



琼东南盆地陵水17-2深水气田开发区表层沉积物类型及工程地质特性

朱友生, 王艳秋, 冯湘子, 王大伟, 王 姝

Surface sediments and their geotechnical characteristics in the development area of deepwater gas field LS17-2

ZHU Yousheng, WANG Yanqiu, FENG Xiangzi, WANG Dawei, and WANG Shu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2020120601>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

海洋天然气水合物储层特性及其资源量评价方法

Characteristics of marine gas hydrate reservoir and its resource evaluation methods

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 44

新西兰Hikurangi俯冲带沉积物成岩作用示踪研究：来自孔隙流体Sr同位素证据

A tracing study of sediment diagenesis in the Hikurangi subduction zone, New Zealand: Evidence from Sr isotope of pore fluid

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 115

基于ERT技术的含水合物沉积物可视化探测模拟实验

An experimental study on visual detection of hydrate-bearing sediments based on ERT

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 206

南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90



关注微信公众号，获得更多资讯信息

朱友生, 王艳秋, 冯湘子, 等. 琼东南盆地陵水 17-2 深水气田开发区表层沉积物类型及工程地质特性 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 45-56.

ZHU Yousheng, WANG Yanqiu, FENG Xiangzi, et al. Surface sediments and their geotechnical characteristics in the development area of deepwater gas field LS17-2[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(1): 45-56.

琼东南盆地陵水 17-2 深水气田开发区表层沉积物类型及工程地质特性

朱友生¹, 王艳秋¹, 冯湘子¹, 王大伟^{2,3}, 王姝¹

1. 中海油田服务股份有限公司, 天津 300459

2. 中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519080

摘要:陵水 17-2 气田位于中国南海琼东南盆地, 是中国海油自营勘探发现的第一个深水高产气田, 探明储量规模超千亿立方米。在水深 200~1600 m 区域, 采用工程调查船与自主式水下潜器调查结合的方式, 进行地球物理资料采集、海底表层取样及钻探取样, 并对多波束测深、后向散射强度、侧扫声呐、浅地层剖面、室内测试分析等数据进行综合分析, 研究了海底表层沉积物类型、分布规律及工程地质特性。按照海底地形地貌特征, 陵水 17-2 深水气田开发区可划分为陆架区、缓坡区和滑塌区; 陆架区表层沉积物以黏土和粉质黏土为主, 不同站位物理力学性质差异较大, 局部夹砂层; 缓坡区和滑塌区具有高含水率、低密度、高孔隙比、高液限、高可塑性、低强度等典型深水沉积特点。区域内海底泥面至泥面之下 0.3 m, 土质不排水抗剪强度为 0~4 kPa, 非常有利于海底电缆、海底管道、脐带缆的铺设。缓坡区浅层土质条件非常适合吸力式、防沉板及抓力锚施工, 滑塌区浅层土质条件适合防沉板、抓力锚及打入桩基础施工。研究成果将对琼东南盆地深水油气田开发工程的设计和安装施工具有指导意义。

关键词:表层沉积物; 后向散射强度; 沉积物类型; 工程地质特性

中图分类号: P642

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020120601

Surface sediments and their geotechnical characteristics in the development area of deepwater gas field LS17-2

ZHU Yousheng¹, WANG Yanqiu¹, FENG Xiangzi¹, WANG Dawei^{2,3}, WANG Shu¹

1. China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China

2. Institute of Deep Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China

Abstract: The gas field LS17-2, the first deep-water and high-yield gas field discovered independently by CNOOC in the Qiongdongnan Basin, South China Sea, is a large gas field with a proven reserve more than 100 billion cubic meters. Studied in this paper are the geophysical data, such as multi-beam echo sounder data, backscatter strength data, side scan sonar data, and sub-bottom profiler data as well as seabed surface sampling and drilling data, collected by the engineering survey vessels and autonomous underwater vehicles within the development zone of the gas field LS17-2 in the water depth between 200 m and 1600 m. Types, distribution patterns and geotechnical properties of subsurface sediments are described. The bathymetry data suggests that the study area of the development zone of the gas field LS17-2 could be subdivided into three subareas, i.e. the shelf subarea, gentle slope subarea and slumping subarea. The seabed sediments are predominated by clay and silty clay, with sandy deposits in some places. The geotechnical characteristics are quite different in different sampling locations. The geotechnical characteristics of seabed sediments within the gentle slope subarea and slumping subarea are typical deep-water sediments, characterized by high water content, low density, high void ratio, high liquid limit, high plasticity and low strength. The undrained shear strength of the soil layers between seabed and the layer about 0.3 m below seabed varies between 0~4 kPa, and it is conducive to the laying of submarine cables,

资助项目:中海油田服务股份有限公司项目“土动力实验和分析技术研究”(E-23202009); 海南省重点研发计划科技合作方向项目“南海海底滑坡-海啸灾害预测及评估技术开发”(ZDYF2020209); 广东省重点领域研发计划项目“海底沉积物多参量原位环境监测设备研制及应用示范”(2020B1111020002)

作者简介:朱友生(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事海洋工程勘察技术和海洋地质灾害方面的研究, E-mail: zhuysh2@cosl.com.cn

收稿日期:2020-12-06; **改回日期:**2021-03-23. 文凤英编辑

submarine pipelines and umbilical cables. Soil conditions in the shallow part are suitable for the foundation of suction type, mud mat and grab anchor in the gentle slope subarea, and for the types of mud mat, grab anchor and driven piles in the slumping subarea. The research results are believed useful as a reference to the design and installation of subsea facilities for the coming deep-water oil and gas field development projects in the Qiongdongnan Basin.

Key words: surface sediment; backscatter strength; sediment types; geotechnical characteristics

海底表层沉积物类型是海洋资源与环境研究中最为基础资料,对其类型、分布及其物理力学等工程地质性质的研究,可为海底电缆和输油气管道的铺设、石油钻井平台的设计和施工等海洋工程提供重要科学依据,对工程设计、施工、运营安全及项目总体投资均有重大影响^[1-3]。

海底深水区工程地质条件研究,必须通过调查船、自主水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)、有缆遥控水下机器人(remotely operated vehicle, ROV)、深拖等调查平台,同时通过表层取样、浅层地质钻探取样、静力触探、原位十字板剪切试验等手段,获取地球物理、岩土工程、地震等一系列原始数据,查明海底的地形地貌、地层反射结构、不良地质灾害分布、断裂构造活动等,从而建立区域地质模型,分析评价地质灾害风险,为后续工程选址提供依据。

我国学者利用多波束测深、侧扫声呐、浅地层剖面、单道地震、多道地震、重力、磁力、热流、表层取样、浅层地质钻探取样和原位测试等地质-地球物理综合调查手段在南海北部陆架、陆坡海底表面和浅地层中识别出活动沙波(沙丘)、麻坑、滑坡、陡坎、陡坡、海底峡谷、古河道、浅层气、底辟等地质灾害因素^[4]。冯文科^[5]等利用声学地层分析了南海北部外陆架—上陆坡的滑坡与滑塌的形态和特征。吴时国^[6]、孙运宝^[7]和王大伟^[8]、王微微^[9]等利用地震剖面在南海北部识别了大型滑坡。杨文达^[10-11]等利用三维地震剖面研究了琼东南盆地深水海区的地质灾害类型与特征。阎贫^[12]利用深水浅地层剖面识别出珠江口外陆架—南海中陆坡区存在泥火山、滑坡和浅层气等地质灾害因素。陈泓君^[13]等完成了1:100万海南岛幅海洋区域地质调查与编图成果,取得224个表层沉积物样品,查明了区域内沉积物类型及分布特征。罗进华^[14]等使用多波束地形、浅地层剖面等对琼东南盆地块体搬运体系沉积层(mass transport complexes,简称MTCs)和浊流体系沉积结构和构造进行了高精度解析,清晰地识别出滑坡典型的表面特征及精细的海底形态,包括挤压脊、舌状体、海底线状侵蚀地形、逸出块体、两期MTCs、海底沟痕等,探讨了该区域重力

