

王嘉琳, 张匡华, 林明智, 等. 海南岛西部单道地震和浅地层剖面资料联合解释[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(2): 77-82.

WANG Jialin, ZHANG Kuanghua, LIN Mingzhi, et al. Combined interpretation of single-channel seismic and sub-bottom profiles in the western area of Hainan Island[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(2): 77-82.

海南岛西部单道地震和浅地层剖面资料联合解释

王嘉琳^{1,2}, 张匡华^{1,2*}, 林明智^{1,2}, 傅人康^{1,2}, 陈波^{1,2}, 全长亮^{1,3}, 伍德明^{1,2}

(1 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海口 570206; 2 海南省海洋地质调查院, 海口 570206;

3 海南省地质测试研究中心, 海口 570206)

摘要: 结合近年来采集的单道地震和浅地层剖面数据, 探讨单一数据在解释工作中存在片面性和精度不足的问题。利用海南岛西部海域单道地震和浅地层剖面仪同步测量数据开展联合解释, 分析认为其在划分浅地层结构、识别灾害地质体、圈定海砂资源分布等方面具有更高的可靠性。分析结果显示: 在高精度地震资料解释需求的背景下, 开展联合解释可有效提高对地质演化的认识, 降低地质解释的多解性, 优化海砂资源靶区, 为海洋开发和海洋工程建设提供更准确可信的地质信息和依据。

关键词: 海南岛西部海域; 地球物理; 地层结构; 灾害地质; 海砂; 联合解释

中图分类号: P714; P631

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.034

0 引言

随着海洋地球物理设备的发展, 有更多更加轻便、智能、高效、高分辨率的设备投入到海洋地球物理调查任务中, 尤其是单道地震和浅地层剖面设备^[1], 在近海海洋区调、海洋资源、海岸调查、海洋工程勘察及建设等诸多行业领域发挥了重要作用。倪玉根等^[1-2] 在华南近海海砂找矿工作中采用浅地层剖面和单道地震联合采集和解释, 在隐伏海砂矿床圈定中获得了较好的效果, 并且运用浅地层剖面结合地质钻探资料揭示了琼州海峡完全开启的时代及其地层界面。李勇航等^[3] 在台湾海峡海域开展海砂找矿工作中, 运用浅地层剖面和单道地震等多手段联合解释的方式, 对复杂砂体的垂向和平面

展布进行了精细刻画。周兴华等^[4] 在杭州湾海底管线检测及魏志强等^[5] 在大亚湾海底管道检测中通过浅地层剖面等手段, 对海底管线和管道状态进行评价, 取得较好效果; 韩孝辉等^[6] 在海南东方市近海海上风电桩基选址问题上, 应用单道地震等综合手段探讨了调查区的地质适宜性; 陈泓君等^[7] 通过单道地震数据揭示了海南岛西南部晚第四纪以来的海岸线及古水深变化趋势; 牟秀娟等^[8] 应用单道地震、浅地层剖面和侧扫声呐等手段分析了闽北近岸海域存在的主要海洋灾害地质特征。冯京等^[9] 利用浅剖和单道地震在分辨不同深度地层的互补性, 通过两种技术手段同步作业, 同时兼顾了浅层和中深层地层分辨率。

众多学者利用单道地震和浅地层剖面等地球物理手段在各领域做出了诸多有益探索, 但是鉴于不同的项目任务与研究目的, 多单独利用某一手段的优势对浅—中部地层结构和地质现象等进行识别划分, 较少应用多手段联合解释对地质构造或地质现象进行深入研究探讨, 已有联合解释的案例也多集中于中国大陆近海海域, 研究的时间尺度较大。本文利用海南岛西部海域同步采集的单道地震和浅地层剖面数据, 针对海南岛西部近浅海地层总体沉积较薄的特性, 开展联合解释, 可有效提高对地质演化的认识, 降低单手段地质解释的局限性和多解性, 同时可为优化海砂等矿产资源靶区、开展海

收稿日期: 2023-02-20

资助项目: 海南省海洋地质资源与环境重点实验室自主课题(HNHYD-ZZYHJZZ003); 海南省青年基金“晚第四纪以来琼州海峡西口沉积演化过程与海砂成矿模式研究”(422QN420); 海南省高层次人才项目“琼州海峡潮流沙脊动力地貌过程研究及稳定性评估”(422RC800); 海南省财政厅项目“海南岛周边海域海砂资源调查评价”

