



浅地层剖面和单道地震测量在海砂勘查中的联合应用

倪玉根, 习 龙, 夏 真, 何 健, 陈 梅, 李勇航, 李丽青

Combined application of sub-bottom and single-channel seismic profiles to marine sand and gravel resource prospecting

NI Yugen, XI Long, XIA Zhen, HE Jian, CHEN Mei, LI Yonghang, and LI Liqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2020072301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用单道地震反射数据预测海南岛东部近海砂层分布

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

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 125

浅水多次波衰减技术在多道地震数据处理中的应用

Application of attenuation technology to shallow water multiples in multi-channel seismic data processing

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 167

中国近海新构造活动断裂调查与地震勘探方法

Seismic survey and exploration methods for Neotectonic active faults in the area off China continent

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 121

现代长江水下三角洲浅地层地震相特征

Shallow seismic facies characteristics of the modern underwater delta of the Yangtze River

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 114

松辽盆地新民油田下白垩统泉四段浅水三角洲骨架单砂体空间发育特征

Spatial distribution patterns of single framework sand bodies of a shallow-water delta in the Cretaceous Quantou Formation of Xinmin Oilfield, Songliao Basin

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(4): 46

希尔伯特谱白化方法在海洋地震资料高分辨率处理中的应用

The application of Hilbert spectral whitening method to high resolution processing of marine seismic data

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(4): 212



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020072301

浅地层剖面 and 单道地震测量在海砂勘查中的联合应用

倪玉根, 刁龙, 夏真, 何健, 陈梅, 李勇航, 李丽青

中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760

摘要: 海砂需求激增导致其勘查开发力度不断加大, 埋藏海砂作为重要的海砂资源赋存类型, 开发其的环境影响相对较小, 但找砂难度相对较大。常用来勘查埋藏海砂的物探手段是单道地震测量, 其优点是可以穿透砂层, 而缺点是存在多解性。浅地层剖面由于难以穿透砂层, 在以往的海砂勘查中未得到足够的重视。本文利用浅地层剖面“易穿透泥难穿透砂”的特性, 通过其排除泥层间接探砂, 再结合单道地震直接识别砂层。泥层的浅地层剖面特征为易于识别的均质透明或层状反射, 砂层的单道地震特征为中强振幅连续性差的杂乱反射, 将泥层的间接排除法与砂层的直接识别法相结合, 形成“浅地层剖面排除泥层+单道地震识别砂层+钻孔验证”的埋藏海砂勘查方法, 可有效提高找砂成功率。

关键词: 海砂; 浅地层剖面; 单道地震; 地球物理勘查

中图分类号: P744

文献标识码: A

Combined application of sub-bottom and single-channel seismic profiles to marine sand and gravel resource prospecting

NI Yugen, XI Long, XIA Zhen, HE Jian, CHEN Mei, LI Yonghang, LI Liqing

Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510760, China

Abstract: The demand for marine sand and gravel is sharply increasing, which leads to the intensification of prospecting and exploitation offshore. As an important type of marine sand and gravel resources, extraction of buried marine sand and gravel has less environmental impacts. However, the prospecting of the buried sand and gravel deposits is relatively difficult. Single-channel seismic survey is commonly used to search for buried marine sand and gravel. It is advantaged by penetrating sand, whereas disadvantaged by multiple solutions. Sub-bottom profile has not been paid enough attention in previous marine sand and gravel investigations, due to the difficulties in penetrating sand. However, sub-bottom profile is easy to penetrate mud, and can be used to exclude the mud. In this paper, we propose a method by integrating sub-bottom and single-channel seismic profiles together. Mud could be easily recognized with the clear transparent or bedding structure on the sub-bottom profile, which could help avoiding the thick mud. Sand might be recognized by the medium-strong amplitude chaotic reflection on the single-channel seismic profile, which could guide to selecting the thick sand. Based on the understanding mentioned above, the method of "exclusion of thick mud by sub-bottom profile, identification of sand by single-channel seismic profile and verification by boreholes" is suggested for prospecting of buried marine sand and gravel so as to effectively improve the success rate of prospecting.

Key words: marine sand and gravel; sub-bottom profile; single-channel seismic profile; geophysical prospecting

海砂(海中的砂石),是指由岩石风化后经水流、冰川和风等地质营力侵蚀、搬运或改造,赋存于现代海洋环境的砂、砾质碎屑沉积物^[1]。随着人口和经济的增长,作为建筑和回填的基础材料,海砂的需求激增。因此,加强海砂资源勘查和合理开发显得尤为迫切。

海砂根据赋存状态可分为表层海砂和埋藏海砂(盖层海砂)。表层海砂是指直接出露于海底的海砂,一般与现代水动力条件处于平衡状态,属于

“活动型砂源”(active source^[2]);埋藏海砂是指上覆一定厚度泥质盖层的海砂,为地质历史时期沉积(多为更新世),属于“稳定型砂源”(passive source^[2])。从环境影响角度来说,开采近岸表层海砂(活动型砂源)可能会造成较严重的环境破坏,而开采埋藏海砂(稳定型砂源)的环境影响则相对较小^[2]。从找砂难易程度来说,表层海砂相对简单,通过地形地貌和底质调查即可识别,再通过钻探即可查明砂层厚度;而对于埋藏海砂,由于其隐伏于泥层之下,找