流体系的成因机制以及发育和演化机制等。在国外, Silva^[15]利用浅地层剖面、侧扫声呐、取样测试和测年等,探测了墨西哥湾区域的地质条件,确定了区域内海底滑坡的年代,有助于认识海底滑坡机制、评估滑坡再次发生的可能性; Haflidason^[16]利用柱状取样、浅层地质钻探取样揭示了Storegga滑坡规模、发育演化; Sultan^[17]利用三维地震、侧扫声呐、钻孔取样和原位测试,查明了尼日利亚河三角洲海底滑坡源区、内部结构和沉积物性质等。

2014年9月15日,中海石油(中国)有限公司对外证实南海琼东南盆地深水区发现大型气田——陵水17-2气田,是中国海油在南海自营勘探发现的第一个深水高产气田,探明储量规模超千亿立方米^[18]。

陵水17-2气田所在琼东南盆地陆坡区域受到多期构造活动、沉积物供给速率、古地貌形态、相对海平面变化等因素的综合影响,沉积构造过程相对复杂,形成了进积与加积同在、平缓与陡峭并存的大陆架边缘沉积体系,发育了种类多、规模大的深水地质灾害体,造成该区海底表层沉积物类型及其工程地质特性复杂多变,严重影响了水下生产系统、深水浮式平台、深水海底电缆管道系统及其附属设施的设计和安装^[1-3,19-22],因此,有必要对表层沉积物类型、分布及工程地质特性进行深入研究,为制定经济、安全、高效的深水油气开发工程方案提供可靠的技术依据^[22]。

本文采用工程调查船与AUV调查结合的方式,对在陵水17-2深水气田开发区域内获取的多波束测深、侧扫声呐、浅地层剖面、箱式取样、柱状取样及浅层地质钻探取样等资料进行综合分析,查明了区域内海底地形地貌形态特征,研究了海底表层沉积物类型、分布规律,分析了表层沉积物的工程地质特性,评价了地形地貌特征、沉积物类型及工程特性对深水油气开发工程设施的影响。

1 区域地质背景

陵水17-2深水气田开发区(图1)位于南海北部琼东南盆地的大陆架边缘,调查区域内水深为200~1 600 m,由西北向东南逐渐加深。根据区域

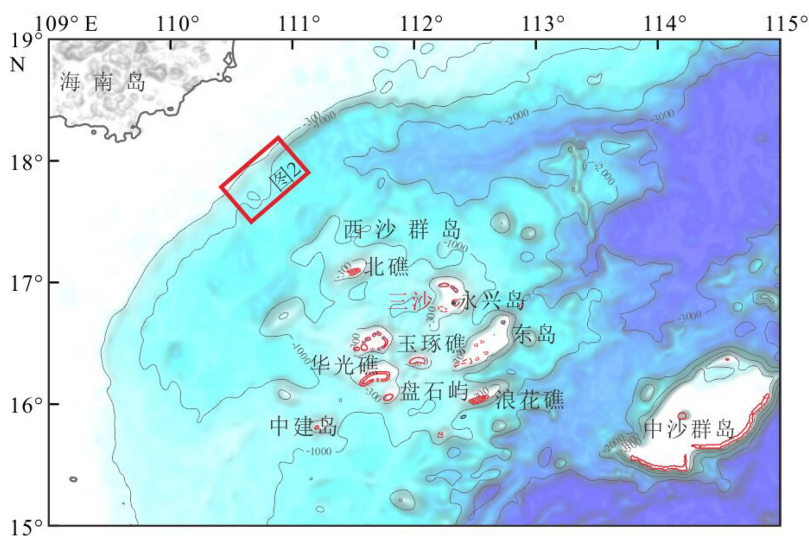


图 1 研究区域位置

Fig.1 Location of study area

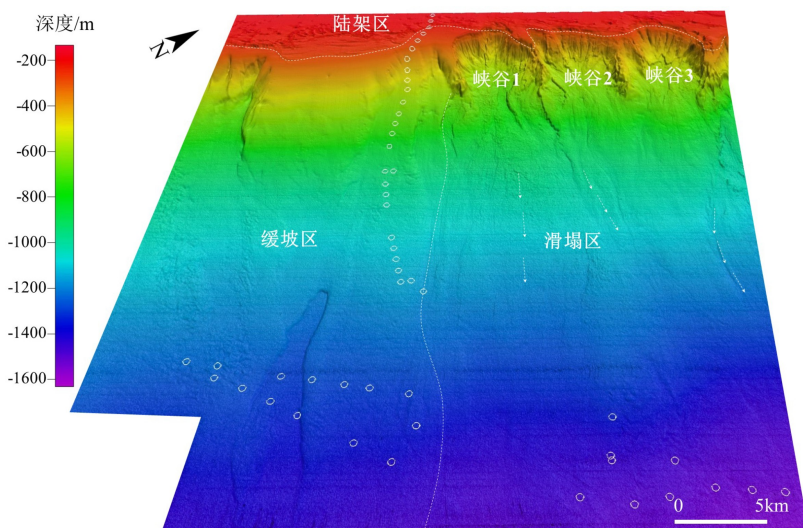


图 2 研究区域三维光照图和取样站位

白色圈为取样站位。

Fig.2 3D illumination map of study area and sampling locations

White circle is sampling locations.

内海底地形地貌特点,可将研究区域分为以下 3 个区域(图 2):

陆架区: 位于调查区域内的大陆架上。从西北往东南方向水深逐渐变深,海底地形总体变化较缓,水深一般小于 250 m,海底坡度小于 3°,局部有较多的凸起地形和裂隙发育,凸起和裂隙处海底坡度达 5°~10°,局部在 10°以上。

滑塌区: 位于大陆架坡折带以下的东北部。该区 600 m 以浅水深变化非常剧烈,海底坡度为 10°~20°,局部可达 25°; 600 m 以深区域水深变化较为平缓,海底坡度一般小于 5°。海底地形主要特征为 3 处大型海底峡谷,由西向东依次命名为峡谷

1、峡谷 2 和峡谷 3(图 2)。海底峡谷横截面宽度均为 6~7 km,峡谷间被高出的脊部分割,大型海底滑坡形成巨大的峡谷。海底峡谷有滑坡形成的陡崖,陡崖上倾方向的滑坡前缘存在拉张裂隙;在峡谷及峡谷下方,分布着峡谷坍塌后留下的陡峭地形、滑坡堆积物及冲沟等,沿堆积物的方向指示了重力流沉积体系中沉积物搬运路径(图 3)。

缓坡区: 位于大陆架坡折带以下的西南部、地形坡度较小的缓坡区域,与滑塌区间存在明显的分界线。该区域内海底地形总体平缓,海底坡度为 5°~10°,局部可达 18°。在缓坡区内,存在一个长约 18 km、宽度为 0.9~4.0 km、深度约 10~30 m 的