第一作者: 王嘉琳(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋地质、地球物理调查方面的研究工作。E-mail: 936661475@qq.com

* 通讯作者: 张匡华(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋地质、地球物理调查方面的研究工作。E-mail: zkh_quest@163.com

洋开发和海洋工程建设提供更准确可信的地质信息和地质依据。

1 数据和样品采集

本文研究数据来源于2022年“海南岛周边海

域海砂资源调查评价(续作)”项目,工区位于海南省乐东外海域,感恩角和莺歌咀一线以西(图1a),工区主要以水下浅滩和潮流冲刷槽为主,中部发育一近SN向沙脊,脊上沙波地貌发育(图1c)。本文选取ZK51、ZK78钻孔及Z1、Z2、Z3、L1四条物探测线(图1b)进行研究。

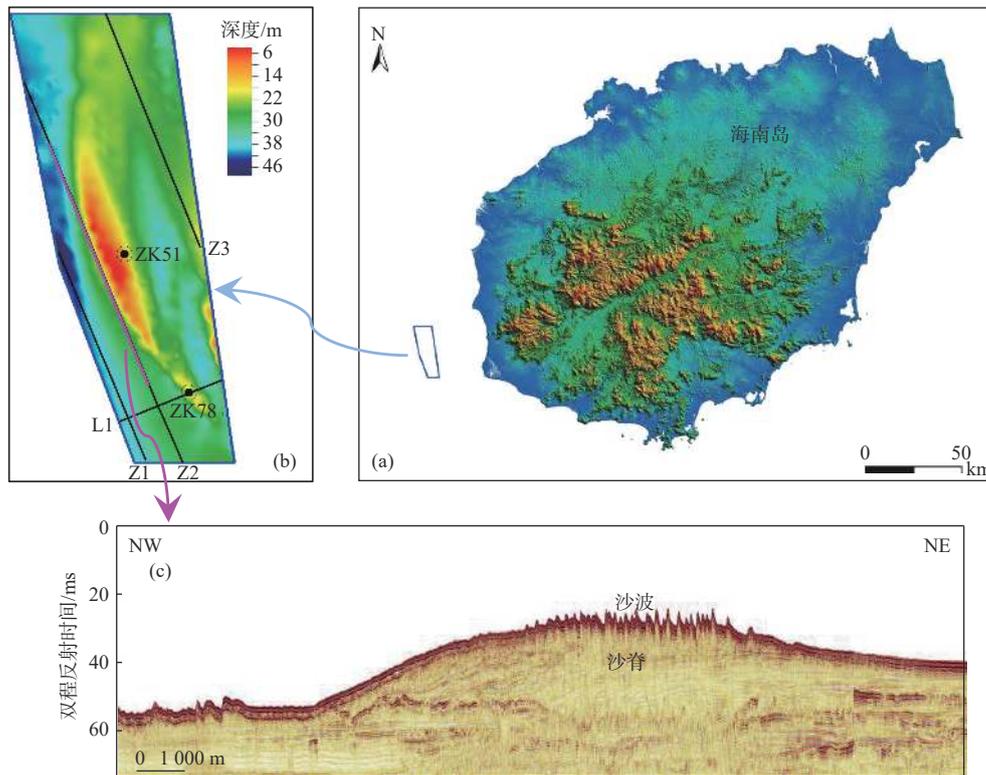


图1 研究区位置(a)、物探测线及钻孔位置(b)、典型沙波沙脊剖面(c)

Fig.1 Locations of the study area (a) and geophysical lines and boreholes (b), and typical profile of sand waves and sand ridges (c)

单道地震采集设备为GEO-SPARK 2000J电火花震源及GEO-SENSE 24单元水听缆,采用船尾拖曳的方式工作。浅地层剖面设备为BATHY-2010 PC型浅地层剖面仪,采用船舷固定悬挂的方式工

