

引用格式:柯萃干,罗进华,刘双双,等.基于三维地震的浅层地质灾害评估方法——以南海某深水工区为例[J].油气藏评价与开发,2021,11(5):716-723.

KE Cuigan, LUO Jinhua, LIU Shuangshuang, et al. Shallow geohazard evaluation method based on 3D seismic: A case study of a deep-water work area in the South China Sea[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5): 716-723.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.05.008

# 基于三维地震的浅层地质灾害评估方法

## ——以南海某深水工区为例

柯萃干<sup>1,2</sup>, 罗进华<sup>1,2</sup>, 刘双双<sup>1</sup>, 陈冠军<sup>1</sup>, 李衍峰<sup>1</sup>

(1. 中海油田服务股份有限公司, 天津 300459; 2. 中国海油天然气水合物国家重点实验室, 天津 300459)

**摘要:**海上油气勘探逐渐由浅水向深水挺进,而南海深水油气资源潜力巨大。通常,深水勘探项目工程规模体量大,项目管理要求高,调查难度大。由于海洋气候环境多变、地质环境相对复杂、调查船舶和调查设备专业性强、水下定位精度要求高等因素,深水调查区域在委托技术要求、工程资金成本、作业安全风险方面显著高于浅水工区。在南海某深水工区,利用三维地震数据体的海底拾取、过井剖面、最大负振幅、地震切片等,评估工区水深、海底地貌、浅地层、断层、振幅异常等调查内容,对浅层地质情况进行灾害预测、安全评估,为目标油气矿区的水下工程设施系统的就位、安装、生产等提供指引。依据三维地震数据探究一种相对简易而实用的深海浅层地质灾害评估的方法技术,作为海上油气工程项目EPCI(设计、采办、建造、安装总承包方式)全生命周期中的组成部分,为工程计划顺利开展提供必要支撑。

**关键词:**浅层灾害;最大负振幅;地震切片;三维地震;深水工区;南海

中图分类号:TE58

文献标识码:A

## Shallow geohazard evaluation method based on 3D seismic: A case study of a deep-water work area in the South China Sea

KE Cuigan<sup>1,2</sup>, LUO Jinhua<sup>1,2</sup>, LIU Shuangshuang<sup>1</sup>, CHEN Guanjun<sup>1</sup>, LI Yanfeng<sup>1</sup>

(1. China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China;

2. State Key Laboratory of Natural Gas Hydrate, CNOOC, Tianjin 300459, China)

**Abstract:** The offshore oil and gas exploration is gradually advancing deeper. Meanwhile, the South China Sea has great potential for deep-water oil and gas resources. Generally, for the deep water exploration, the project scale is large, the requirements of the project management are high, and the investigation is difficult. Due to the factors such as the changeable marine climate environment, the relatively complex geological environment, the professional survey vessels or survey equipment, and the high requirement of underwater positioning accuracy, the commissioned technical requirements, project capital cost and operation safety risk in the deep water survey area are significantly higher than those in the shallow area. In a deep-water work area in the South China Sea, the seabed picking up, well pass section, maximum negative amplitude and seismic slice of the 3D seismic data are used to evaluate the bathymetry, seabed topography, shallow strata, faults, amplitude anomalies and other investigation contents of the work area, so as to carry out the disaster prediction and safety assessment of the shallow geological conditions to guide the emplacement, installation and production of the underwater engineering facilities system in the target oil and gas mining area. Based on the 3D seismic data, a relatively simple and practical method for geological hazard assessment in shallow layer of the deep water is explored. As a part of the desktop research stage in the whole life cycle of EPCI (Engineering, Procurement, Construction and Installation), this method provides necessary support for the smooth development of the project plan.

**Keywords:** shallow hazards, maximum negative amplitude, seismic slice, 3D seismic, deep-water work area, the South China Sea

收稿日期: 2021-02-25。

第一作者简介:柯萃干(1986—),男,本科,工程师,主要从事海洋勘探、工程勘察方面工作。地址:天津市塘沽海洋高新技术开发区海川路1581号,邮政编码:300459。E-mail:kecg@cosl.com.cn

在海上油气勘探过程中,需要逐步加强海洋资源的综合开发利用,防范海洋灾害等问题<sup>[1-2]</sup>。近年,中国油气勘探开发逐渐向深水挺进,而南海深水区油气勘探开发潜力巨大,南海北部已发现14个大中型深水油气田<sup>[3]</sup>,如陵水17-2深水气田。

随着深海油气勘探开发工作的深入,深水勘察装备技术势必需要不断发展。我国自主研发的海洋石油708/709深水多功能勘察船(自治潜水器调查、海床圆锥贯入实验)、海洋石油981/982深水半潜式钻井平台、深海一号生产储油平台等系列深水利器,逐步成为与深水勘探开发配套的工程技术装备。