资助项目:中国地质调查局项目“海南福建等近海重点区矿产资源调查”(DD20201175);原广东省海洋与渔业厅海砂资源调查项目

作者简介:倪玉根(1984—),男,高级工程师,主要从事海岸带/近海地质资源与环境调查研究, E-mail: niyugen@163.com

收稿日期:2020-07-23; 改回日期:2020-10-14. 文凤英编辑

砂难度较大,地形地貌和底质调查无能为力,必须先采用物探手段探查,锁定目标后再进行钻探。

目前,常用来识别埋藏海砂的物探手段是单道地震^[3-10]。单道地震探砂的优点是其信号可穿透砂层,属于直接探测法,但缺点是存在多解性,只依据单道地震识别砂层存在不确定性。因此,在进行埋藏海砂勘查时,需要多种物探手段结合,互相约束,从而提高找砂的成功率。浅地层剖面是可与单道地震结合进行埋藏海砂勘查的物探手段之一,浅地层剖面信号频率较单道地震高,信号在砂层中衰减严重,穿透较差;在泥层中衰减较弱,具有较好的穿透。由于浅地层剖面难以穿透砂层,因此在以往的海砂勘查中未得到足够的重视,甚至都不部署,利用浅地层剖面勘查埋藏海砂的研究也鲜有报道。

本文转换思路,利用浅地层剖面可较好穿透泥层、但较难穿透砂层的特性,采用排除法,通过其排除泥层,再结合单道地震直接识别砂层,并经钻孔验证,最终形成一套埋藏海砂的识别方法,从而提高找砂准确率。

1 数据采集

由于有些研究中对浅地层剖面和单道地震测量的界定与本文存在分歧^[9-10],为避免争议,本文所指的浅地层剖面和单道地震测量概念如下。

浅地层剖面测量:由调查船安装浅地层剖面测量系统进行走航式探测。浅地层剖面测量系统(非拖曳式)一般由处理单元和换能器组成,通过换能器向水下垂直发射声波信号,再由换能器接受回波信号,并经信号处理可显示海底浅部地层结构。一般浅地层剖面测量频率大于3 000 Hz,垂向分辨率可达厘米级,穿透深度一般几十米(视地层性质和噪音影响等而定)。

单道地震测量:由调查船搭载单道地震测量系统进行走航式探测。单道地震测量系统一般由震源系统和电缆接收系统组成,一点激发一道接收,由震源系统(Sparker等)激发产生探测信号,由电缆接受回波信号,并经信号处理可显示海底中浅部地层结构。一般单道地震测量频率为3 000 Hz至几百赫兹,垂向分辨率米级,穿透深度可达100 m以上(视地层性质和噪音影响等而定)。

1.1 浅地层剖面采集

本文浅地层剖面数据采集时间为2016年11月,调查船“海洋地质十八号”(原“奋斗五号”),所用

仪器为德国INNOMAR公司SES-2000 Medium型参量阵浅地层剖面仪。其由系统主机(包括数据采集计算机和发射接收单元)、换能器组成。主要技术参数:①主频约100 kHz;②差频3.5、5、6、8、10、12、15 kHz(可选);③工作水深5~2 000 m;④最大穿透深度70 m;⑤地层分辨率可达5 cm。

数据采集:①浅剖仪侧舷固定安装,换能器吃水深度3.3 m;②采集频率6 kHz;③声速1 520 m/s;④记录长度60 m,记录延时根据水深进行调整;⑤测量中船速控制在4~6 kn,并尽量保持恒速;⑤数据记录格式为*.ses。

数据解释和解释采用德国INNOMAR公司的ISE2.91软件。

1.2 单道地震剖面采集

本文的单道地震与浅地层剖面同步采集,单道地震测量系统由记录系统、震源系统和接收电缆3个部分组成:①记录系统:Ixblue Delph Seismic数字单道地震记录系统;②震源系统:SIG 2mille电火花震源系统;③接收电缆:GEO-SENSE 48型电缆。

数据采集:①震源能量1 000 J,激发间隔1 000 ms;②电极距离船尾约45 m,水听器中心点距离船尾约45 m;③电缆沉放深度约0.5 m,震源与接收电缆偏移距约7 m;④记录长度500 ms;⑤测量中船速控制在4~6 kn,并尽量保持恒速;⑤数据记录格式为SEG-Y。

数据处理采用Omega 2015地震资料处理系统,数据解释采用GeoSuite地震资料解释软件。

2 浅地层剖面和单道地震的联合应用

近年来,广州海洋地质调查局在华南近海开展了一系列海砂资源调查,在海砂调查实践中,浅地层剖面和单道地震联合应用取得了良好的效果。本文以珠江口磨刀门南海域为例,选取P7、P17两条物探测线(浅地层剖面和单道地震同步测量),以及线上ZK1~ZK6六口钻孔进行详细介绍(图1)。所选测线和钻孔水深约18~35 m,距离磨刀门口约16~37 km,所在海域底质为泥^[8,11]。其中,P7线垂直于岸线,走向NNW-SSE,长度约21 km;P17线平行于岸线,走向SWW-NEE,长度约22 km;6口钻孔岩性分层等信息见表1。