作。地质钻探设备为XY-4-3A型钻机,采用连续采样方式获取岩芯样品,单样长2m。相关设备的主要技术指标和具体采集参数如表1所示。

表1 设备主要技术指标和采集参数

Table 1 Main technical specifications and acquisition parameters of apparatus

	单道地震	浅地层剖面仪	钻探钻机
技术指标	输出能量: 100~2 000 J; 震源主频: 500~2 000 Hz; 最大穿透深度: 约300 m(视底质情况而定); 水听缆: 长约8 m, 由24个间隔0.3 m的水听器组成; 响应频率范围: 1~10 kHz	输出功率: 2 kW; 输出频率: 3.5~200 kHz; 发射频率: 4 Hz; 地层分辨率: 8 cm; 最大穿透深度: 约200 m(视底质情况而定)	XY-4-3A为机械传动液压给进立式轴式钻机; 最大钻进深度1 000 m; 柴油机功率37 kW
采集参数	震源与水听缆间距: 8 m; 拖缆放长: 40.5 m; 震源能量: 1 000 J; 激发间隔: 1 s; 炮间距: 2.5 m; 垂向采样间隔: 0.1 ms; 记录长度: 500 ms	换能器吃水: 2.6 m; 输出频率: 3.5 kHz; 激发间隔: 0.25 s; 垂向采样间隔: 0.05 ms; 记录长度: 80 m; 声速: 1 530 m/s	套管护壁, 冲击和回转钻进结合取芯; 取芯管内径: 72 mm; 砂层回次进尺: ≤2 m; 泥层回次进尺: ≤3 m

2 测试和分析

2.1 沉积物测试

本研究分析测试内容包括粒度分析、细度模数测定、含泥量分析等, 由海南省地质测试研究中心完成。分析测试结果表明, 研究区沙脊沉积物主要以砂、含砾砂、粉砂质砂、砂质粉砂等为主, 自上而下含泥量逐渐增高(表 2)。

表 2 钻孔岩芯样品分析测试结果
Table 2 Test result of borehole core samples

样品编号	粒度含量/%				平均粒径/ Φ	沉积物分类
	砾石	砂	粉砂	黏土		
ZK51-L1	\	93.89	5.37	0.74	2.49	砂
ZK51-L2	\	83.62	12.78	3.60	2.77	粉砂质砂
ZK51-L3	\	66.98	25.89	7.13	3.91	粉砂质砂
ZK51-L4	\	81.14	15.02	3.84	2.97	粉砂质砂
ZK51-L5	\	81.16	15.31	3.53	3.13	粉砂质砂
ZK51-L6	\	79.02	17.19	3.79	3.26	粉砂质砂
ZK51-L7	\	56.00	38.27	5.73	4.13	粉砂质砂
ZK51-L8	\	57.72	36.68	5.60	4.04	粉砂质砂
ZK51-L9	\	82.98	14.37	2.65	2.89	粉砂质砂
ZK51-L10	\	71.86	23.91	4.23	3.54	粉砂质砂
ZK51-L11	\	83.93	13.57	2.50	3.03	粉砂质砂
ZK51-L12	\	48.92	40.22	10.86	4.68	砂质粉砂
ZK51-L13	\	67.54	27.53	4.93	3.83	粉砂质砂
ZK51-L14	\	40.91	46.11	12.98	5.01	砂质粉砂
ZK51-L15	\	20.30	63.53	16.17	5.74	砂质粉砂
ZK78-L1	1.11	98.73	0.16	\	0.85	含砾砂
ZK78-L2	2.22	94.04	3.30	0.44	1.26	含砾砂
ZK78-L3	2.01	91.56	4.89	1.54	1.43	含砾砂
ZK78-L4	2.41	79.49	12.82	5.28	1.92	含砾泥质砂
ZK78-L5	2.94	71.27	18.45	7.34	2.54	含砾泥质砂
ZK78-L6	4.52	74.16	16.79	4.53	2.02	含砾泥质砂
ZK78-L7	6.53	72.94	17.25	3.28	1.98	砾质泥质砂
ZK78-L8	\	77.78	17.66	4.56	2.97	粉砂质砂
ZK78-L9	9.29	63.55	23.53	3.63	2.39	砾质泥质砂
ZK78-L10	\	63.58	30.76	5.66	3.87	粉砂质砂

注: “\” 为无内容。

2.2 单道地震和浅地层剖面数据分析

初步带通滤波后, 提取单道地震和浅地层剖面数据频谱(图 2)。单道地震的有效频带 < 3 000 Hz, 因虚反射的陷波效应而呈多峰特征, 峰值频率约 750 Hz