深水勘探工程中,需要对历史数据收集整合,大范围勘探阶段的数字地震油气勘探、数字地震属性分析<sup>[4]</sup>,初勘阶段的工区多波束扫海踏勘调查,DT(详勘阶段的深拖)/AUV(自治潜水器)浅表层精细调查、ROV(遥控水下机器人)浅表层精细调查,合成孔径声呐/三维水下激光调查,地质钻孔取样、海底原位CPT(圆锥贯入实验,国内称作静力触探实验)、钻井内测井等成果综合研究,对目标油气矿区进行海上工程的可行性论证<sup>[5]</sup>、地质灾害评估等。

浅层地质灾害评估可评价深水油气勘探井场的适宜性,为防治灾害性地质现象提供基础资料<sup>[6-7]</sup>。一般情况下,采用单/多波束测深、侧扫地貌、中浅地层剖面、高分辨率数字地震等常规模拟和数字物探方法<sup>[8-9]</sup>,依据水深、地貌、中浅地层剖面、数字地震等调查成果,尽可能地详细描述和分析调查区域的水深变化及海底地形起伏和地貌特征、海底以下具有灾害影响的地质因素,并进行安全性评估<sup>[10]</sup>。

上述桌面研究可以替换深水井场调查的部分项目<sup>[9]</sup>,根据钻井平台类型(锚系型或动力定位),使用SMT软件进行三维地震体处理解释,利用振幅、频率和地震时间切片等来识别地层和地质特征的变化<sup>[11-12]</sup>,对深水勘探区浅层地质灾害进行评价。

## 1 工程背景

### 1.1 区域地质背景

南海某深水工区位于珠江口盆地,即南海北部大陆边缘,呈北东-东走向。以“南北分带、东西分块”为主要构造特征。其中,白云凹陷是南海北陆缘最大的深水凹陷<sup>[13-14]</sup>。

### 1.2 工区概况及研究参数

南海某深水工区,位于中国南海东部深水海域,油田区所处海域水深500~800 m。

利用约5 km×5 km区域的海上高分辨率三维地震数据体,对预定井位进行浅层地质灾害评估。三维地震资料以4 ms的采样间隔来处理,主测线和联络测线的间隔分别为25 m和12.5 m,最小可识别的水平尺寸100 m×50 m,最小地层分辨率( $\lambda/4$ ,假定海底附近平均速度为1 600 m/s)5.5~25 m。数据体记录长度约5 s,浅层地质灾害评估的范围一般限于海底以下约1 000 m内<sup>[15-16]</sup>。

## 2 技术手段

以三维地震数据体为研究基础,结合油矿区基本石油地质条件和区域地质背景,对深水工区常见浅层地质灾害类别进行分类、整理、评价<sup>[17]</sup>,建立相适应的解释类型数据库。根据调查目的或要求,选择对浅层灾害地质研究有重要意义的层位进行全工区解释,并进行精细构造填图,分析海底以下地层中各种异常反射的分布范围。

利用地震相识别、地震切片、地震属性分析等<sup>[18]</sup>,充分识别浅层断裂及断层、浅层气、异常反射等地质灾害因素的展布规律,进行较为全面、准确的综合评价。

### 2.1 地层分辨率

研究区三维地震数据主频为17~75 Hz。地震波能识别的最薄地层厚度为1/4波长,地层垂向分辨率可达10 m量级,说明该区具有高分辨率地震勘探的频谱特征。

### 2.2 计算水深

计算水深是基于整个研究区域的三维地震资料中拾取的海底初至波旅行时得出的。时深转换经验公式<sup>[19-20]</sup>为:

$$D=0.3048(0.1105-5.0669193T+468.6693T^2-554.7107T^3+340.7019T^4-116.9910T^5+20.7280T^6-1.4658T^7) \quad (1)$$

式中: $D$ 为计算水深,m; $T$ 为单程旅行时间,s。

由于海水温度与盐度会引起海水声速的变化,在约300 m以内的浅水区域,实际水深与计算水深存

在约为0.9%的误差;当实际水深达到1 829 m时,估算该误差将逐渐减小到约0.3%。以上误差范围基本符合国标规定范围。然而,在三维地震资料解释中,数据软件对海底拾取的可靠性也影响着水深计算的绝对精度。三维地震采集时震源和拖缆深度校正的误差(深度约10 m)也会给基于地震剖面的计算水深带来潜在的不准确性。

在该次三维地震资料中,海底反射明显,拾取的精度较高。在求得计算水深时,未修正三维地震资料延时,但对于桌面研究时期,海底相对地形仍有参考价值。

### 2.3 海底地貌特征

基于三维地震资料中拾取的海底,通过各种不同的海底影像和解释,分析研究了整个研究区域的海底地形地貌特征。

由于这些分辨率限制,用三维地震资料一般不可能探测出海底表面较小的物体,如船只残骸、管道和一般的障碍物及遗弃物。因此,基于现有的三维地震资料,仅能发现尺寸明显大于100 m×50 m的海底特征(最少4个25 m×12.5 m的面元大小的物体),一般难以发现小于该尺寸的地形地貌特征或海底遗留物。