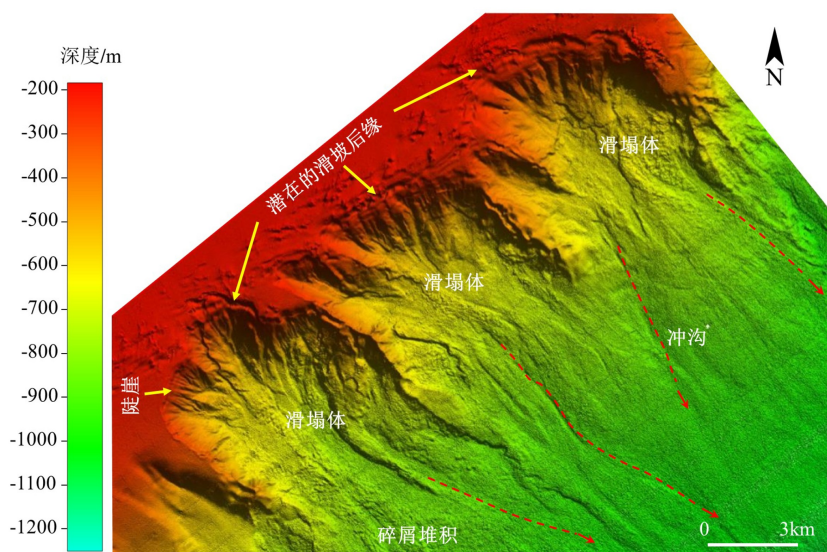


图3 海底峡谷三维光照图

Fig.3 3D illumination map of submarine canyon

狭长洼地,边缘海底坡度高达 13° 。在区域西侧边缘,存在4个小型峡谷,峡谷及峡谷下游也存在滑坡堆积物,沿堆积物的方向指示了重力流沉积体系中沉积物搬运路径。

2 方法和数据来源

2.1 间接探测法

间接探测法中,由于声学方法具有工作效率高、探测费用低、资料连续、覆盖区域大等特点,逐渐成为海洋底质探测的主要方法和手段^[23],其中多波束测深、侧扫声呐及浅地层剖面探测为当前使用的主要声学探测方法。

2.1.1 多波束测深与后向散射强度

多波束测深是目前海洋地形测量的一种主要方法。多波束测深系统不仅可以得到高精度的水深地形数据,还能获取丰富的后向散射强度数据,可利用声强信息正演海底地质学特征,能够反映海底底质的变化^[24]。后向散射强度大小能表示不同的底质类型,也能够呈现出底质的纹理结构,纹理是海底表面结构粗糙程度的直接反映,是属于特定类型的海底底质特有的属性,能区分不同类型的海底底质,因此,可结合后向散射强度和纹理来进行海底底质分类^[25]。该方法具有全覆盖、高采样率、高效率 and 低成本等优势,避免了传统方法的误分类,分类界限更加明确、更加清晰,使得大规模、大范围、高效快速的海底底质分类成为可能,将在海洋资源调查、海洋工程建设、海洋科学考察和国防

建设等方面发挥越来越重要的角色^[26]。

目前,主流的多波束测深系统主频为 $30\sim 400\text{ kHz}$,不同的频率对于海底表层沉积物的穿透能力差异较大,所能探测的海底底质类型差别也较大,高频多波束,例如EM2040只能反映出海底表层 $0\sim 0.5\text{ m}$ 的沉积物反射强度,但具备较高的分辨率;而低频的多波束,例如EM302具备一定的穿透能力,可以反映埋深在海底以下几米的地层综合信息差异,但分辨率会下降。

在本项目研究中,使用了高频和低频两种多波束测深系统获取的后向散射强度数据和海底声像图,结合取样获取的海底沉积物样品数据,实现了海底底质类型分类识别。高频多波束型号为EM2040,主频 200 kHz ,使用AUV搭载安装方式;低频多波束型号为EM302,主频 30 kHz ,使用船底安装方式。低频多波束测线总长约 $2\,000\text{ km}$,覆盖面积达 $1\,980\text{ km}^2$,获取了全区的后向散射强度分布特征,清晰显示了海底表层沉积物的变化^[27]。

2.1.2 侧扫声呐

侧扫声呐由于能够获得高质量的海底声图而在海底底质分类中得到广泛应用。由于侧扫声呐获取的海底声图反映了海底的地形、地貌及纹理特征,杨词银^[28]、张楷涵^[29]、赵永祯^[30]等均对侧扫声呐海底图像进行分析以实现海底底质分类,取得了较好的效果。

在本项目研究中,使用了AUV搭载的EdgeTech 2200获取的侧扫声呐资料进行海底底质分类判别,侧扫声呐资料测线总长约 $4\,500\text{ km}$ 。在进行海底底质分类前,对侧扫声呐图像进行相应的降低噪音、

灰度增益及均衡、海底跟踪调整、航迹平滑、斜距改正等处理工作,然后生成声呐镶嵌图。最后,采用数学形态学方法进行处理,对处理后的图像进行边缘检测,提取出特征地貌边缘,得到连续化、粗化、圆滑的特征区域边缘填充目标内部阴影且消除了背景噪声的声呐图像识别成果^[31]。

2.1.3 浅地层剖面

浅地层剖面资料海底反射强度主要与海底底质类型有关。刘玉萍^[32]等通过提取浅地层剖面资料海底均方根振幅并绘制等值线图,进而分析判别了研究区海底底质的宏观变化特征,经与海底摄像资料对比分析,验证了利用浅地层剖面资料海底振幅的特征属性直接进行底质分析的可行性。

在本项目研究中,使用了AUV搭载的Edge-Tech 2200,频率2~16 kHz,接收灵敏度-204 dB re 1 Volt/ μ Pa,分辨率6~10 cm,获取的浅地层剖面资料进行海底底质及浅地层结构探测。在研究区域内,浅地层剖面资料测线总长度约4500 km,其探测深度一般大于20 m,垂向分辨率优于0.3 m。

2.2 直接取样法

直接取样法,是海底底质探测与分类最古老、最传统的方法。一般使用蚌式、箱式、多管式、自返式或拖网等采样方法进行底质表层样品采集,或使用重力、重力活塞、振动活塞或浅钻等取样设备进行底质柱状样品采集^[33]。海底取样均按一定网格离散并现场取样,并通过室内测试分析后采用资料内插与外延确定区域内海底沉积物类型和分布特征。该方法虽能直观进行底质判断,但存在设备笨重、劳动强度大、效率低、取样数量有限、作业成本高等不足,很难在大区域范围内开展,特别是深水区域困难更大,且格网节点间沉积物类型受各种因素影响其代表性有局限,可靠度不高,无法满足现代海洋科研和开发工程的需要^[26]。因此,在此次研究中,首先采用多波束测量获取的后向散射强度进行底质区域划分,然后优化布置取样站位和数量,实现减少取样站位数量、降低作业成本的目标。

在本项目研究资料中,采用三种方式采集海底表层沉积物样品:箱式取样、柱状取样和浅地质钻探取样。当取得的样品到达作业船甲板后,先对取样长度进行测量和现场土质分类及描述,按一定长度进行切割分段,立即进行含水、容重、手动十字板、电动十字板等物理力学试验,对样品进行编录和包装,剩余样品运回实验室进行分析,包括容重、

含水率、液塑限、比重计、手动十字板、电动十字板、落锥、碳酸盐含量等试验。

3 沉积物类型及分布特征

在研究区域内,低频多波束地形及后向散射强度数据覆盖了整个区域,海底取样、浅地层剖面和侧扫声呐资料数据仅仅覆盖了工程设施区域,因此海底表层沉积物类型和分布特征主要依据多波束地形及多波束后向散射强度成果得出,在工程设施区域依据工程地质调查结果进一步细化。

根据后向散射强度成果(图4),整个区域可以较为清晰直观地识别出陆架区、缓坡区和滑塌区,分界线明显。

3.1 陆架区

陆架区内后向散射强度差异明显,呈斑驳状,与凸起地形和裂隙发育有关。从后向散射强度差异,可以清晰分辨出裸露海底的胶结物、硬质海底及浅埋的硬质地层等地质灾害现象(图5)。在这些特征之外区域,后向散射强度变化均匀,为-18~-24 dB,海底底质为黏土和粉质黏土,含分散的贝壳碎屑及胶结物,钙质含量一般为10%~14%,局部大于20%。