和 1 500 Hz。浅地层剖面的有效频带 > 2 000 Hz, 呈单峰特征, 峰值频率约 3 200 Hz。

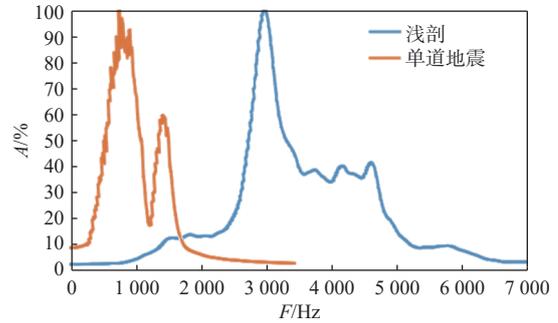


图 2 单道地震和浅地层剖面数据频率分布
Fig.2 The frequency graph of single-channel seismic and sub-bottom profile

鉴于研究区地层沉积物类型, 单道地震的最大穿透深度约为海底以下 150 ms, 局部可穿透至基岩面, 能清晰识别主要沉积相并追踪层序界面(图 3)。受鬼波及仪器固有分辨率等影响, 反射同相轴较粗, 对近海底约 10 m 地层微变化的分辨能力较低, 尤其难以对研究区海域全新世以来的层序界面进行追踪。浅地层剖面在泥质层最大穿透深度约为海底以下 25 ms, 地层分辨率明显较高, 反射同相轴清晰可追踪, 但难以穿透砂质海底(图 4—图 6)。

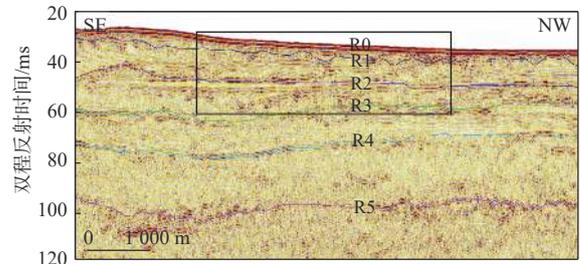


图 3 Z3 测线单道地震剖面
Fig.3 Single-channel seismic profile of Line Z3

3 讨论

3.1 地层结构划分

如图 3 所示, 通过 Z3 测线单道地震剖面可以清晰识别追踪 5 个强反射界面(R1—R5)。分析剖面反射特征, R3 界面以上的地层反射明显偏复杂, 呈现中—强振幅、弱连续性反射特征。对其进行局部放大, 自海底 R0 至不整合界面 R1, 除了未进行压制的虚反射同相轴以外, 还存在一不连续的强振幅反射(图 4a), 疑似为真实地层反射界面。在浅地层剖面相同位置, 则明显表现为可连续追踪的强振

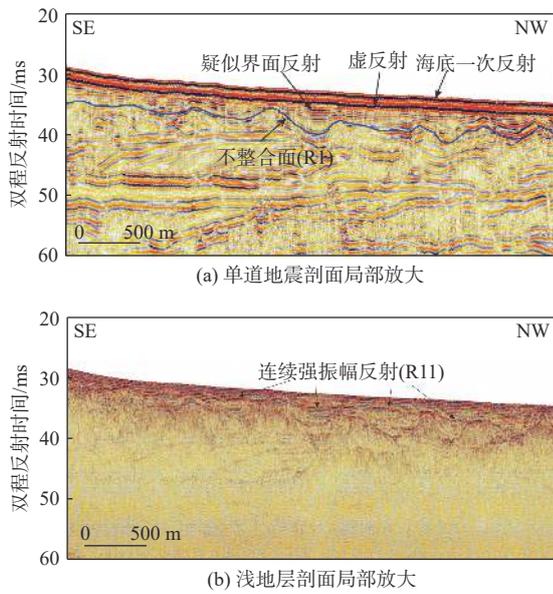


图4 单道地震和浅地层剖面局部放大
Fig.4 Partial close-up of single-channel seismic and sub-bottom profile

幅反射同相轴(R11),可证实单道地震剖面中的“疑似真实地层反射界面”就是真实地层的反映。推测该 R11 界面反映了研究区全新世以来某个小时间尺度的地质环境变化,致使沉积物性上产生较明显差异。受浅地层剖面设备自身穿透能力的限制,基本也仅能清晰反映 R1 界面以上地层特征。

因此,单一的单道地震数据解释或浅地层剖面数据解释均存在一定的局限性。通过单道地震对较大时间尺度地层特征的反映和浅地层剖面对短时间尺度内高分辨率地层特征的揭示,开展二者联合解释,加以相互佐证,可为了解海南岛西部近浅海海域地质演化提供更准确可信的地质信息和地质依据。