2.1 浅地层剖面

P7线浅地层剖面垂直于岸线,位于磨刀门河口

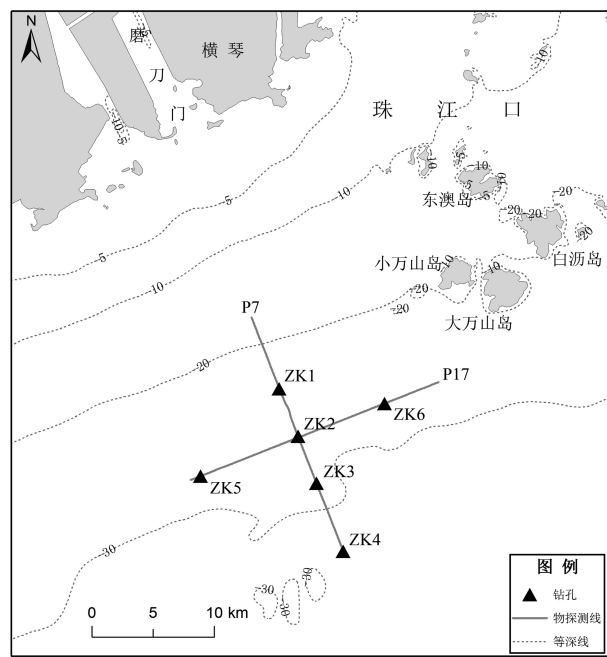


图 1 物探测线和钻孔位置
Fig.1 Location of geophysical survey lines and boreholes

(图 1)。剖面上可清晰识别出 R0(海底)和 R1 两个反射界面,结合 ZK1—ZK4 钻孔资料,R1 界面之上的 S1 层为浅剖信号能穿透的泥质层(图 2a、2b)。测线北部为磨刀门河口的泥质前积层,层理清晰,其下发育浅层气,导致 R1 反射界面在此处被屏蔽,泥质层厚度至少超过 10 m(受浅层气影响其底界不详),向海方向逐渐减薄(图 2a、2b)。测线中部为均质薄泥层,浅地层剖面上以透明的均质反射为特征,泥层总体厚约 5 m,局部见小型古河道充填沉积(图 2a、2b 和图 3a)。测线南部为古河道泥质充填沉积,以层状反射为特征,最深处厚度超过 25 m(图 2a、2b)。R1 界面之下为无反射区,经与钻孔(ZK1,ZK2 和 ZK3)比对,该界面为泥、砂层分界面,受砂层阻隔,浅剖信号难以穿透(图 2a、2b 和图 3a)。

P17 线浅地层剖面平行于岸线,垂直于 P7 线(图 1)。剖面上可清晰识别出 R0(海底)和 R1 两个反射界面,结合 ZK2、ZK5 和 ZK6 钻孔资料,R1 界面上部的 S1 层为泥质层(图 4a、4b)。测线西部至中部透明反射层为均质薄泥层,泥层厚度约为 4 m,局部见小型古河道充填沉积(图 4a、4b)。测线中部至东部为以层状反射为特征的大型古河道泥质充填沉积,泥质层厚度较大,底界被浅层气屏蔽,ZK6 钻孔显示泥层厚达 28 m(图 4a、4b 和图 5a)。经与钻孔(ZK2 和 ZK5)比对,与 P7 线相同,R1 界面为泥、砂层分界面,浅剖信号无法穿透其下砂层(图 4a、4b 和图 5a)。

表 1 钻孔岩性信息			
Table 1 Lithological information of borehole			
钻孔编号	水深/m	分层/m	岩性
ZK1	25.1	0~4.6	泥(流塑)
		4.6~8.7	泥质中粗砂
		8.7~19.0	粗砂
		19.0~22.1	砾质粗砂
		22.1~30.0	泥(软塑)
ZK2	30.5	0~6.0	泥(流塑)
		6~10.6	泥质中细砂
		10.6~23.1	中砂
		23.1~33.5	粗砂
		33.5~34.0	泥(可塑)
ZK3	34.3	0~3.8	泥(流塑)
		3.8~11.8	细砂
		11.8~15.7	中砂
		15.7~30.0	泥(软塑)
ZK4	34.9	0~14.4	泥(流塑)
		14.4~27.2	泥(软塑)
		27.2~29.5	泥质细砂
		29.5~31.0	泥(软塑)
ZK5	31.9	0~2.6	泥(流塑)
		2.6~3.7	泥质细砂
		3.7~15.4	中砂
		15.4~18.1	泥(可塑)
		18.1~21.8	泥质中细砂
ZK6	29.0	21.8~30.0	泥(软塑)
		0~10.8	泥(流塑)
		10.8~28.1	泥(软塑)
		28.1~30.0	细砂
		30.0~32.8	中粗砂
		32.8~33.5	泥(可塑)

综上,浅地层剖面对泥层具有较好的穿透性,而较难穿透砂层。根据浅地层剖面的这个特性,可通过排除法找埋藏海砂,即浅地层剖面穿透深的地方(如 P17 线东部,层状反射和透明均质反射厚度较大)是泥层厚的地方,找砂时应予以避开;浅地层剖面穿透较差的地方,泥层较薄,可暂定为目标区。由于浅地层剖面难以穿透砂层,故无法获取泥层之下砂层的具体信息,如砂有几层,砂有多厚。

