

刘斌, 李柯良, 邓希光, 等. 马克兰俯冲带海域水合物高分辨率地震数据处理及初步成果[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(1): 80-84.

LIU Bin, LI Keliang, DENG Xiguang, et al. High-resolution seismic data processing and preliminary results for gas hydrates in the Makran subduction zone[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(1): 80-84.

马克兰俯冲带海域水合物高分辨率地震 数据处理及初步成果

刘斌^{1,2}, 李柯良¹, 邓希光¹, 黄建宇¹, 周大森¹, 郭武¹

(1 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075;

2 南方海洋科学与工程实验室(广州), 广州 511458)

摘要:综合地球物理调查表明, 北印度洋阿拉伯海马克兰俯冲带海域水合物资源非常丰富。为调查该海域水合物及与其相关的流体活动, 采集了高分辨率多道地震数据, 分析了原始地震数据的特征, 并按常规水合物地震数据处理流程进行处理, 获得了较好的处理效果。基于新采集处理的地震数据, 识别出了经典的 BSR、非经典的 BSR 及双 BSR 现象。双 BSR 的发现表明该海域的水合物处在一个复杂的动态过程中, 对该海域水合物的研究具有重要意义。由于本次地震数据的排列长度较短(最大排列长度 1 300 m), 对该海域水合物的定量分析以及精细刻画受到了限制。结合此次采集的短排列数据以及理论公式分析了排列长度对水合物勘探的影响, 指出在水合物的勘探中, 除了震源能量、频率、道间距等参数外, 排列长度也是一个需要优化设计的参数。

关键词:水合物; 马克兰俯冲带; 短排列; 高分辨率地震; 似海底反射

中图分类号: P744.4; P631.443

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.098

0 引言

水合物是水和气体在低温高压环境下形成的一种固态物质, 广泛存在于大陆边缘的海底沉积物以及永久冻土带中^[1-2]。此外, 水合物在海底稳定性、全球碳循环以及全球的气候中也起着重要的作用。水合物的形成主要受到温度、压力、气体组成、地层盐度以及地层的岩性等控制。水合物能够稳定存在的区域称为水合物稳定带。水合物稳定带的底界与地震剖面上的一个强反射轴之间存在非常好的对应关系, 该强反射轴极性与海底反射相反, 与海底近于平行, 称为似海底反射(bottom simulating reflector, BSR)。BSR 是海底沉积物中水合物赋存的最重要标志。

马克兰俯冲带位于北印度洋阿拉伯海域(图 1a)。早在 1977 年, WHITE 等^[3]就在该海域识别出 BSR。后续的地震调查以及对老数据的重新解释表明该海域的 BSR 分布非常广泛^[4], 表明该海域蕴藏着丰富的水合物。BSR 的特征受到断层活动性的影响^[5-6], 在断层活动性较弱的北部区域, BSR 振幅较弱, 连续性较差。由北往南, BSR 变得清晰连续。从东西方向看, 在马克兰增生楔的西部和中部, BSR 的连续性较好, 振幅较强; 而东部 BSR 的连续性较差, 振幅较弱, 甚至缺少 BSR。此外, 该海域海底流体活动非常发育^[7], 为水合物的形成提供了非常好的条件。但总体来说, 该海域水合物调查的程度较低, 一方面所用的地震数据主要是 20 世纪 90 年代采集的用于油气勘探的数据, 频率较低(主频约 25 Hz); 另一方面, 尚未开展针对水合物调查的三维地震勘探。

为调查印度洋阿拉伯海马克兰俯冲带海域水合物的赋存情况, 中国与巴基斯坦联合科考航次(2018—2019 年)在巴基斯坦外海马克兰海域采集

收稿日期: 2020-06-24

资助项目: 中国地质调查局项目(DD20190582, DD20191009)

作者简介: 刘斌(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水合物调查、全波形反演以及海底界面过程方面的研究工作。E-mail: liugele@163.com