3.2 缓坡区

缓坡区内后向散射强度相对稳定、连续均匀变化,与水深地形呈相关变化,强度值一般小于-28 dB,特别是缓坡区水深大于700 m的下陆坡区内,后向散射强度非常均匀,表明其表层沉积物类型基本一致,垂向变化小。结合取样,该区域内海底底质为非常软的黏土。

图6和图7分别为过海底洼地、滑坡堆积物的浅地层剖面图。由图可以看出,海底至海底以下约20 m地层(蓝色虚线以上)内反射波特征表现为与海底反射平行且连续,反射界面间反射透明,无明显杂乱反射,表明该区域内沉积环境稳定,为连续沉积地层,洼地及滑坡堆积物地形特征的形成与历史滑坡有关。

3.3 滑塌区

根据多波束地形、后向散射强度分布特征、浅地层剖面资料及侧扫声呐资料判断,滑塌区是典型的由后缘滑坡源区、中部滑坡沉积物输送区和前缘滑坡体堆积区三部分组成的海底滑坡系统^[8,34]。

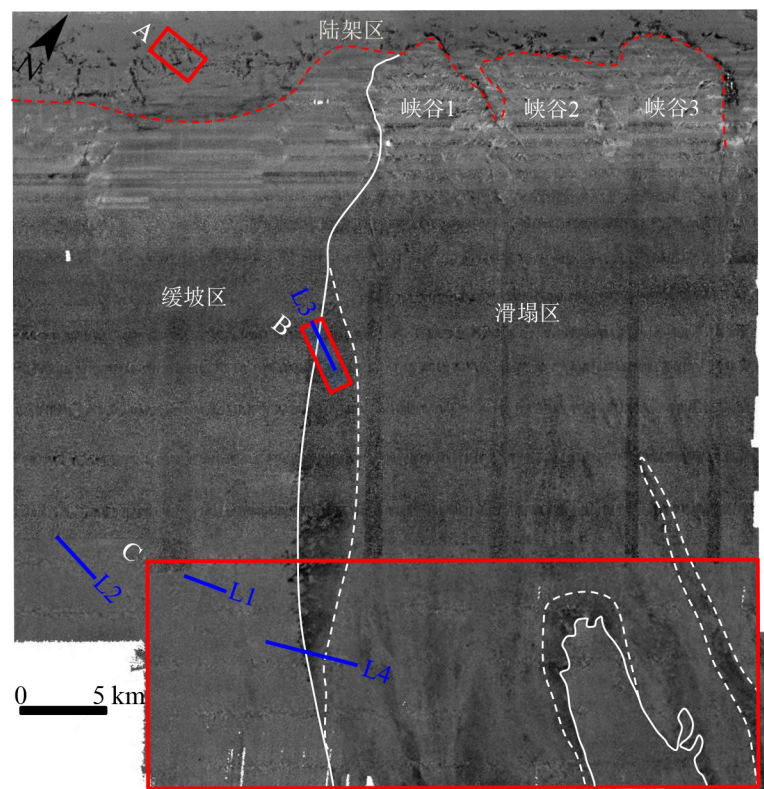


图 4 图 2 区域后向散射强度平面图及底质分区

Fig.4 Backscatter strength map of the survey area in fig.2 and sediments classification

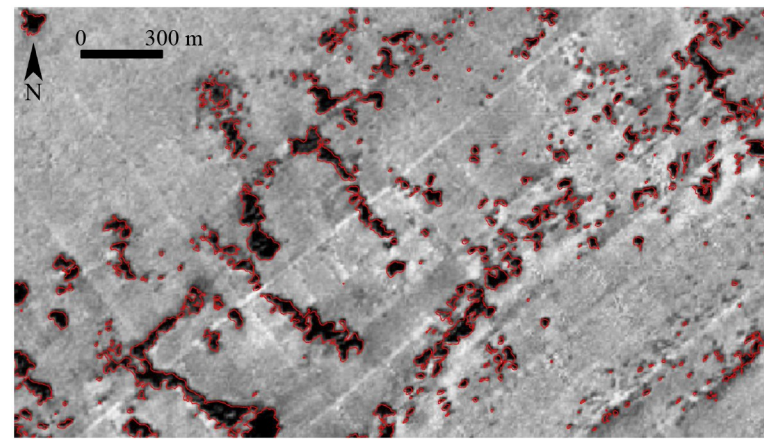


图 5 陆架区后向散射强度图及其底质分类结果 (图 4 中 A 区)

Fig.5 The backscatter strength image and seabed sediments classification in the continental shelf subarea

3.3.1 后缘滑坡源区

后缘滑坡源区位于坡折带附近的 3 个峡谷区。受峡谷区复杂崎岖的海底地形(水深高差达 500 多米)影响,后向散射强度呈杂乱、斑驳状。根据海底取样,该区域底质类型比较复杂,主要为软的褐灰色黏土,局部含砂粒、贝壳碎屑、胶结物等。在滑坡发生后,大量的滑塌沉积物已顺坡往下游转移,少量残留原地或搬运距离较短而滞留下来,滑坡后形成的陡崖也可能形成多期次小型滑塌,这些沉积物在长期动力沉积环境下改造后形成。由此可见,

在地形崎岖复杂地区使用多波束后向散射强度进行海底底质分类不准确,应选择其他探测方法。

3.3.2 中部滑坡沉积物输送区

中部滑坡沉积物输送区位于峡谷下游。该区域后向散射强度呈条带状相间分布,显示了区域内表层沉积物分布的复杂性和不均匀性,也指明了沉积物转移方向,仅在滑塌区西侧边缘存在大范围后向散射强度较强的条带(图 4B 区域),强度值一般大于-24 dB,在后向散射图中较容易识别。在同区域低频侧扫声呐(75 kHz)镶嵌图中图像均匀,未发

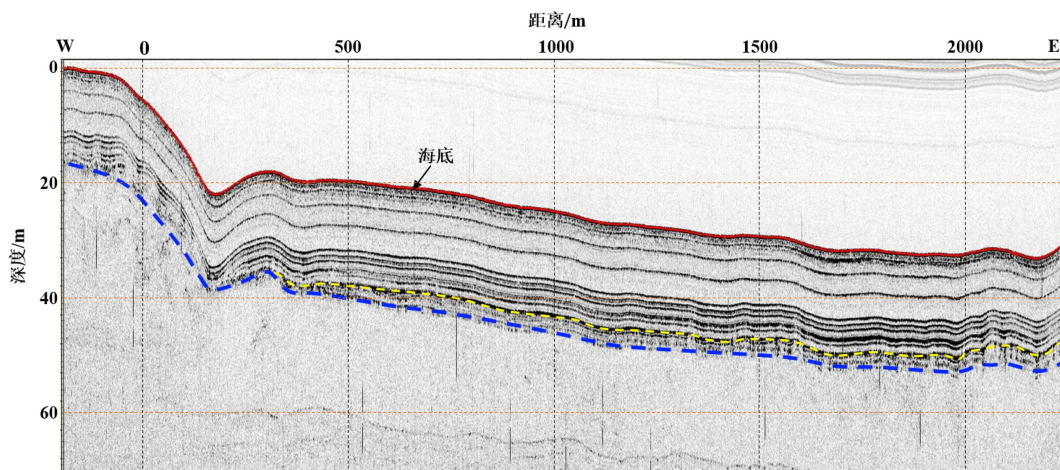


图 6 过海底洼地的浅地层剖面图 (图 4 中 L1)

Fig.6 The sub-bottom profile section crossing subsea depression (L1 in Fig.4)