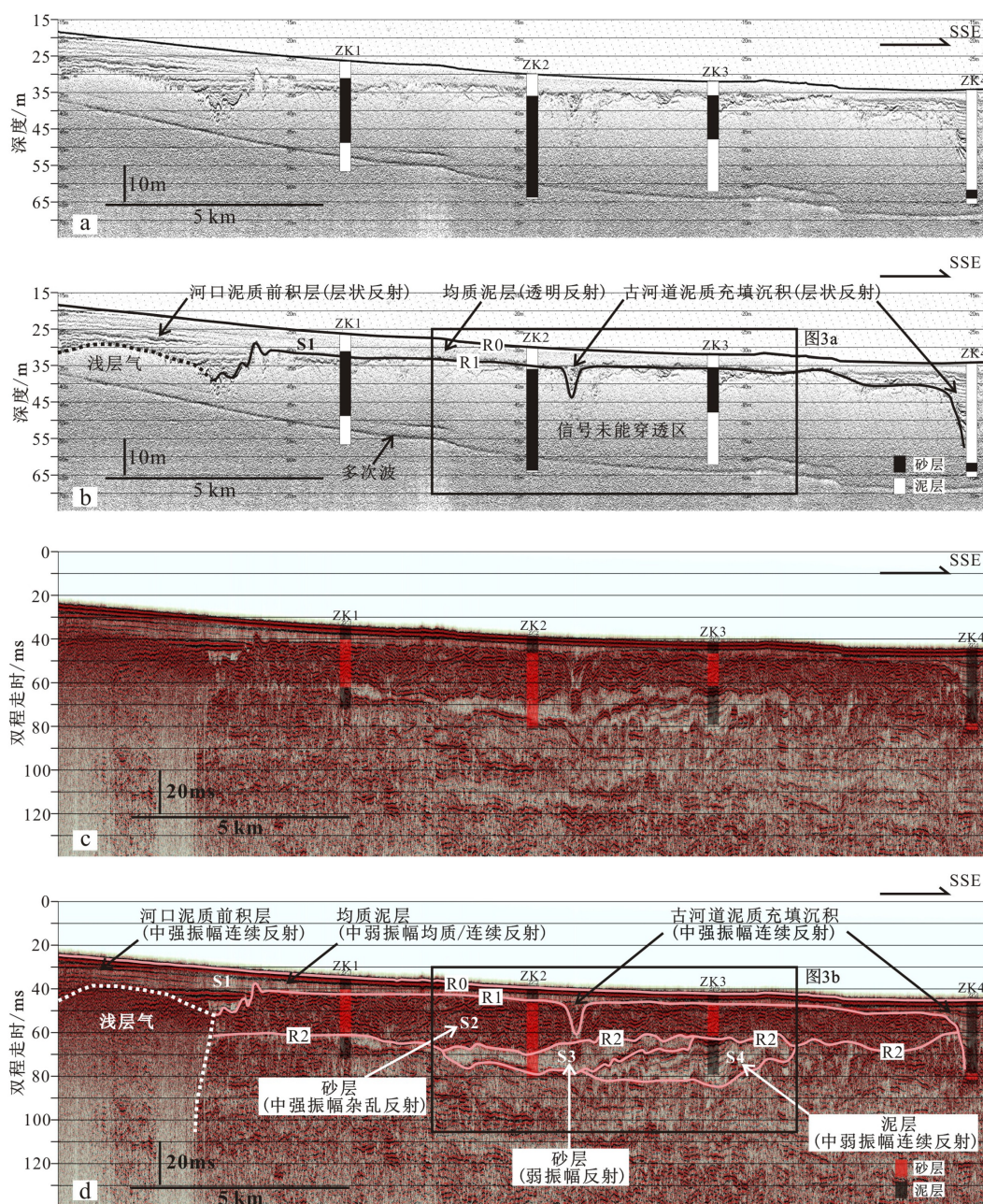


图2 P7线浅地层和单道地震剖面联合解释图

a. 浅地层剖面, b. 浅地层剖面解释, c. 单道地震剖面, d. 单道地震解释。

Fig.2 Combined interpretation of sub-bottom and single-channel seismic profile of line P7

a. Sub-bottom profile of line P7, b. Interpretation of sub-bottom profile of line P7, c. Single-channel seismic profile of line P7, d. Interpretation of single-channel seismic profile of line P7.

因此, 还需通过单道地震等能穿透砂层的物探手段对砂层进行直接探测。

2.2 单道地震

P7线单道地震剖面与P7线浅地层剖面同步测量(图1)。根据地震反射特征, P7线单道地震剖面上可清晰识别出R0(海底)、R1和R2三个反射界面, 以及S1(泥层)和S2(砂层)两套地层(图2c、

2d)。R1反射界面为S1的底界, S1地震相特征为中强连续反射或中弱振幅均质/连续反射, 经钻孔验证(ZK1—ZK4)为泥层; 经与浅地层剖面比对, 两者中的R1是同一界面, S1是同一地层(图2—5)。P7线单道地震剖面显示, S1层北部为磨刀门河口的泥质前积层, 地震反射特征为中强振幅连续反射, 下部被浅层气屏蔽, 底界不详; S1层中部为以中弱振幅均质/连续反射为特征的薄泥层; S1层南部

