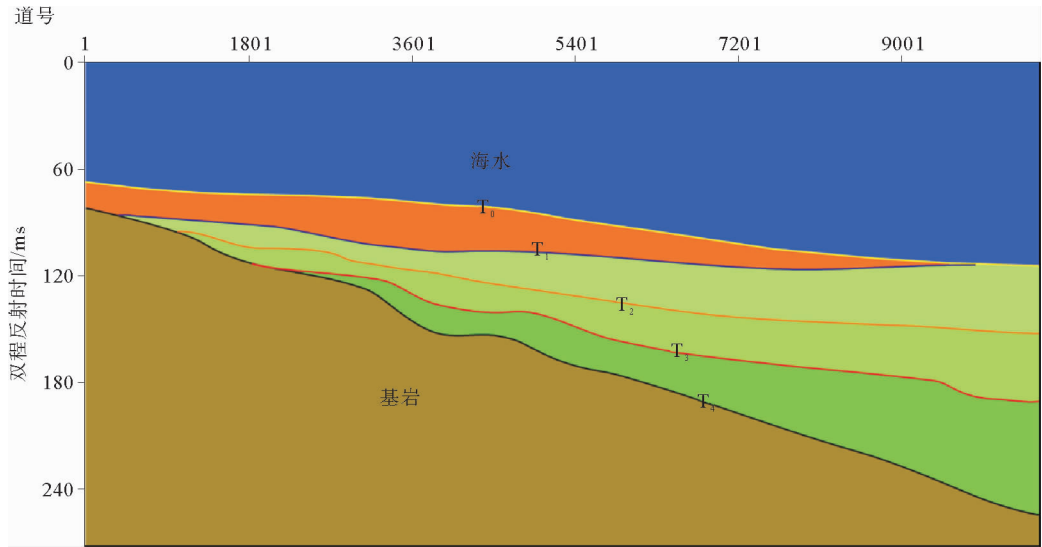


图 5 Z3-2 地震测线的地质解释
Fig. 5 Geological interpretation of seismic profile Z3-2

属性聚类分析结果(图4)表明,异常体少部分出现于 T_3 反射界面之下,主体出现于 T_3 反射界面之上覆地层,局部海底处有出露,即砂体主要位于下全新统万宁组地层及局部琼山组地层下部,与区域地质解释的岩性分布状态比较吻合。异常体(也就是可能的砂体)厚度为5~25 m,其中在水深约55~60 m处,矿体厚度最大,在研究区范围砂体呈带状分布,大体平行于海岸,呈连续或断续环带状向海延伸,局部富集区域可能与海岸类型及海岸线变化有关。

4 结论

本文对滨浅海砂矿调查获得的单道地震数据进行精细处理,使获得高信噪比地震反射数据不仅仅能用于地层的地质解释,还进一步尝试利用地震属性聚类方法刻画砂体的空间分布状态,这一研究为砂矿探测提供更多思路和依据。尤其在勘探初期,这一方法对于确定矿体的空间分布格局和资源量的初步计算是非常有意义的。

需要指出的是,由于浅海地震反射数据品质以及浅部地层自身特点(如为压实、岩性变化小、阻抗差异不明显等)存在限制,地震反射数据难以进行精确的地层标定,一定程度上影响结果的精度。同时,稀疏的二维测线对于矿体的空间预测精度也存在较大的影响,并且由于钻孔数据缺失,精确的层位和岩性标定及矿体的追踪等难以实现,使得预测的矿体空间分布的精度受到较大的影响。

参考文献 (References)