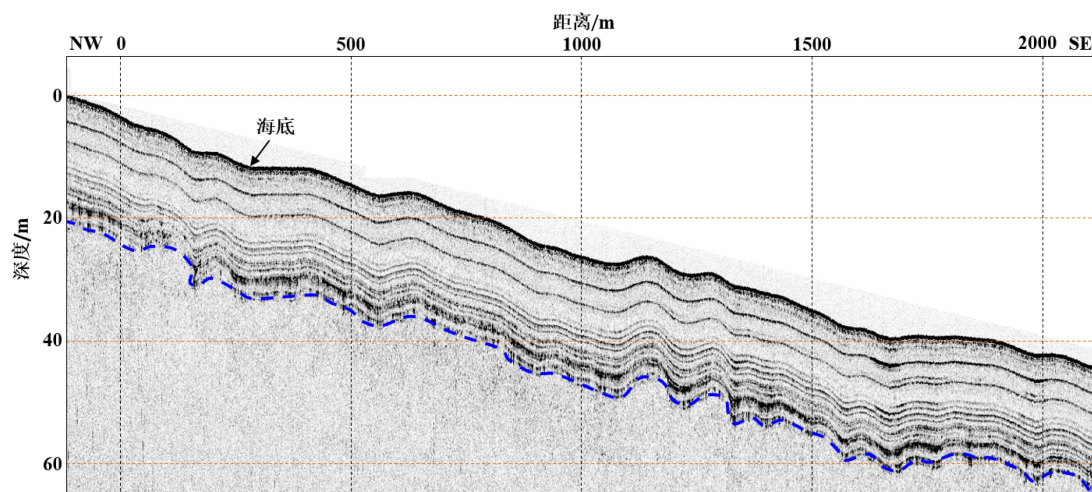


图 7 过滑坡堆积物的浅地层剖面图 (图 4 中 L2)

Fig.7 The sub-bottom profile section crossing slump deposits (L2 in Fig.4)

现明显的异常反射现象,表明海底地形平坦,海底表层沉积物均匀,沉积物类型为黏土及粉质黏土。对比该区域的浅地层剖面资料(图 8)发现,该区表层均存在一层厚度约 1.8 m 的沉积层,局部下伏 MTCs 和浊流体系沉积层^[14],部分区域 MTCs 沉积层直接裸露海底,厚度最大可达 15 m。由此可判定,该区的浊流体系沉积层导致后向散射强度增强。滑坡物质往下迁移的过程中,在主运移通道两侧,产生浊流漫溢至该处开阔地带并沉积,多填充地势低洼处,平面上彼此连接成片^[14],形成局部集中的浊流沉积层。

3.3.3 前缘滑坡体堆积区

前缘滑坡体堆积区位于峡谷下游的下陆坡区域,后向散射强度特征变化明显,反映海底表层沉积物复杂多变。在该区域西部,明显存在与缓坡区的分界线,但 MTCs 沉积层和浊流体系沉积层分界

线不明显(图 9),后向散射强度特征与中部滑坡沉积物输送区边缘区域类似。在该区域东部,存在 MTCs 的中末端—趾部区域,同时也是 MTCs 发生沉积的主要区域^[14]。在 MTCs 沉积区,后向散射强度要低于浊流沉积,与缓坡区后向散射强度接近,但分布非常不均匀。在此基础上,继续对该区后向散射结果进行了细分,可细化为缓坡区、MTCs 区、浊流区、侵蚀区,细分结果见图 10。根据取样结果,沉积物类型为非常软的黏土

上述研究结果表明,琼东南盆地研究区域内陆坡海底表层沉积环境可划分为缓坡区和滑塌区。缓坡区内属于堆积型陆坡^[35],以大量的沉积物不断加积为主,地形平缓,槽谷不发育,海底表层沉积物为非常软的高液限黏土。滑塌区属于过渡型陆坡^[35],沉积物供应量小,侵蚀和堆积作用同时存在并相互制约,槽谷规模小,滑塌作用较弱。滑塌区沉积物

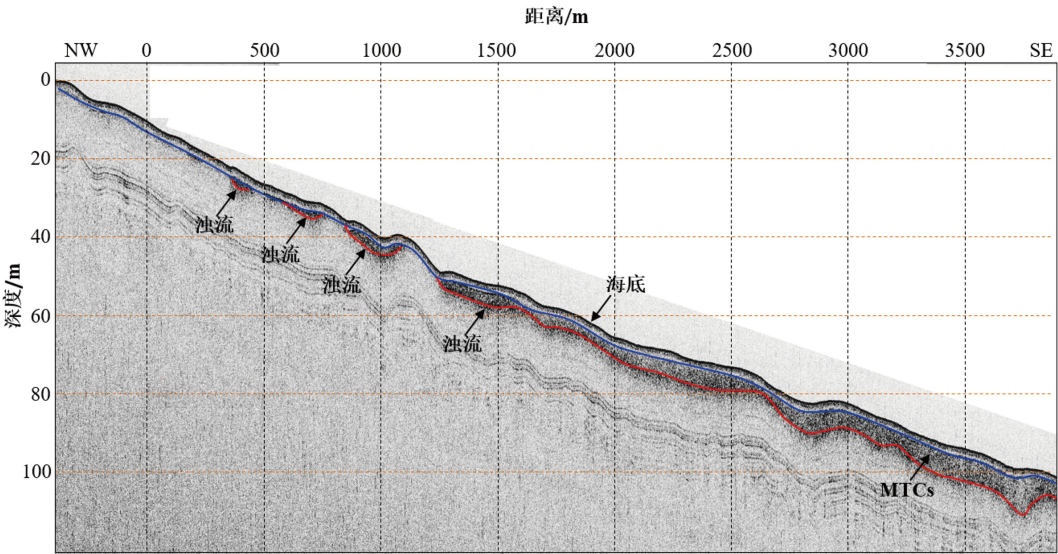


图 8 滑塌区边缘的浅地层剖面记录中的浊流沉积 (图 4 中 L3)
Fig.8 Turbidite deposits on sub-bottom profile (L3 in Fig.4)

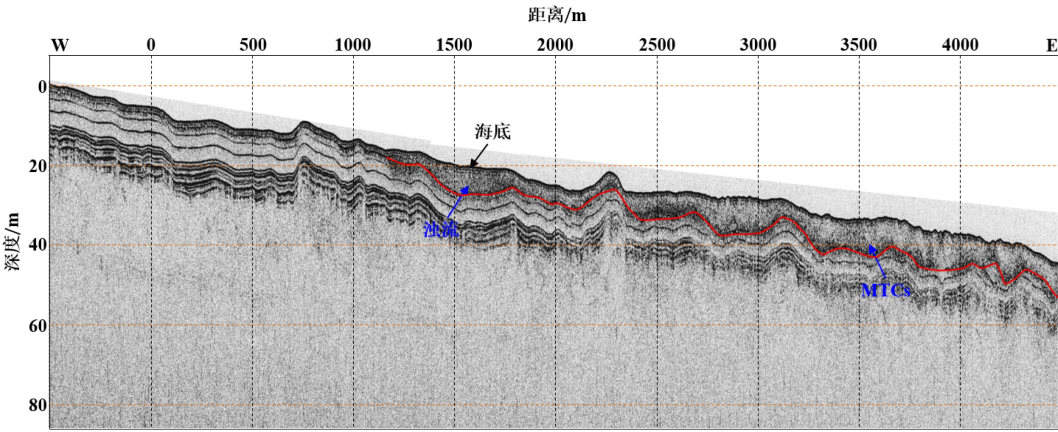


图 9 浅地层剖面记录中的缓坡区、滑塌区过渡带 (图 4 中 L4)
Fig.9 Transitional zone of gentle slope subarea and slump subarea on sub-bottom profile (L4 in Fig.4)