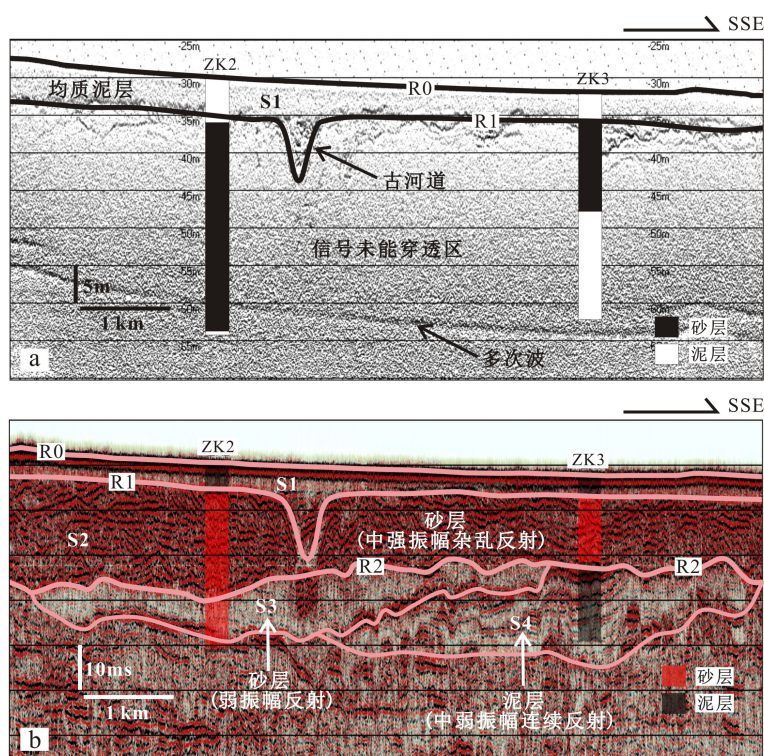


图 3 P7 线浅地层和单道地震剖面局部放大图

a. 浅地层剖面局部放大, b. 单道地震剖面局部放大。

Fig.3 Partial magnification of sub-bottom and single-channel seismic profile of line P7

a. Partial magnification of sub-bottom profile of line P7, b. Partial magnification of single-channel seismic profile of line P7.

为古河道泥质充填沉积,地震反射特征为中强振幅连续反射(图 2c、2d)。R2 反射界面为 S2 的底界, S2 地震相特征为一套中强振幅连续性差的杂乱反射,经钻孔验证(ZK1—ZK3)为砂层,厚度约 15~25 ms(图 2d)。此外,根据地震相差异,还可识别出 S3 和 S4 两个地质体,其中 S3 为弱振幅反射, S4 为中弱振幅连续反射,钻孔揭示 S3 为砂层, S4 为泥层(图 2c、2d 和图 3b)。

P17 线单道地震剖面与 P17 线浅地层剖面同步测量(图 1)。对应于 P7 线单道地震剖面, P17 线单道地震剖面上亦可清晰识别出 R0(海底)、R1 和 R2 三个反射界面,以及 S1(泥层)和 S2(砂层)两套地层(图 4c、4d)。P17 线单道地震反射显示, S1 层西部至中部为均质薄泥层(中弱振幅均质/连续反射),局部见小型古河道充填沉积(弱振幅反射为主); S1 层中部至东部为大型古河道泥质充填沉积(中强振幅连续反射为主),下部受浅层气影响,底界不详(图 4c、4d)。与 P7 线对应, R1 和 R2 反射界面所限定的 S2 为砂层(经 ZK2 和 ZK5 钻孔验证),单道地震反射以中强振幅杂乱反射为特征,厚度约 10~25 ms(图 2d 和图 4d)。另外,根据地震反射特征,还可识别出 S3 和 S5 两个地质体,均以弱振幅

反射为特征(图 4d)。其中 S3 与 P7 线中 S3 为同一地层,经钻孔揭示为砂层(图 3b 和图 5b)。S5 地震反射特征与其附近的小型古河道泥质充填沉积的弱振幅甚至是空白反射(浅剖可以穿透)类似,推测为泥层(图 4d)。在海南岛近海的海砂调查中,也出现类似的弱振幅反射地震相,经钻孔验证为泥层^[6]。由上可见,同为弱振幅反射,可能是砂层,也可能是泥层,反映了单道地震的多解性。此外, ZK5 钻孔所在位置地震反射特征(中强振幅杂乱反射)显示的是一套砂层,而实际钻孔中揭露的是两层砂,中间夹有约 3 m 的泥层,也反映了单道地震的多解性(图 4d)。

综上,由于砂层和泥层的物性差异,在单道地震剖面上,泥层表现为中强至中弱振幅连续性好的层状反射或弱振幅反射,且可与浅地层剖面对比;砂层则表现为中强振幅连续性差的杂乱反射,根据以上反射差异,可对砂层进行识别。单道地震能穿透砂层,直接探测海砂,但同时存在多解性,需与其他物探手段进行联合解释,以提高可靠性。