### 2.4 地层中的时深转换

从三维地震数据体中提取地层中的层速度,并反算时深转换公式<sup>[21]</sup>。用每层的层速度来计算各个层间的厚度,然后建立时深转换关系,最后生成适合调查区域地层资料情况的4次多项式函数公式。时深转换公式如下:

$$D = -33.64T_1^4 + 256.9T_1^3 - 275.7T_1^2 + 1025T_1 - 31.71 \quad (2)$$

式中: $D$ 为深度,m; $T_1$ 为海底以下的双程反射旅行时间,s。

### 2.5 异常反射区

在浅层灾害识别和预测之前,要结合浅层灾害的形成机制及不同剖面反射特征,制定相应的浅层灾害预测方法,从而提高浅层灾害预测的效率。除了常规的地震剖面识别外,还可以通过三瞬时剖面处理、反演和剩余层速度预测天然气水合物,利用速度场技术和相关属性分析技术预测浅层天然气,通过压力预测和地震反演来预测浅水流等<sup>[6,10]</sup>。

对于深水工区的浅层地质灾害一般进行定性的描述和识别,而准确识别需要通过多方面因素确认。常见的地震属性有三瞬属性、亮点属性、“甜点”属性<sup>[13]</sup>、相干体、叠后层间最大负振幅、最小负曲率等<sup>[12,18]</sup>。但很多地震属性所反映的地质意义并不完全明确,对特定地质特征敏感度不同,故浅层地质灾害的识别需要综合分析确认。

在三维地震数据体中,海底产生高阻抗的声波响应,表现为一个正极性、正振幅的峰值反射界面。地层中潜在的浅层天然气积聚区会产生低阻抗的声波响应,表现为负极性的强振幅异常;地层中大量的天然气水合物沉积积聚区会产生高阻抗的声波响应,表现为正极性的强振幅异常;地层中疑似的地层成分差异区域,表现为极性不变的强振幅异常。另外,地层成分的土力学差异或局部沉积环境改变,会造成区域性地层厚度的变化。

三维地震资料不能识别小于最小可识别的尺寸的浅层气或振幅反射异常,也不能识别出小于上述尺寸的分散的其他地质特征,如小范围层间浅层气层/气团。

其他浅表层异常反射特征有异常沉积层序、泥火山、浅层断层、浅层气、气烟囱、浅层水流、超压层、埋藏古河道、砾石层、天然气水合物等。

为研究含浅层气的地质异常反射特征,采用地震工作站的处理解释软件模块,包括提取每个地震道的最大负振幅值、最大正振幅值、均方根振幅等,来进行振幅分析研究区域的全部数据。振幅析取方法使用的背景阈值约为周围区域平均振幅值的5倍,超过该背景阈值的振幅将评估为潜在的浅层气造成的异常振幅<sup>[16,18]</sup>。在地震工作站绘出振幅异常的范围和分布,并进行人工检查。

在地震剖面上观察这些异常反射,来确定和碳氢化合物积聚有联系的地震特征,包括:①负极性、强振幅的声学响应;②在一个振幅异常中存在近乎成对的波谷一波峰反射同相轴(假定零相位);③地质走向上振幅异常表明可能存在复杂河道或其他砂体沉积环境<sup>[10]</sup>;④振幅异常与结构的一致性;⑤“平点”存在预示气/水分界面<sup>[7,15]</sup>;⑥地层尖灭处极性反转的振幅异常<sup>[15,22]</sup>;⑦速度下拉及异常反射下的频率阴影(“暗点”)。

与浅层气有关的识别过程中,综合了一种或者

多种地震波属性,如强振幅、同相轴突变、相位反转、速度降低、声波的绕射、衰减及对下覆地层反射的屏蔽。但并非所有的振幅异常都与浅层气有关,天然气水合物、浅层水或常规地层成分差异、有机物的沉积、地层反射的屏蔽、局部岩性改变以及相邻的目标物反射造成的调谐效应也可能造成强的振幅异常<sup>[22-23]</sup>,因此,至少含有上述几种特征的强振幅、低阻抗的反射异常才解释为可能的浅层气体聚积区。

### 3 浅层地质灾害评估

研究区数据体范围:主测线(Inline)为12 441~12 871,间隔25 m;交叉测线(Crossline)为11 931~12 361,间隔12.5 m。频谱见图1。