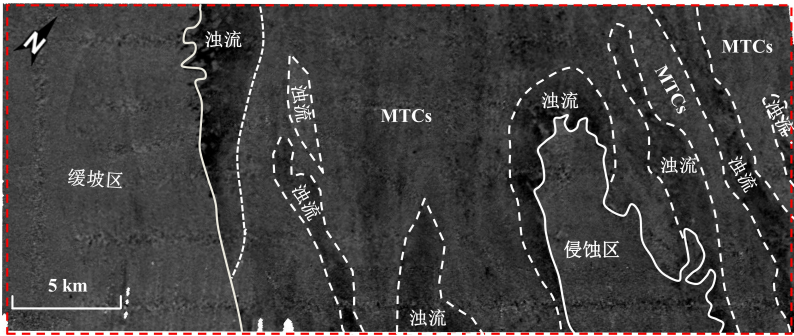


图 10 海底底质详细分区 (图 4 中 C 区)
Fig.10 Detailed seabed sediment classification (Area C in Fig.4)

主要以黏土、粉质黏土为主。

4 沉积物工程地质特性

在陵水 17-2 深水气田开发区域内，共取得

36 个海底取样样品，其中 6 个位于陆架区，18 个位于缓坡区，12 个位于滑塌区，缓坡区有 12 个位于水深小于 1000 m 的区域，6 个位于水深大于 1000 m 的区域；滑塌区有 6 个位于 MTCs 沉积区(水深均大于 1000 m)，6 个位于浊流沉积区(水深均大于

1000 m)。根据区域内 36 个站位海底取样及室内试验分析结果, 按陆架区、缓坡区(水深 > 1000 m)、缓坡区(水深 < 1000 m)、MTCs 沉积区和浊流体系沉积区统计分析了海底至海底以下约 5 m 深度范

围内的含水率、容重、中值粒径、液塑限、不排水抗剪强度等物理力学性质指标(表 1)随埋藏深度的变化趋势见图 11。

由表 1 和图 11 可以看出, 本研究区域沉积物具

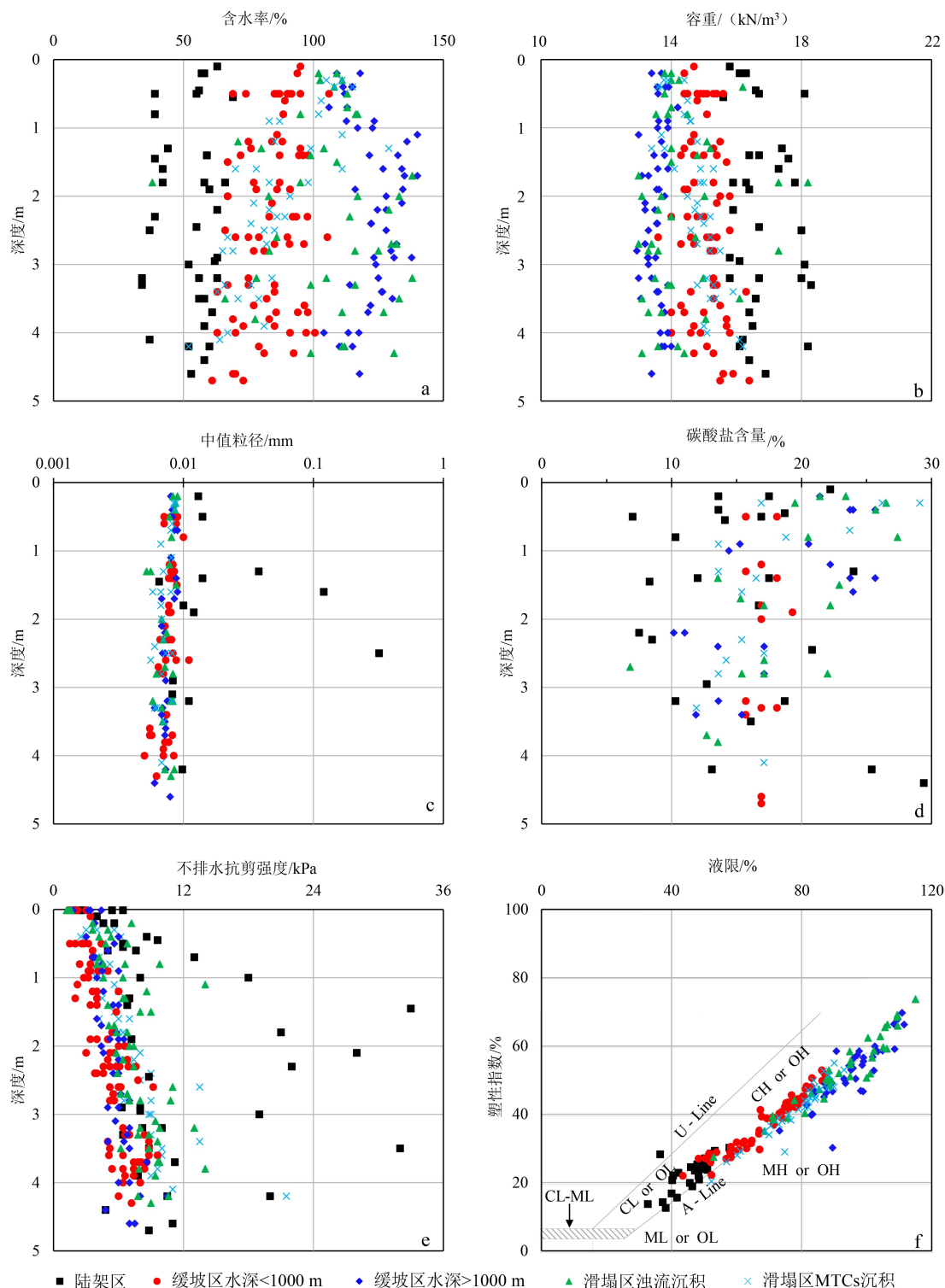


图 11 陵水 17-2 深水气田开发区沉积物工程地质特性

a. 含水率, b. 容重, c. 中值粒径, d. 碳酸盐含量, e. 不排水抗剪强度, f. 塑性图。

Fig.11 Geotechnical characteristics of sediments within LS17-2 deepwater gas field development area

a. Water content, b. unit weight, c. the median grain size, d. carbonate content, e. undrained shear strength, f. plasticity chart.

表 1 陵水 17-2 深水气田开发区沉积物物理力学性质汇总

Table 1 A summary of physico-mechanic properties of sediments within LS17-2 deepwater gas field development area

所在区域	土质类型	深度/m	含水量/%	容重/(kN/m ³)	碳酸盐含量/%	中值粒径/mm	液限/%	塑性指数/%	不排水抗剪强度/kPa
陆架区 (水深<250 m)	黏土/粉质黏土	0~5.0	30~70	15.5~18.5	7~30	0.006~0.32	30~60	10~30	2~43
缓坡区 (水深<1000 m)	黏土	0~5.0	60~106	14.0~16.5	15~20	0.005~0.01	50~90	22~55	2~9
缓坡区 (水深>1000 m)	黏土	0~1.0	100~120	13.5~14.5	17~29	0.008~0.009	70~110	40~70	1.5~7.5
	黏土	1.0~5.0	110~140	13.0~14.0	10~18	0.005~0.009	70~110	30~70	4.0~15.0
MTCs沉积区 (水深>1000 m)	黏土	0~1.0	100~120	13.5~14.5	17~29	0.008~0.009	70~110	40~70	1.5~7.5
		1.0~5.0	60~110	13.5~16.3	10~18	0.005~0.009	50~90	20~50	4.0~15.0
浊流体系沉积区 (水深>1000 m)	黏土	0~1.0	100~120	13.5~14.5	17~29	0.008~0.009	70~110	40~70	1.5~7.5
		1.0~5.0	70~140	13.0~17.3	7~28	0.005~0.009	70~110	30~70	4.0~15.0

有以下工程地质特性:

(1)含水率随水深增加不断增大,随土样深度增加而下降,容重与含水率变化规律相反,符合典型深海沉积物含水率、容重的变化规律。局部存在少量变异点位。

(2)碳酸盐含量表层较大,随土样深度增加逐步减小,随水深增加逐步增大,但增大值不明显;中值粒径随水深增加、深度增加几乎无变化,陆架区局部存在粉质细砂层,说明该区沉积物来源相近,沉积环境基本一致。

(3)陆架区表层沉积物为黏土或者粉质黏土,缓坡区、滑塌区表层沉积物主要为高液限黏土,符合典型深海沉积物的特点。

(4)陆架区表层沉积物受滑塌和剥蚀作用影响,不排水抗剪强度差异较大,为 4~40 kPa;缓坡区、滑塌区海床泥面附近(0.3 m 以内)土质不排水抗剪强度较小,为 0~4 kPa,局部达 7.5 kPa,由于上覆压力增加,沉积物抗剪强度沿土样深度逐渐增大,5.0 m 处局部最大达 22 kPa,符合典型深海表层沉积物低强度和重力流沉积物强度不均匀分布的特点。

4.1 陆架区

在陆架区,土质类型主要为粉质黏土和黏土,个别孔位夹松散的粉质细砂层;土质的含水率为 30%~70%,随埋深增加逐渐减小;容重为 15.5~18.5 kN/m³;碳酸盐含量变化范围为 7%~30%;中值粒径为 0.006~0.32 mm,与其他区域基本一致;海底泥面 0.3 m 内的不排水抗剪强度为 2~7 kPa,局部土层不排水抗剪强度较大,最高达 43 kPa。对比样品站位位置及海底地形分析,推测为表层沉积物滑塌后下伏沉积物裸露造成的。

4.2 缓坡区

在缓坡区,沉积环境相对稳定,长时间连续接受沉积物堆积。土质类型主要为非常软的黏土。随土层埋深增加,土层含水率减小、容重增大。随着水深的增加,相同埋藏深度的土层含水率呈逐渐增大、容重呈逐渐减小趋势。碳酸盐含量变化范围为 10%~29%。中值粒径为 0.005~0.01 mm。海底泥面附近(0.3 m 以内)不排水抗剪强度约为 2~4 kPa,不排水抗剪强度随土层埋深增加而逐渐增大,5.0 m 深度最大可达 15 kPa。该区域土质条件非常适合吸力式、防沉板及抓力锚等基础形式。

4.3 滑塌区

在滑塌区,浊流沉积、MTCs 沉积区土质类型基本一致,主要为非常软的黏土;表层约 1.0 m 深度范围内为近代沉积物,处于超固结状态,相近水深深度范围内其物理力学性质基本相同;1.0~5.0 m 深度范围内,土质含水率、容重、不排水抗剪强度等物理力学性质差别较大,中值粒径差别较小,土质不排水抗剪强度随埋深增大而增大,常出现不排水抗剪强度突然变大的土层,最大达 22 kPa,反映了沉积物的横向不均匀性。

该区域土质条件不适合吸力式基础形式,适合防沉板、抓力锚、打入桩等基础形式,可降低后续可能出现的安装风险。

5 结论

在陵水 17-2 深水气田开发区域内,根据海底地形及海底表层沉积物类型分布特征,可划分为陆架区、缓坡区、滑塌区。陆架区表层沉积物以黏土和

粉质黏土为主,与近海沉积物物理力学性质相近,不同站位物理力学性质差异较大,局部夹砂层;缓坡区和滑塌区沉积物主要为高液限黏土,具有高含水率、低密度、高孔隙比、高液限、高可塑性、低强度等典型深水沉积特点,天然含水率大于液限。区域内存在厚度约1.0 m(在浅水区域厚度大于1.0 m)的近代沉积物,处于超固结状态,相近水深深度范围内其物理力学性质基本相同,特别是海底泥面0.3 m以内,土质不排水抗剪强度较小,为0~4 kPa,非常有利于海底电缆、海底管道、脐带缆的铺设。缓坡区浅层土质条件非常适合吸力式、防沉板及抓力锚等基础形式,滑塌区浅层土质条件适合防沉板、抓力锚及打入桩等基础形式,可降低后续可能出现的安装风险。上述研究成果将对琼东南盆地深水油气田开发工程的设计和安装施工具有较强的指导意义。

船载低频多波束后向散射强度数据能够进行大范围海底底质分类,但在地形崎岖及变化复杂地区分类效果差,需选择其他海底底质探测方法。采用工程调查船与AUV调查相结合的方式对海底底质探测,能够提高海底底质分类精度和质量,能够满足深水工程项目高精度、高密度、高分辨率的资料需求,有利于油气田开发工程设施位置优选、路由优化和钻井水下井口稳定性分析与评价,可为制定安全经济高效的深水油气田开发工程方案提供技术依据。

参考文献 (References)

- [1] 李新仲, 谭越. 海上油气田开发工程模式探讨[J]. *石油工程建设*, 2015, 41(1): 1-4. [LI Xinzong, TAN Yue. Discussion on development engineering modes for offshore oil and gas fields [J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2015, 41(1): 1-4.]
- [2] 王丽勤, 侯金林, 庞然, 等. 深水油气田开发工程中的基础应用探讨[J]. *海洋石油*, 2011, 31(4): 87-92. [WANG Liqin, HOU Jinlin, PANG Ran, et al. The application of foundations in deepwater oil and gas field development engineering [J]. *Offshore Oil*, 2011, 31(4): 87-92.]
- [3] 王桂林, 段梦兰, 冯玮, 等. 深海油气田开发模式及控制因素分析[J]. *海洋工程*, 2011, 29(3): 139-145. [WANG Guilin, DUAN Menglan, FENG Wei, et al. Analysis of control factors in deepwater oil & gas field development [J]. *The Ocean Engineering*, 2011, 29(3): 139-145.]
- [4] 刘乐军, 傅命佐, 李家钢, 等. 荔湾3-1气田海底管道深水段地质灾害特征[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(2): 162-174. [LIU Lejun, FU Mingzuo, LI Jiagang, et al. Geologic Hazards in the deep pipeline routing area of the Liwan 3-1 gas field in the South China Sea [J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(2): 162-174.]
- [5] 冯文科, 石要红, 陈玲辉. 南海北部外陆架和上陆坡海底滑坡稳定性研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(2): 81-94. [FENG Wenke, SHI Yaohong, CHEN Linghui. Research for seafloor landslide stability on the outer continental shelf and the upper continental slope in the northern South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14(2): 81-94.]
- [6] 吴时国, 陈珊珊, 王志君, 等. 大陆边缘深水海底滑坡及其不稳定性风险评估[J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 430-437. [WU Shiguo, CHEN Shanshan, WANG Zhijun, et al. Submarine landslide and risk evaluation on its instability in the deepwater continental margin [J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 430-437.]
- [7] 孙运宝, 吴时国, 王志君, 等. 南海北部白云大型海底滑坡的几何形态与变形特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(6): 69-77. [SUN Yunbao, WU Shiguo, WANG Zhijun, et al. The geometry and deformation characteristics of Baiyun submarine Landslide [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(6): 69-77.]
- [8] 王大伟, 吴时国, 秦志亮, 等. 南海陆坡大型块体搬运体系的结构与识别特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(5): 65-72. [WANG Dawei, WU Shiguo, QIN Zhiliang, et al. Architecture and identification of large quaternary mass transport depositions in the slope of South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(5): 65-72.]
- [9] Wang W W, Wang D W, Wu S G, et al. Submarine landslides on the north continental slope of the South China Sea [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17(1): 83-100.
- [10] 杨文达, 张昇彪, 李斌. 南海琼东南深水海区地质灾害类型与特征[J]. *海洋石油*, 2011, 31(1): 1-7. [YANG Wenda, ZHANG Yibiao, LI Bin. Types and characteristics of deepwater geologic hazard in Qiongdongnan of the South China Sea [J]. *Offshore Oil*, 2011, 31(1): 1-7.]
- [11] 杨文达, 李斌, 胡津荧, 等. 三维地震资料在深水油气勘探井场地质灾害评价中的运用: 以南海琼东南海区为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(1): 83-90. [YANG Wenda, LI Bin, HU Jinying, et al. Using 3D Seismic data to evaluate deepwater geohazards for well site investigation: a case of Qiongdongnan Block in South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(1): 83-90.]
- [12] 阎贫, 王彦林, 郑红波. 南海北部白云凹陷-东沙岛西南海区的浅地层探测与深水沉积特点[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(2): 115-122. [YAN Pin, WANG Yanlin, ZHENG Hongbo. Characteristics of deep water sedimentation revealed by sub-bottom profiler survey over the Baiyun Sag: southwest Dongsha Island Waters in the northern South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(2): 115-122.]
- [13] 陈泓君, 彭学超, 朱本铎, 等. 南海1: 100万海南岛幅海洋区域地质调查与编图成果综述[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(6): 83-96. [CHEN Hongjun, PEN Xuechao, ZHU Benduo, et al. A brief review of 1: 1 000 000 marine geological survey and mapping results of the Hainan sheet in the South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(6): 83-96.]
- [14] 罗进华, 朱培民. 琼东南盆地陆坡区重力流沉积体系超高精度解析[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(6): 42-50. [LUO Jinhua, ZHU Peimin. Gravity induced deposits in the continental slope of Qiongdongnan