2.3 浅地层剖面 and 单道地震的联合应用

通过上述分析,基于砂层和泥层的物性差异,

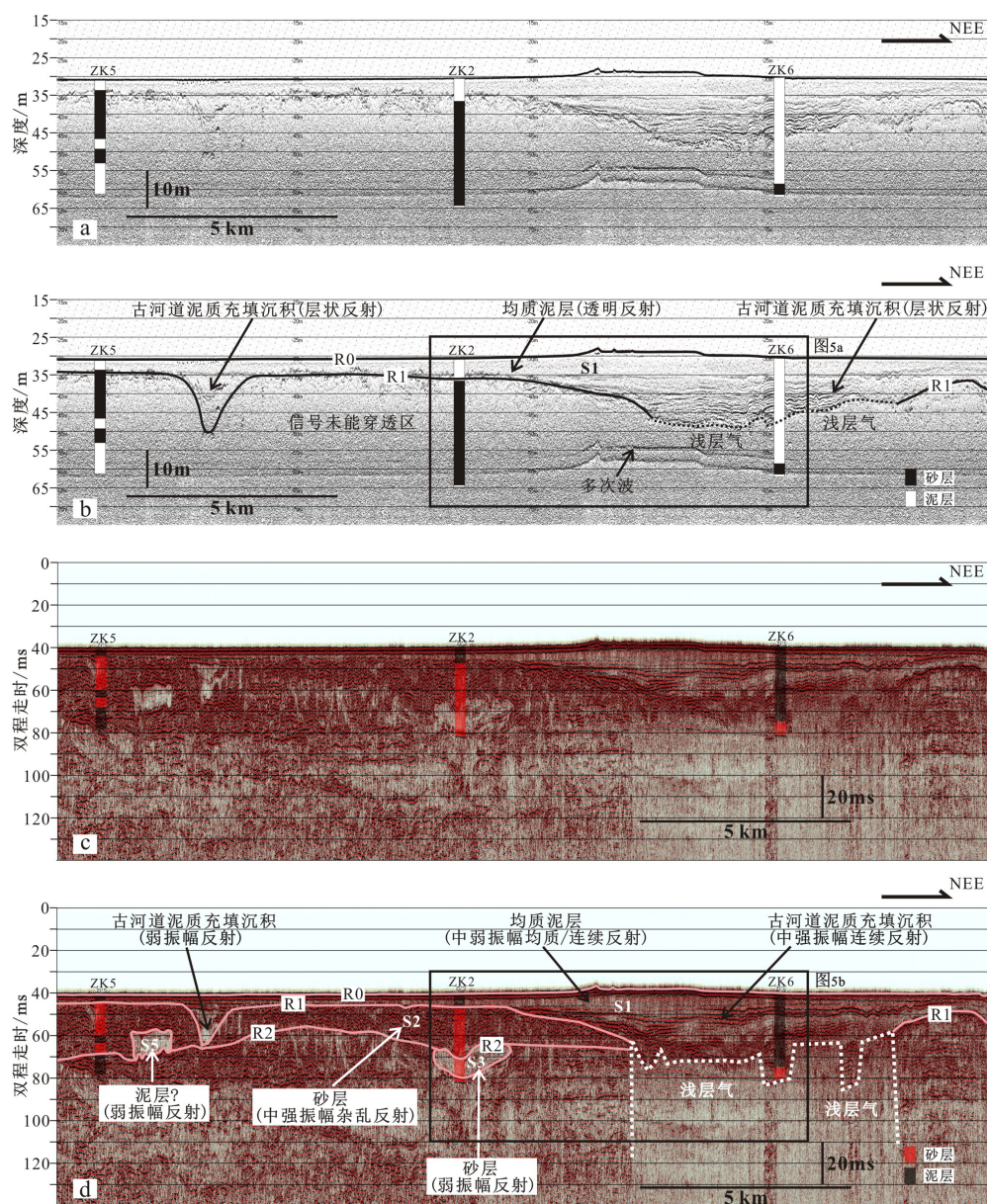


图4 P17线浅地层和单道地震剖面联合解释图

a. 浅地层剖面, b. 浅地层剖面解释, c. 单道地震剖面, d. 单道地震解释。

Fig.4 Combined interpretation of sub-bottom and single-channel seismic profile of line P17

a. Sub-bottom profile of line P17, b. Interpretation of sub-bottom profile of line P17, c. Single-channel seismic profile of line P17,

d. Interpretation of single-channel seismic profile of line P17.

利用浅地层剖面和单道地震识别埋藏海砂的方法总结如下:

(1)根据浅地层剖面排除泥层(泥层的间接排除法)。浅地层剖面具有能穿透泥层而较难穿透砂层的性质,泥层的浅地层剖面识别标志为清晰的层状反射或均质反射。若浅地层剖面穿透深度较大,层状或均质反射清晰,指示泥质沉积较厚,找砂时应避开此类区域。反之,若浅地层剖面穿透深度小,指示泥层较薄,其下发育砂层可能性较大,可列为关注区域。

(2)根据单道地震识别砂层(砂层的直接识别法)。单道地震能直接穿透泥层和砂层,泥层的单道地震识别标志为中强至中弱振幅连续性好的层状反射或弱振幅反射(若海底表层为泥层时,可与浅地层剖面较好地吻合),砂层的单道地震识别标志为中强振幅连续性差的杂乱反射。通过浅地层剖面筛选出泥层较薄的区域后,对同步采集的单道地震剖面进行解译,上覆泥层可与浅地层剖面对比,较易识别。若泥层之下地震反射表现为中强振幅连续性差的杂乱反射,则可初步判定为砂质沉