#### 3.1 水深和地形

南海某工区井位水深约为610 m,井位附近水深

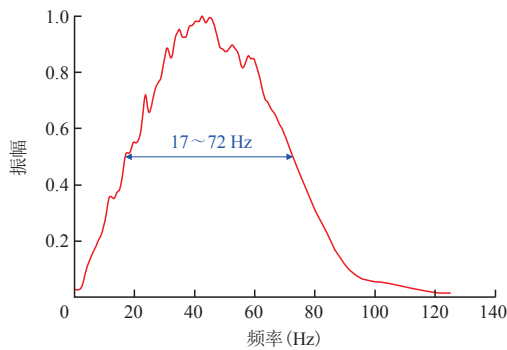


图1 三维地震数据体频谱

Fig. 1 Spectrum of 3D seismic data volume

变化不大,工区东南局部水深变化较大。水深由西北向东南逐渐变深(水深数据提取自未加延时校正的三维数据体)。井位处坡度约为5.6°,东南部地形变化较大(图2)。

#### 3.2 剖面

在研究区域内,地层反射以近水平反射结构为主,反射波连续性好,部分区域受到断层、振幅异常影响。图3与图4分别为井口中心附近测线3D地震剖面及振幅包络图。

#### 3.3 地层

在地震数据中,层位是连续且明显的地震反射面,其特征为均匀连续的相位、振幅和波形。

通过对地层剖面资料的分析,根据地层内部的反射结构及沉积特征的变化情况,对调查区域中浅部地层沉积进行了划分和分析。调查范围内的地层划分为3层,对应底界面分别命名为R1-R3(图5)。

在研究区域内,海底至地层界面R1内地层,是最新的沉积地层,覆盖整个研究区域,平行或近水平反射结构,反射波连续性好,层内反射能量弱到中等,频率高。地层界面R1至地层界面R2内地层,反射能量以中等到强为主,部分区域反射波被断层错断。地层界面R2至地层界面R3内地层,反射能量强,部分区域反射波受断层影响明显。地层界面R3至资料解释深度范围内地层,多为杂乱或倾斜反射,地层连续性差,反射波能量一般,局部地层存在空白反射。