3.2 灾害地质体识别

埋藏古河道、古三角洲、浅断层等是海洋开发和海洋工程建设必须规避的灾害地质^[8-15],同时作为地质演化和地质变迁的重要痕迹,又可为地质研究提供极好的佐证。本文以研究区 Z1 测线埋藏古河道为例(图 5),分析同一个埋藏古河道在单道地震和浅地层剖面中的响应特征。

单道地震剖面反映研究区古河道经历了 2 个主要的抬升演变过程(图 5a)。河道 C11 大致呈“U”型,河床底部明显下切,随着河床抬升,河道明显往西北方向收窄,进一步演变为“V”型河道 C12;对比古河道内外两侧剖面反射特征,河道内总体呈高频、中—强振幅反射特征,河道外侧则呈低频、弱振幅、

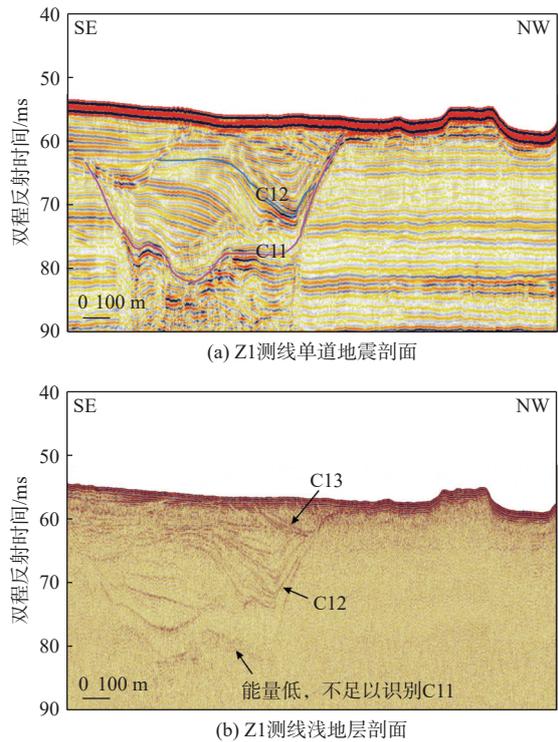


图5 Z1 测线单道地震和浅地层剖面联合解释
Fig.5 Combined interpretation of single-channel seismic and sub-bottom profile of Line Z1

水平层状反射特征。浅地层剖面(图 5b)显示,其能量不足以穿透识别河道 C11 底部形态,内部反射特征亦较弱;河道 C12 内部反射特征与单道地震剖面基本一致,呈“V”型中—强振幅反射特征;浅地层剖面反映河道 C12 进一步向西北方向抬升收窄,形成河道 C13,最大宽度约为 290 m;河道外侧基本呈空白反射特征。结合单道地震剖面 and 浅地层剖面古河道内外两侧反射特征差异,推测河道内沉积物应以泥质为主,外侧沉积物相对较粗。

通过对单道地震和浅地剖面开展联合解释,可以从长、短 2 个时间尺度更加准确地分析判断研究区古河道的发育演变过程、迁移规律及河道内外沉积物类型。

3.3 海砂矿体圈定

以研究区沙脊南侧边缘出露型海砂为例,结合 L1 测线单道地震和浅地层剖面数据,对比分析沙脊及其两侧的剖面反射特征(图 6a)。单道地震剖面显示,沙脊位于强反射界面 R1 之上,推测为全新世海平面上升过程中滨浅海相—海相期形成的水下堆积沙脊^[16-17]。沙脊顶部主要呈强振幅、偏杂乱反射特征,反映沉积物粒级较粗;往下反射振幅逐渐减弱,反映粗粒沉积物含量降低,含泥量增大。根据

ZK78 钻孔岩芯编录和样品分析测试结果(图 6c), 岩芯自上而下由灰黄色过渡到灰/灰绿色, 岩性变化为含砾砂(0~5.6 m)—含砾泥质砂(5.6~10.2 m)—砾质泥质砂(10.2~12.2 m、13.7~15.2 m)—粉砂质砂(12.2~13.7 m、15.2~16.7 m), 细度模数由 2.8 降为 0.3, 含泥量由 1.8% 增至 48.3%, 表明研究区在