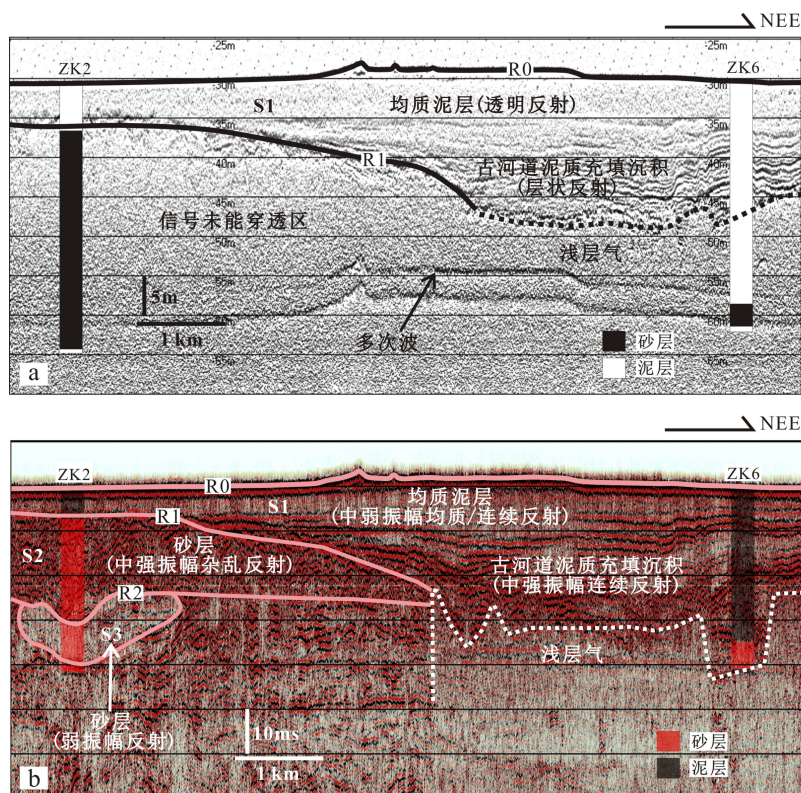


图 5 P17 线浅地层和单道地震剖面局部放大图

a. 浅地层剖面局部放大, b. 单道地震剖面局部放大。

Fig.5 Partial magnification of sub-bottom and single-channel seismic profile of line P17

a. Partial magnification of sub-bottom profile of line P17, b. Partial magnification of single-channel seismic profile of line P17.

积,若该杂乱反射具有一定的厚度和规模,则可确定为找砂目标区域。另外,单道地震还对基岩面具有较好的识别效果^[12-15],若基岩面埋深较浅,表明该处海砂资源潜力有限,找砂时应予以避开。

(3) 钻孔验证。通过以上浅地层剖面 and 单道地震联合解释,识别海砂富集区域,确定孔位,通过钻探直接验证物探解译的准确性;同时根据钻探结果,开展井震对比,总结经验,加深认识,进一步提高物探解译的水平。

3 讨论

以上浅地层剖面 and 单道地震联合应用的海砂识别方法在实践中取得了较好的效果,前文详述了本方法在珠江口磨刀门外的成功应用(图 2—5)。此外,在粤东粤西近海(未发表的数据)和台湾海峡^[4]等海区,本方法也进行了有效的应用。以下对该方法的特点进行讨论。

本方法适用于泥质盖层之下埋藏海砂的勘查,采用“浅地层剖面排除泥层+单道地震识别砂层+钻孔验证”,充分利用浅地层剖面易穿透泥层、难穿透

砂层的特性,有效提高了对泥层识别的准确性,据此采用排除法避开泥质厚层区,与单道地震结合,显著降低了物探资料多解性,有效提高了找砂成功率。

本方法的有效性依赖于物探资料的质量。除海况影响和浅层气屏蔽等客观原因会造成数据效果不佳之外,仪器型号的选择和安装方式的不同等原因也会直接影响数据效果,其中尤其以浅地层剖面最为明显。如本文采用的 SES-2000 Medium 型参量阵浅剖仪排除泥层效果较好,而 SES-2000 Light 型参量阵浅剖仪则由于发射功率较小,实践中发现其侧舷固定安装于千吨级调查船,受船体噪音影响,对泥层的穿透十分有限,难以达到排除泥层的目的。另外,实践中还发现 SES-2000 Medium-70 型参量阵浅剖仪,固定安装于千吨级调查船底,穿透效果更强,可在穿透海底表层 2 m 左右的薄砂层之后,仍能对下伏泥层进行较好的穿透。

本方法的局限性在于单道地震的多解性。对于浅地层剖面识别泥层来说,多解性较小,把握性较大,但对于单道地震识别砂层来说,存在一定的多解性。前已述及,如同为弱振幅反射,可为砂层,亦可能为泥层(图 2、图 3b 和图 4)。又如同为中强

振幅杂乱反射, ZK1 和 ZK3 中揭示的是一层砂, 而 ZK5 中揭露的是两层砂夹一层泥(图 2, 图 4)。因此, 为了降低单道地震的多解性, 提高对砂层识别的可靠性, 有必要进一步引入其他物探手段, 与单道地震联合探测。