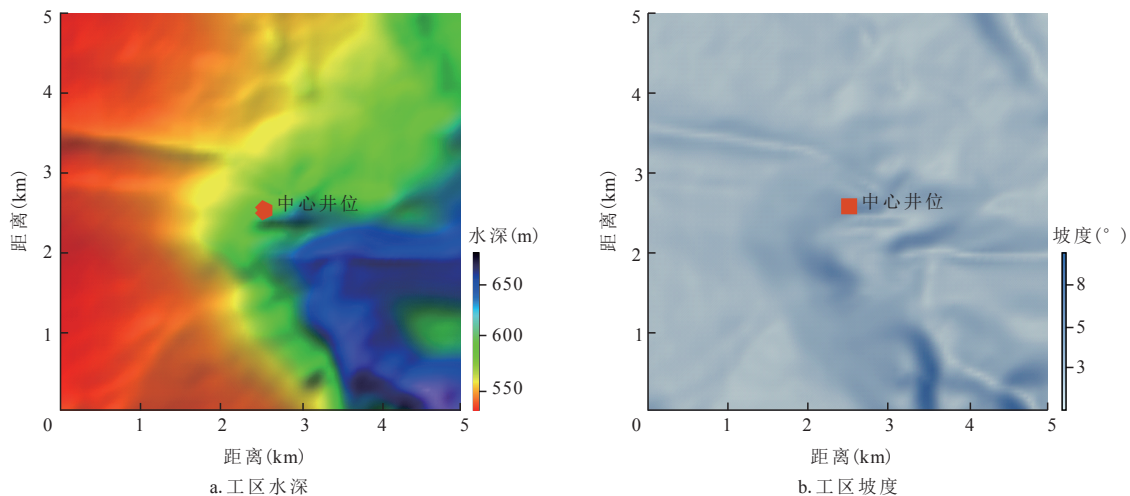


图2 工区水深与地形

Fig. 2 Water depth and landform of working area

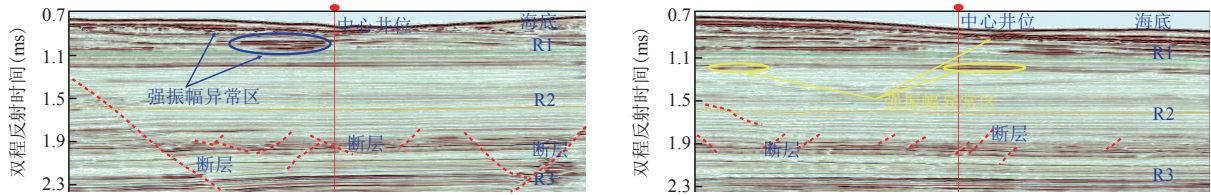


图3 3D地震剖面  
Fig. 3 3D seismic profile

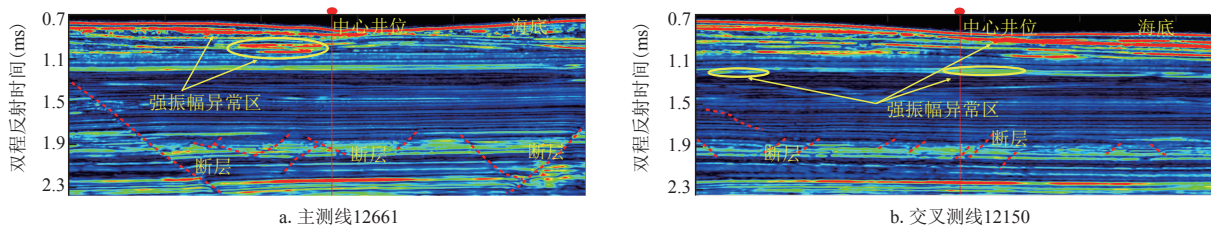


图4 振幅包络  
Fig. 4 Amplitude envelope

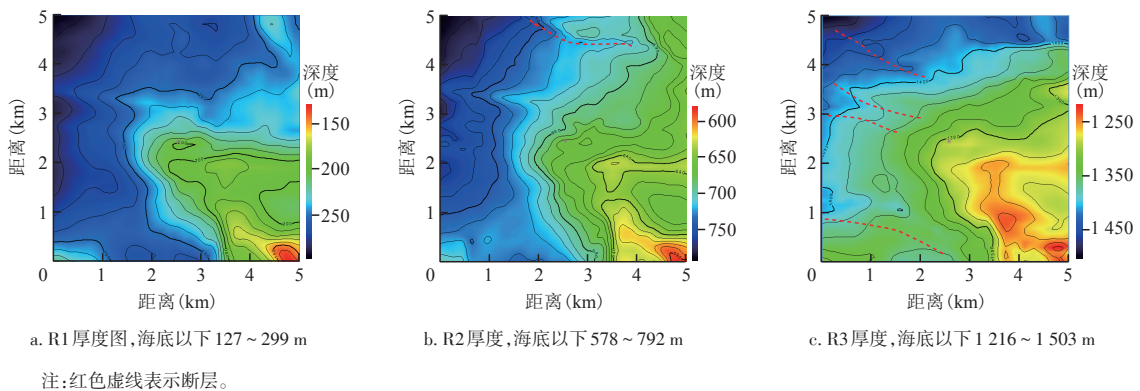


图5 地层等厚度  
Fig. 5 Strata thickness map

### 3.4 浅层地质灾害分析

#### 3.4.1 地震时间切片

根据对三维地震资料的分析 and 解释,在研究区域内识别浅部断层发现,由于三维地震资料的空间分辨率的限制,很难确定这些断裂是否延伸到海底,因此,仅凭三维地震资料无法判断这些断层的活动性以及活跃程度。浅部断裂大致呈平行展布,在研究区域内主要为西北—东南走向。

由3D地震切片(图6)可以看出:在1.0 s地震切片上,距离预定井位最近的振幅异常点位于其垂直

位置的东方约260 m处;在1.5 s地震切片上,距离预定井位最近的振幅异常点位于其垂直位置的北方约1.5 km处;在1.95 s地震切片上,该深度层面内断层普遍发育,振幅异常表现为强振幅,与地层成分差异相关,距离预定井位最近的振幅异常点位于其垂直位置的西南方约1.3 km处;在2.05 s地震切片上,该深度层面内断层普遍发育,振幅异常表现为强振幅,与地层成分差异相关,距离预定井位最近的振幅异常点位于其垂直位置的西南方约1.3 km处;在2.7 s地震切片上,该深度层面内断层普遍发育,两条较大型的断层分别位于预定井位垂直位置的北侧和南侧约570 m和1 200 m处;重点是在3.2 s地震切片上,存

在一条过预定井位的断层,走向为西北—东南,埋深为海底以下约3 409 m(即海底以下约2 370 m位置处),断距约为10 m,距离预定井位最近的振幅异常点位于其垂直位置的西南方约2.3 km处。

### 3.4.2 最大负振幅

在研究区域的三维地震资料上发现4处典型深度层面的振幅异常(图7),通过在地层序列内部对振幅析取以保留最小振幅值的方法,来识别振幅异常。用颜色渐变来表示这些提取振幅在平面上的分布,可观察这些振幅异常的延伸范围,结合地震剖面属性特征,最终确定异常反射类型,从而实现浅层气的预测。

R0+10 ms至R1-10 ms与R1+10 ms至R2-10 ms深度层面内的异常反射表现为反射带集中,强振幅,且与周围地层同相轴差异明显,推测是上下地层的成分不同引起的振幅异常(如上层位是高波阻抗沙土,下层是低阻抗黏土);R2+10 ms至R3-10 ms深度层面内的异常反射表现为强振幅、相位反转,且与地层成分差异相关,推测是深部浅层气随断层上升后聚集在含砂质地层中;R3+10 ms至3.5 s深度层面内的异常反射表现为中等强度振幅、相位反转,推测与地层成分差异相关,为分布型、相对强度较弱的含气