全新世早期总体处于滨浅海相的弱水动力环境, 随着海平面的上升, 水动力条件加强, 沉积物粒径变粗, 与单道地震剖面反射特征指示的沉积物情况一致, 确定该沙脊为海砂富集区。单道地震剖面 R1 界面位置, 经 ZK78 钻孔揭露, 岩芯呈灰绿色粉砂质砂, 致密、黏手, 可确定为砂层底界。

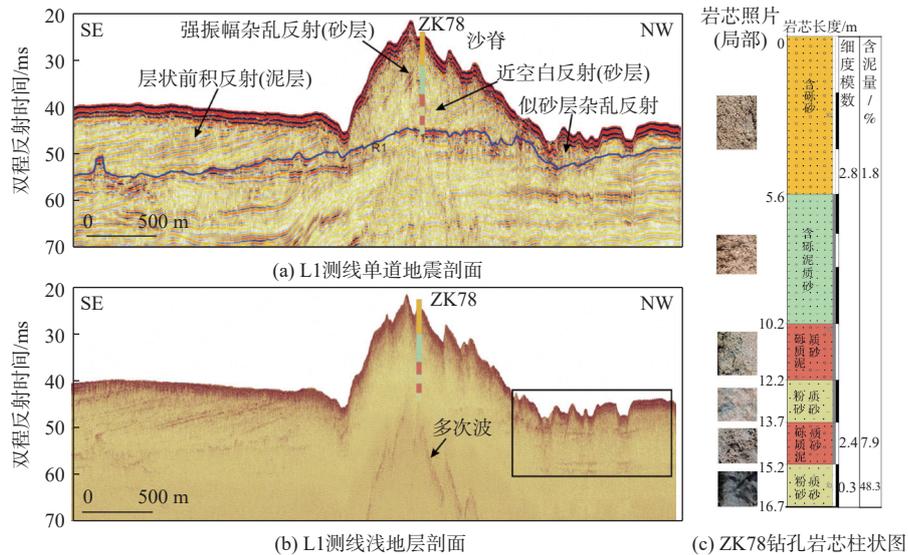


图 6 L1 测线单道地震和浅地层剖面联合解释图及 ZK78 钻孔岩芯柱状图

Fig.6 Combined interpretation of single-channel seismic (a) and sub-bottom profile (b) of Line L1, and the borehole core histogram of ZK78 (c)

关于海砂矿体边界, 单道地震和浅地层剖面均显示沙脊西南侧呈层状前积反射特征, 为明显的泥质沉积区; 沙脊东北侧边缘, 单道地震剖面指示中一强振幅的似砂层杂乱反射区域, 在浅地层剖面中, 其下部地层反射特征较清晰(图 6b 黑框范围), 穿透深度可至海底以下约 20 ms, 反映该“似砂层杂乱反射”区域实为泥质沉积, 不宜作为进一步钻探工作部署或海砂资源评价范围。

综合分析对比单道地震和浅地层剖面, 应避免浅地层剖面中对地层穿透性较大的区域, 围绕研究区沙脊主体对海砂矿体进行圈定, 并依据单道地震剖面指示的砂层底界部署钻探等后期工作。

4 结论

(1)对研究区内单道地震和浅地层剖面数据联合解释分析认为, 研究区主要划分为 6 个层序界面, 分别为 R1、R11(亚层)、R2、R3、R4、R5, 推测 R11 反映了全新世以来某个明显的小时间尺度的地质环境变化。此结论对海南岛西部近浅海海域浅地层演化的新认识, 可为今后进一步开展地质演化研

究提供更多的地质信息和地质依据。

(2)对比分析单道地震和浅地层剖面认为, 研究区古河道经历了 C11—C12—C13 三个阶段的发育演变过程, 由东南往西北方向抬升收窄。河道内以泥质沉积为主, 外侧沉积物相对较粗, 内外两侧沉积物性差异明显, 地层承载能力差异较大, 在海洋开发和海洋工程建设中应规避古河道可能导致的地质灾害风险。

(3)通过单道地震可有效识别砂层底界, 预测海砂沉积厚度, 同时, 结合浅地层剖面对泥质地层的强穿透性, 可有效预测海砂矿体边界, 进一步优化勘查靶区, 指导钻探工作部署。在今后开展海砂等矿产资源勘查工作时, 宜采用多种地球物理手段联合解释的方式, 避免单一手段解释的多解性。

参考文献:

[1] 倪玉根, 刁龙, 夏真, 等. 浅地层剖面和单道地震测量在海砂勘查中的联合应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(4): 207-214.