- [1] 谭启新. 中国的海洋砂矿[J]. 中国地质, 1998(4): 23-26. [TAN Qixin. Marine placer deposits in China [J]. Geology in China, 1998(4): 23-26.]
- [2] 杨子庚. 海洋地质学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004: 351-367. [YANG Zigeng. Marine Geology [M]. Jinan: Shandong Education Press, 2004: 351-367.]
- [3] 陈忠, 杨慧宁, 颜文, 等. 中国海域固体矿产资源分布及其区划——砂矿资源和铁锰(微)结核-结壳[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(5): 101-108. [CHEN Zhong, YANG Huining, YAN Wen, et al. Distributions and divisions of mineral resources in the sea areas of China: placer deposit and ferromanganese nodule/crust[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26(5): 101-108.]
- [4] 杨慧宁, 陈忠, 颜文, 等. 南海海域固体矿产资源与分布[M]//我国近海地质与矿产资源. 北京: 海洋出版社, 2005: 368-375. [YANG Huining, CHEN Zhong, YAN Wen, et al. Solid Mineral Resource and Its Distribution in South China Sea [M]. Beijing: China Ocean Press, 2005: 368-375.]
- [5] 张本. 海南海洋资源与开发[J]. 世界科技研究与发展, 1998, 20(4): 106-110. [ZHANG Ben. Hainan's marine resources and their exploitation[J]. World Science Research and Development, 1998, 20(4): 106-110.]
- [6] 杨道斐. 华南滨海砂矿分布特征和浅海找矿[J]. 海洋地质, 1993(4): 1-22. [YANG Daoferi. Distribution and exploration of littoral placer deposits in the southern China[J]. Chinese Marine Geology, 1993(4): 1-22.]
- [7] 孙岩, 韩昌甫. 我国滨海砂矿资源的分布及开发[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 117-122. [SUN Yan, HAN Changfu. Distribution and exploitation of placer deposit resources in China[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999, 19(1): 117-122.]
- [8] 陈春福. 海南省海岸带和海洋资源与环境问题及对策研究[J]. 海洋通报, 2002, 21(2): 62-68. [CHEN Chunfu. A study on the problem of the coast and ocean resources and environment in Hainan Province and the corresponding counter measures[J]. Marine Science Bulletin, 2002, 21(2): 62-68.]
- [9] 龙运波, 张裕书, 周满庚, 等. 海南万宁海滨砂矿选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2011(4): 14-17. [LONG Yunbo, ZHANG Yushu, ZHOU Mangeng, et al. Experimental research on mineral processing of beach placer from Wanning in Hainan Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2011(4): 14-17.]
- [10] 符启基, 岑辽. 浅论海南万宁东海岸锆钛砂矿集区的资源潜力[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(1): 6-8. [FU Qiji, CEN Liao. Discussion on resources potential in concentration area of Zr-Ti placer in East coast of Wanning, Hainan province[J]. Resources Environment and Engineering, 2008, 22(1): 6-8.]
- [11] 郑江龙, 许江, 李海东, 等. 海上单道地震勘探中船舶等背景噪声的影响分析及压制[J]. 应用海洋学报, 2015, 34(1): 18-22. [ZHENG Jianglong, XU Jiang, LI Haidong, et al. Analysis of how the background noise influencing the seismic data acquisition by single-channel seismograph[J]. Journal of Applied Oceanography, 2015, 34(1): 18-22.]
- [12] 李丽青, 陈泓君, 彭学超, 等. 海洋区域地质调查中的高分辨率单道地震资料关键处理技术[J]. 物探与化探, 2011, 35(1): 86-92. [LI Liqing, CHEN Hongjun, PENG Xuechao, et al. The main processing methods of high-resolution single-channel seismic data in marine regional geological survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(1): 86-92.]
- [13] 李军峰, 李文杰, 孟庆敏, 等. 高分辨率单道海上地震在香港海域沉积结构勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(1): 90-94. [LI Junfeng, LI Wenjie, MENG Qingmin, et al. The application of high resolution single channel marine seismic to the exploration of offshore Quaternary superficial deposits in Hongkong waters[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(1): 90-94.]
- [14] 丁维凤, 冯霞, 傅晓明, 等. 海上单道地震与浅地层剖面数据

- 海浪改正处理研究[J]. 海洋学报, 2012, 34(4): 91-98.
- [DING Weifeng, FENG Xia, FU Xiaoming, et al. Marine wave correction research on single channel seismic data and a subbottom profile [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(4): 91-98.]
- [15] 吕公河, 于常青, 董宁. 叠后地震属性分析在油气田勘探开发中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 161-166. [LV Gonghe, YU Changqing, DONG Ning. The application of post-stack seismic attribute analysis in the oil-gas exploration and development [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 161-166.]
- [16] 于建国, 姜秀清. 地震属性优化在储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 291-294. [YU Jianguo, JIANG Xiuqing. Application of seismic attribute optimization in reservoir prediction [J]. Oil and Gas Geology, 2003, 24(3): 291-294.]

PREDICTING SAND-LAYER DISTRIBUTION IN OFFSHORE AREA OF EASTERN HAINAN ISLAND WITH SINGLE-CHANNEL SEISMIC REFLECTION DATA

LUO Kun, LIU Gang, XUE Yulong, PAN Yanjun, CHEN Wen

(Institute of Marine Geological Survey of Hainan, Haikou 570260)

Abstract: Abundant rare elements and precious metals are found in the coastal deposits of the east Hainan Island. High-resolution single-channel seismic survey is conducted to effectively define the spatial distribution of the placers in the shallow part of the sea, according to the difference in seismic wave impedance in the sediments consisting of different minerals. Seismic attribute clustering/classification methods are used to put seismic facies into sedimentary facies so as to better understand the origin of the deposits. Then, in combination of drilling results, the spatial distribution of sand deposits is defined for resource assessment.

Key words: placer deposits; single-channel seismic exploration; seismic attribute; distribution; Hainan Island