地层。

### 3.4.3 危害与分析

基于三维地震资料,分析总结了预定井位各因素中可能影响钻探作业的潜在地质灾害隐患。潜在的地质灾害包括但不限于浅层气和断层。一般来说,深水钻井的中心井位选择原则应包括:①宜规避海底障碍物、海底起伏区域及海底以下浅层的地质灾害;②若无法规避,应选择作业风险较低的井位区域;③地质灾害风险应在可降低或可接受或可控的程度。

对浅地层地质灾害因素进行危害程度与风险性评估,宜给出定量或半定量的评价,风险性可以分为高、中、低和几乎没有4个级别,便于整体直观钻井安全评价。通常采用分别设置不同颜色来区分各个地层间最大负振幅异常的区域,表示浅层地质灾害分布延伸范围。在颜色重叠区,风险较高,应谨慎进行钻井作业或移位作业。

## 4 结论

1) 调查区域内的强振幅异常一般由砂体聚集浅层气、浅层水或常规地层结构造成。根据总体的

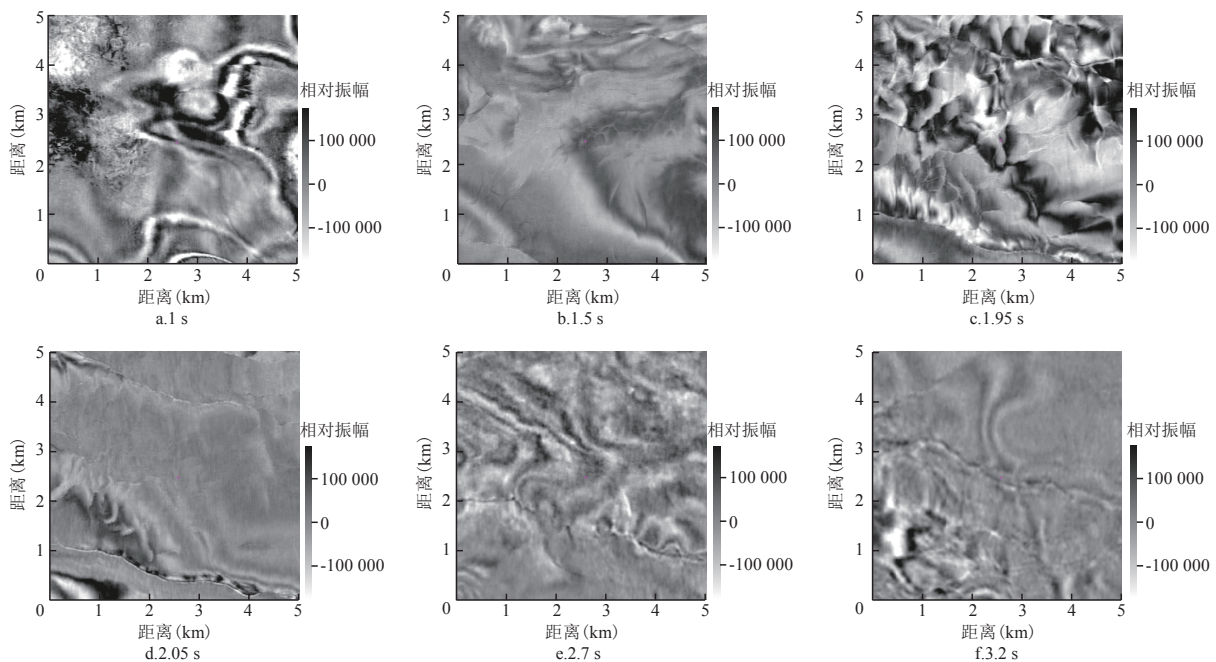


图6 3D地震切片  
Fig. 6 3D seismic slice

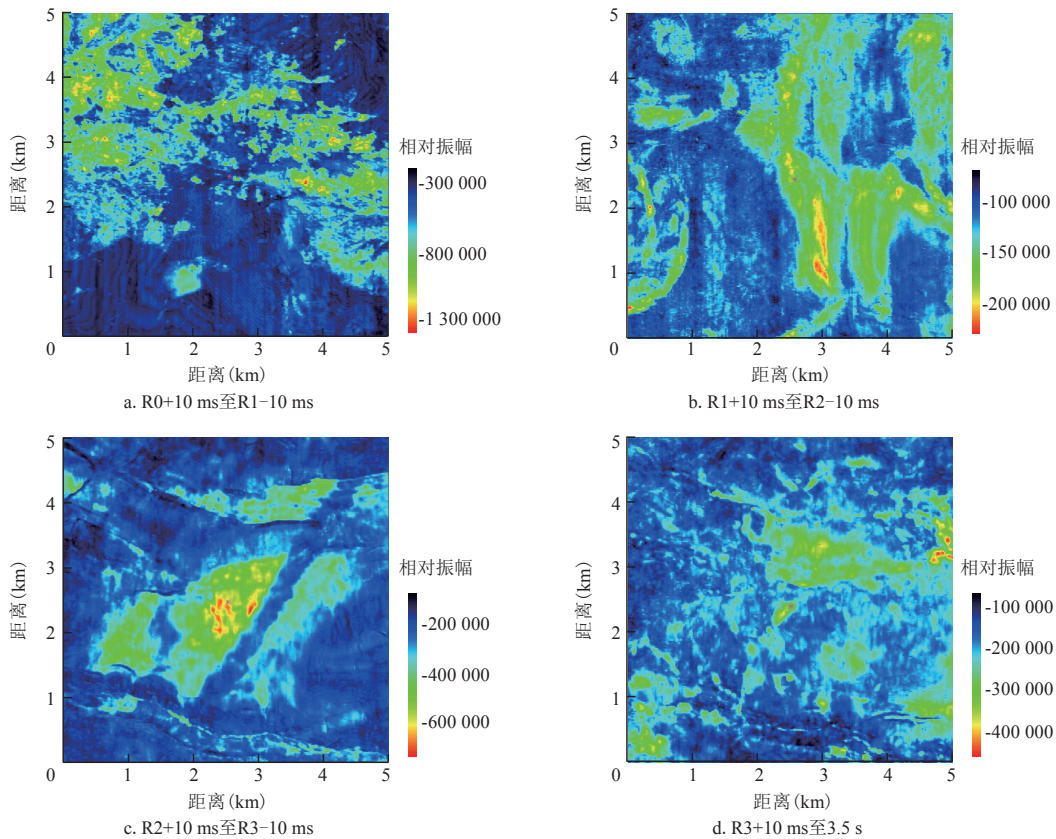


图7 最大负振幅

Fig. 7 Maximum negative amplitude

地质灾害评价可知,该水深工区井位附近水深变化和坡度较小,中浅部主要是浅层水或地层成分差异,进入深层后断层大量发育,同时,存在浅层气影响,其中,在海底以下约0.98 s处穿越一条断层。

2) 井位位置开始钻探作业前,需考虑进行场址高分辨工程物探和工程地质调查等额外的调查及研究,以便进一步研究与评价海底土质特性和斜坡(边坡)稳定性。

3) 通过浅层地质灾害评估,讨论了该深水工区的水深地形、海底地貌、海底面以下一定深度范围内的地层特征和潜在的不稳定浅层地质灾害。通过该方法获取的各种基础性数据,将对深水工区后期精细深水井场调查(深拖、深水ROV、AUV调查、原位CPT及取样等)有实用参考价值。