[2] 倪玉根, 夏真, 马胜中. 浅地层剖面揭示琼州海峡的形成时代[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(4): 79-82.

- [3] 李勇航, 贾磊, 倪玉根, 等. 中国台湾浅滩海砂砂体的地球物理特征及有利赋存标志[J]. *热带海洋学报*, 2021, 40(5): 101-110.
- [4] 周兴华, 姜小俊, 史永忠. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在杭州湾海底管线检测中的应用[J]. *海洋测绘*, 2007, 117(4): 64-67.
- [5] 魏志强, 张志强, 蒋俊杰. 浅地层剖面仪在大亚湾海底管道检测中的应用[J]. *海洋测绘*, 2009, 29(6): 71-73.
- [6] 韩孝辉, 薛玉龙, 刘刚. 海上风电场建设的前期地质调查研究方法[J]. *工程勘察*, 2018, 46(3): 29-34.
- [7] 陈泓君, 黄文凯, 邱燕. 海南岛西南海域晚第四纪古水深反演[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(6): 128-139.
- [8] 牟秀娟, 张勇, 孔祥准, 等. 闽北近岸海域潜在的海洋灾害地质特征[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(11): 52-59.
- [9] 冯京, 尉佳, 刘长春, 等. 参量阵浅剖及电火花震源浅剖互补性分析[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(9): 63-68.
- [10] 顾效源, 于剑峰, 韩明智, 等. 单道地震技术在海洋地质调查中的应用: 以威海褚岛北部海域为例[J]. *山东国土资源*, 2020, 36(1): 72-78.
- [11] 罗昆, 陈卫, 韩孝辉. 海南岛南部浅海地质灾害调查方法研究[J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(3): 51-55.
- [12] 王舒吹. 浅层物探技术在近海灾害地质与工程地质调查中的应用[J]. *海洋石油*, 2008, 136(1): 6-12.
- [13] 徐承芬, 孔祥准, 杨源, 等. 闽北近岸海域末次盛冰期古河道体系平面展布以及垂向反射特征[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(1): 6-11.
- [14] 乔朋宇, 陈珊珊, 张勇, 等. 东海陆架区西部主要地质灾害类型及成因机制研究[J]. *河北地质大学学报*, 2022, 45(3): 63-72.
- [15] 陈晓辉, 张训华, 李日辉, 等. 渤海海峡海域灾害地质研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(1): 11-19.
- [16] 罗昆, 刘刚, 薛玉龙, 等. 利用单道地震反射数据预测海南岛东部近海砂层分布[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(1): 125-130.
- [17] 全长亮, 宋家伟, 邓开章, 等. 海南岛周边海砂资源勘查进展及选区建议[J]. *海洋学研究*, 2022, 40(3): 33-48.

Combined interpretation of single-channel seismic and sub-bottom profiles in the western area of Hainan Island

WANG Jialin^{1,2}, ZHANG Kuanghua^{1,2*}, LIN Mingzhi^{1,2}, FU Renkang^{1,2},
CHEN Bo^{1,2}, TONG Changliang^{1,3}, WU Deming^{1,2}

(1 Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment, Haikou 570206, China;

2 Marine Geological Survey Institute of Hainan Province, Haikou 570206, China;

3 Hainan Geology Detection and Research Centre, Haikou 570206, China)

Abstract: Based on the data of single-channel seismic and sub-bottom profiles collected in recent years, the issues of one-sidedness and inadequacy in the interpretation by single method were explored. Joint interpretation was carried out using single channel seismic and shallow layer profiler synchronous measurement data in the western sea area of Hainan Island, South China. Results show that the joint interpretation has higher reliability in dividing shallow stratigraphic structures, from which disaster geological bodies could be identified, and the distribution of sea sand resources be delineated. Under the high demand for high-precision seismic data interpretation, the joint interpretation can greatly improve our understanding of geological conditions, reduce effectively the ambiguity of geological interpretation, and optimize the resource target areas such as marine sand. This study provided a tool for accurate and reliable data interpretation for ocean resource exploration and engineering construction.

Key words: western sea of Hainan Island; geophysics; stratigraphic structure; hazardous geology; marine sand; combined interpretation