4 结论

(1) 采用“浅地层剖面排除泥层+单道地震识别砂层+钻孔验证”进行埋藏海砂勘查, 将泥层的间接排除法与砂层的直接识别法相结合, 可有效提高埋藏海砂的找砂成功率。

(2) 浅地层剖面具有易穿透泥层而难穿透砂层的特性, 泥层的浅地层剖面识别标志为清晰的层状反射或均质反射, 并可与单道地震进行对比, 有效提高了对泥层识别的把握性, 从而指导找砂避开泥质厚层区。

(3) 单道地震可直接穿透砂层, 砂层的单道地震识别标志为中强振幅连续性差的杂乱反射, 在利用浅地层剖面排除泥质厚层区之后, 可据此优选砂质厚层区作为找砂目标区。

参考文献 (References)

- [1] 倪玉根, 李建国, 习龙. 海砂粒级划分标准和沉积物命名方法探讨[J]. 热带海洋学报, 2021, 40 (3): 143-151. [NI Yugen, LI Jianguo, XI Long. Discussion of the grain size grading scale and sediment classification for marine sand and gravel [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2021, 40 (3): 143-151.]
- [2] Bendixen M, Best J, Hackney C, et al. Time is running out for sand [J]. *Nature*, 2019, 571 (7763): 29-31.
- [3] Velegakis A F, Ballay A, Poulos S E, et al. European marine aggregates resources: origins, usage, prospecting and dredging techniques [J]. Journal of Coastal Research, 2010 (51): 1-14.
- [4] Wang Y, Zhang Y Z, Zou X Q, et al. The sand ridge field of the South Yellow Sea: origin by river-sea interaction [J]. *Marine Geology*, 2012, 291-294: 132-146.
- [5] 贾磊, 陈太浩, 倪玉根, 等. 福建台湾浅滩二区海砂资源调查成果报告[R]. 2021. [JIA Lei, CHEN Taihao, NI Yugen, et al. Report of marine sand and gravel resources investigation in Taiwan Shoal II area off Fujian coast[R]. 2021.]
- [6] 梁开, 倪玉根, 陈太浩, 等. 三亚新机场海砂填料调查成果报告(海南省东方-乐东海域海砂调查报告)[R]. 2020. [LIANG Kai, NI Yugen, CHEN Taihao, et al. Report of marine sand and gravel resources investigation for Sanya new airport reclamation (Report of marine sand and gravel resources investigation off Dongfang-Ledong coast, Hainan Province)[R]. 2020.]
- [7] 马胜中, 倪玉根, 林进清, 等. 1: 5万珠江口内伶仃洋海洋区域地质调查(试点)成果报告[R]. 2015. [MA Shengzhong, NI Yugen, LIN Jinqing, et al. Report of 1: 50000 marine regional geological survey of the inner Lingdingyang in the Pearl River Estuary[R]. 2015.]
- [8] 倪玉根, 雷勇, 夏真, 等. 广东省海砂资源调查项目成果报告[R]. 2017. [NI Yugen, LEI Yong, XIA Zhen, et al. Report of marine sand and gravel resources investigation off Guangdong coast[R]. 2017.]
- [9] 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. Sub-Bottom 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.]
- [10] 赵铁虎, 李军, 张昇彪, 等. 舟山海域海砂资源声地层剖面探测研究[J]. *物探化探计算技术*, 2011, 33 (3): 340-345. [ZHAO Tiehu, LI Jun, ZHANG Yibiao, et al. Study of high-resolution SBP exploration for sea sand resources in the Zhoushan offshore [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 33 (3): 340-345.]
- [11] 夏真, 林进清, 郑志昌, 等. 珠江口近岸海洋地质环境综合研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [XIA Zhen, LIN Jinqing, ZHENG Zhichang, et al. Comprehensive Study of Marine Geological Environment in the Pearl River Estuary[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [12] 冯志强, 冯文科, 薛万俊, 等. 南海北部地质灾害及海底工程地质条件评价[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996. [FENG Zhiqiang, FENG Wenke, XUE Wanjuan, et al. Evaluation of Marine Geologic Hazards and Engineering Geological Conditions in the Northern South China Sea[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1996.]
- [13] 冯志强, 李学杰, 林进清, 等. 广东大亚湾海洋地质环境综合评价[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002. [FENG Zhiqiang, LI Xuejie, LIN Jinqing, et al. Comprehensive Evaluation of Marine Geological Environment in Daya Bay, Guangdong[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002.]
- [14] 夏真, 林进清, 郑志昌, 等. 深圳大鹏湾海洋地质环境综合评价[M]. 北京: 地质出版社, 2004. [XIA Zhen, LIN Jinqing, ZHENG Zhichang, et al. Comprehensive Evaluation of Marine Geological Environment in Dapeng Bay, Shenzhen[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.]
- [15] 夏真, 林进清, 郑志昌, 等. 北部湾广西近岸海洋地质环境综合研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2019. [XIA Zhen, LIN Jinqing, ZHENG Zhichang, et al. Comprehensive Study of Marine Geological Environment off Guangxi Coast in Beibu Gulf[M]. Beijing: Ocean Press, 2019.]