4) 深水浅层灾害预测与安全作业评价是一个不断创新的领域,实际应用过程中,须结合工程情况,积极参照国内外的相关技术,综合多种资料及数据分析方法对浅层灾害进行识别和预测,增加浅层

灾害预测的精准度和可信度。笔者所提的基于三维地震的浅层地质灾害评估方法可以较为快速、实用的进行三维地震资料解释,使海底浅层沉积特征刻画更为全面、浅层灾害评估更准确,使数据发掘、利用更有前景。

#### 参考文献

- [1] 吴时国,王吉亮.南海神狐海域天然气水合物试采成功后的思考[J].科学通报,2018,63(1):2-8.  
WU Shiguo, WANG Jiliang. On the China's successful gas production test from marine gas hydrate reservoirs[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(1): 2-8.
- [2] 刘朝全,姜学峰.2019年国内外油气行业发展报告[M].北京:石油工业出版社,2020.  
LIU Chaoquan, JIANG Xuefeng. 2019 report on developments in the foreign and domestic oil & gas industries[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.
- [3] 王陆新,潘继平,杨丽丽.全球深水油气勘探开发现状与前景展望[J].石油科技论坛,2020,39(2):31-37.  
WANG Luxin, PAN Jiping, YANG Lili. Present conditions and prospect of global deepwater oil and gas exploration and development[J]. Petroleum Science and Technology Forum,