- basin based on ultrahigh resolution AUV data [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(6): 42-50.]
- [15] Silva A J, Baxter C D P, Larosa P T, et al. Investigation of mass wasting on the continental slope and rise [J]. *Marine Geology*, 2004, 203(3-4): 355-366.
- [16] Hafliðason H, Sejrup H P, Nygård A, et al. The Storegga Slide: architecture, geometry and slide development [J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1-4): 201-234.
- [17] Sultan N, Voisset M, Marsset B, et al. Potential role of compressional structures in generating submarine slope failures in the Niger Delta [J]. *Marine Geology*, 2007, 237(3-4): 169-190.
- [18] 谢玉洪. 南海北部自营深水天然气勘探重大突破及其启示[J]. *天然气工业*, 2014, 34(10): 1-8. [XIE Yuhong. A major breakthrough in deepwater natural gas exploration in a self-run oil/gas field in the northern South China Sea and its enlightenment [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(10): 1-8.]
- [19] 杨进, 李文龙, 胡志强, 等. 深水钻井水下井口稳定性研究进展[J]. *中国海上油气*, 2020, 32(4): 124-130. [YANG Jin, LI Wenlong, HU Zhiqiang, et al. Research progresses on subsea wellhead stability of deep water drilling [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(4): 124-130.]
- [20] 郑利军, 段梦兰, 刘军鹏, 等. 水下生产系统选型影响因素研究[J]. *石油矿场机械*, 2012, 41(6): 67-71. [ZHENG Lijun, DUAN Menglan, LIU Junpeng, et al. Study of influencing factors on subsea production system selection [J]. *Oil Field Equipment*, 2012, 41(6): 67-71.]
- [21] 赵党, 郝双户, 何宁. 海底管道稳定性分析[J]. *舰船科学技术*, 2013, 35(5): 99-102. [ZHAO Dang, HAO Shuanghu, HE Ning. Survey on on-bottom stability design of submarine pipelines [J]. *Ship Science and Technology*, 2013, 35(5): 99-102.]
- [22] 朱海山, 李达, 魏澈, 等. 南海陵水17-2深水气田开发工程方案研究[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(4): 170-177. [ZHU Haishan, LI Da, WEI Che, et al. Research on LS17-2 deep water gas field development engineering scenario in South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(4): 170-177.]
- [23] 吴自银, 阳凡林, 李守军, 等. 高分辨率海底地形地貌: 可视计算与科学应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017. [WU Ziyin, YANG Fanlin, LI Shoujun, et al. High Resolution Submarine Geomorphology Visual Computation and Scientific Applications[M]. Beijing: Science Press, 2017.]
- [24] 纪雪. 基于多波束数据的海底底质及地形复杂度分类研究[D]. 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文, 2017. [JI Xue. Classification of seabed sediment and terrain complexity based on multibeam data[D]. Master Dissertation of the First Institute of Oceanography, State Bureau of Oceanic Administration, 2017.]
- [25] 罗伟东, 郭军. 基于多波束背向散射数据的海底底质分类[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(8): 57-62. [LUO Weidong, GUO Jun. Seabed sediment classification based on multibeam backscatter data [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(8): 57-62.]
- [26] 唐秋华, 纪雪, 丁继胜, 等. 多波束声学底质分类研究进展与展望[J]. *海洋科学进展*, 2019, 37(1): 1-10. [TANG Qiuhua, JI Xue, DING Jisheng, et al. Research progress and prospect of acoustic seabed classification using multibeam echo sounder [J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(1): 1-10.]
- [27] 金绍华, 翟京生, 刘雁春, 等. Simrad EM多波束反向散射强度数据精处理研究[J]. *测绘科学*, 2010, 35(2): 106-108. [JIN Shaohua, ZHAI Jingsheng, LIU Yanchun, et al. Study on processing of Simrad EM multibeam backscatter data [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35(2): 106-108.]
- [28] 杨词银. 基于侧扫声纳成像的海底底质识别研究[D]. 中国科学院声学研究所博士学位论文, 2005. [YANG Ciyin. Seabed sediment classification based on side scan sonar imagery[D]. Doctor Dissertation of the Institute of Acoustics of the Chinese Academy of Sciences, 2005.]
- [29] 张楷涵, 袁飞, 程恩. 侧扫声纳图像噪声模型的分析[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2018, 57(3): 390-395. [ZHANG Kaihan, YUAN Fei, CHENG En. Analysis of side-scan sonar image noise model [J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2018, 57(3): 390-395.]
- [30] 赵永祯, 唐劲松, 钟何平. 基于声纳图像纹理特征的海底底质分类方法研究[J]. *海洋测绘*, 2015, 35(3): 60-63. [ZHAO Yongzhen, TANG Jinsong, ZHONG Heping. Seabed sediment classification based on texture features of sonar imagery [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2015, 35(3): 60-63.]
- [31] 罗进华, 蒋锦朋, 朱培民. 基于数学形态学的侧扫声纳图像轮廓自动提取[J]. *海洋学报*, 2016, 38(5): 150-157. [LUO Jinhua, JIANG Jinpeng, ZHU Peimin. Automatic extraction of the side-scan sonar imagery outlines based on mathematical morphology [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 38(5): 150-157.]
- [32] 刘玉萍, 丁龙翔, 杨志成, 等. 利用浅剖资料进行海底底质分析[J]. *物探与化探*, 2016, 40(1): 66-72. [LIU Yuping, DING Longxiang, YANG Zhicheng, et al. Seabed sediment analysis using sub-bottom profile data [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(1): 66-72.]
- [33] 国家海洋局. GB/T 12763.8-2007 海洋调查规范 第8部分 海洋地质地球物理调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [State Oceanic Administration. GB/T 12763.8-2007 Specifications for oceanographic survey: Part 8: marine geology and geophysics survey[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.]
- [34] Prior D B, Bornhold B D, Johns M W. Depositional characteristics of a submarine debris flow [J]. *The Journal of Geology*, 1984, 92(6): 707-727.
- [35] 陈泓君, 詹文欢, 温明明, 等. 南海西北部琼东南盆地陆架坡折带类型及沉积作用特征[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(8): 1-9. [CHEN Hongjun, ZHAN Wenhuan, WEN Mingming, et al. Characteristics of shelf break and sedimentation process at the Qiongdongnan basin, Northwestern South China Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(8): 1-9.]