- 2020, 39(2): 31-37.
- [4] 任秋月.地震属性提取方法的研究与应用[D].成都:成都理工大学,2019.  
REN Qiuyue. Research and application of the extraction method of seismic attributes[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [5] 郑菁苗,李晨.关于提高海洋石油EPCI工程项目管理能力的探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(3):54-55.  
ZHENG Jingmiao, LI Chen. Discussion on improving offshore oil EPCI project management capability[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(3): 54-55.
- [6] 叶银灿.中国海洋灾害地质学[M].北京:海洋出版社,2012.  
YE Yincan. Marine hazard geology in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.
- [7] 梁金强,付少英,陈芳,等.南海东北部陆坡海底甲烷渗漏及天然气水合物成藏特征[J].天然气地球科学,2017,28(5):761-770.  
LIANG Jinqiang, FU Shaoying, CHEN Fang, et al. Characteristics of methane seepage and gas hydrate reservoir in the northeastern slope of South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(5): 761-770.
- [8] 邢磊,海洋小多道地震高精度探测关键技术研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.  
XING Lei. Study of the key technologies of high-precision marine multichannel seismic survey[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [9] 杨文达,李斌,张异彪.深水油气田井场调查内容及方法技术研究[J].海洋石油,2011,31(2):1-7.  
YANG Wenda, LI Bin, ZHANG Yibiao. Study on well site investigation contents and techniques in deepwater oil and gas field[J]. Offshore Oil, 2011, 31(2): 1-7.
- [10] 吴时国,赵汗青,伍向阳,等.深水钻井安全的地质风险评价技术研究[J].海洋科学,2007,31(4):77-80.  
WU Shiguo, ZHAO Hanqing, WU Xiangyang, et al. The research of geohazards estimation technique on deep-water wells[J]. Marine Sciences, 2007, 31(4): 77-80.
- [11] 郭雯,刘永涛,赵俊峰,等.层拉平技术在地震解释中的深化应用[J].石油地球物理勘探,2020,55(5):1110-1120.  
GUO Wen, LIU Yongtao, ZHAO Junfeng, et al. Deepened application of horizon-flattening technique in seismic interpretation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(5): 1110-1120.
- [12] 杨占龙.地震地貌切片解释技术及应用[J].石油地球物理勘探,2020,55(3):669-677.  
YANG Zhanlong. Interpretation technique of seismic geomorphological slice and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(3): 669-677.
- [13] 徐子英,孙珍,彭学超.珠江口盆地白云凹陷反转构造发育特征[J].新疆石油地质,2015,36(4):394-400.  
XU Ziyang, SUN Zhen, PENG Xuechao. Development characteristics of inverted structures in Baiyun sag in pearl river mouth basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(4): 394-400.
- [14] 张功成,杨海长,陈莹,等.白云凹陷—珠江口盆地深水区一个巨大的富生气凹陷[J].天然气工业,2014,34(11):11-25.  
ZHANG Gongcheng, YANG Haichang, CHEN Ying, et al. The Baiyun sag: A giant rich gas-generation sag in the deepwater area of the pearl river mouth basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(11): 11-25.
- [15] MILKOV A V, SASSEN R. Estimate of gas hydrates resource, north western gulf of Mexico continental slope[J]. Marine Geology, 2001, 179(1): 71-83.
- [16] BADESAB F, DEWANGAN P, USAPKAR A, et al. Controls on evolution of gas-hydrate system in the Krishna-Godavari basin, offshore India[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2017, 18(1): 52-74.
- [17] 易远元,唐海雄.海洋深水钻井浅层地质灾害识别技术及案例分析[M].北京:石油工业出版社,2012.  
YI Yuanyuan, TANG Haixiong. Marine deepwater drilling shallow geological hazard identification technology and case analysis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [18] 刘冰.涪西区块3D浅层高分辨率处理技术[J].海洋石油,2016,36(2):7-11.  
LIU Bing. High-resolution processing of shallow 3D seismic data in the Weixi block[J]. Offshore Oil, 2016, 36(2): 7-11.
- [19] ADVOCATE D M, HOOD K C. An empirical time-depth model for calculating water depth southern gulf of Mexico[J]. Geo-Marine Letters, 1993, 13(4): 207-211.
- [20] 汪俊,徐子英,任卫波.复杂沉积区地震剖面时深转换的多公式拟合方案及应用[J].物探与化探,2020,44(1):149-155.  
WANG Jun, XU Ziyang, REN Weibo. The time to depth conversion based on multi-functions fitting solution and its application to complicated sedimentary area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 149-155.
- [21] 沙志彬.南海东北部海域XN区块天然气水合物资源综合预测与评价[D].北京:中国地质大学,2019.  
SHA Zhibin. Integrated prediction and evaluation for natural gas hydrate resource of XN study area in the northeastern South China Sea[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [22] 孙甜甜,邹黛黛,潘梦迪,等.南海北部琼东南盆地浅表层沉积物的地球化学特征及对沉积环境的指示[J].热带海洋学报,2018,37(4):70-80.  
SUN Tiantian, WU Daidai, PAN Mengdi, et al. Geochemical characteristics of surface sediments in the southern Qiongdongnan basin of the northern south China sea and its implication for sedimentary environment[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(4): 70-80.
- [23] MOAN T. Life cycle structural integrity management of offshore structures[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2018, 14(7): 911-927.

(编辑 余聪)