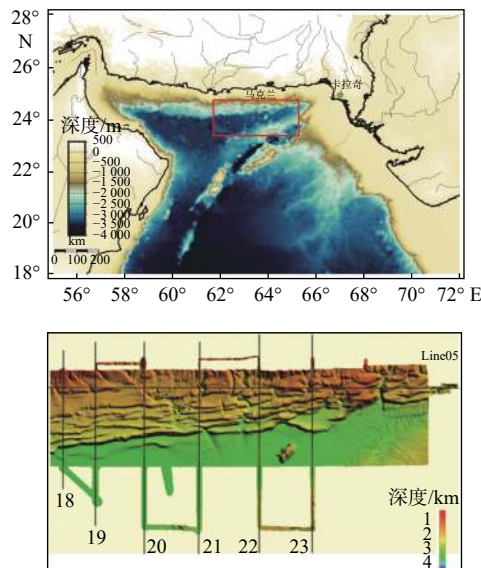


图 1 调查区域以及地震测线图

Fig.1 The study area and the locations of seismic lines

了 1 191 km 二维多道高分辨率地震数据(主频达 65 Hz)。笔者按照常规的水合物地震数据处理流程对新采集的数据进行处理,得到成像剖面。基于新的成像剖面,不仅识别出广泛发育的经典的 BSR,还识别出非经典的 BSR 以及双 BSR 等。

1 数据采集与处理

数据采集所用调查船为“海洋地质十号”。地震数据沿着 7 条测线采集(测线位置见图 1),总长度大约为 1 191 km,测线位置与该区域原有的 2D 地震测线不重合。震源由 2 条 G.I 枪组成,总容量为 420 cu.in。记录系统为法国 Sercel 公司生产的 Seal428 地震数据记录系统。接收电缆为法国 Sercel 公司的 Sentinel 型 24 位数字固体电缆,接收灵敏度为 $19.7 \mu\text{V}/\mu\text{bar}$ 。图 2 为地震采集示意图。接收电缆包含 96 道,道间距为 12.5 m;震源间距为 25 m;最小排列长度为 112 m,最大排列长度为 1 300 m;记录长度为 8 s,采样率为 1 ms。现场对数据质量进行了监控和检查,所用处理系统为 Paradigm 公司的 Echos2017 地震处理系统。

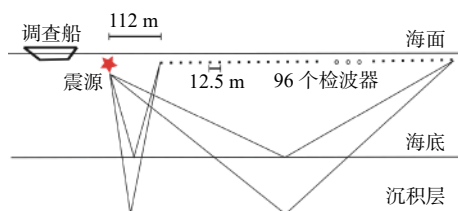
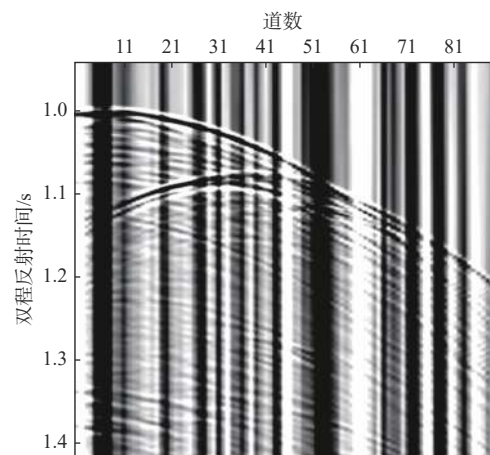


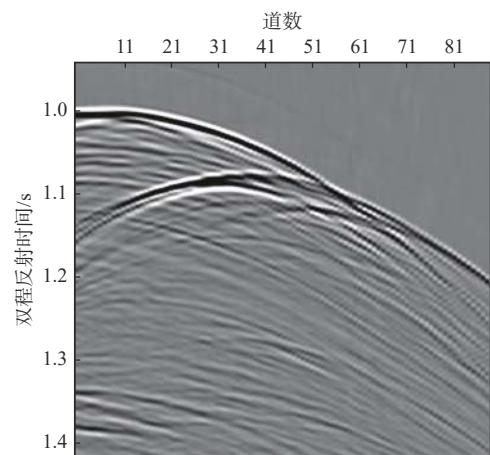
图 2 地震采集示意图

Fig.2 A schematic diagram showing the seismic acquisition

此次采集的数据质量良好,主频约为 65 Hz。图 3 显示了原始的炮集记录和低频涌浪噪音衰减后的数据。由于数据采集期间海况较好,异常振幅噪音较小。虽然多次波在地震数据上非常发育,但由于研究区水深较大,多次波大多处在水合物稳定域以下较深的地方。此外,由于此次采集所用的震源容量较小(仅 420 cu.in),有效信号的穿透较浅,在多次波的位置上,几乎没有有效信号的能量。



(a) 原始地震数据



(b) 衰减后地震数据

图 3 低频涌浪噪音衰减前后地震数据

Fig.3 Seismic data before and after attenuation of low frequency swell noise

根据原始地震数据特征及调查研究目的,室内处理按照海洋地震资料处理的基本流程进行,包括观测系统定义、噪音衰减、多次波衰减、速度分析以及偏移等(图 4)。①根据导航信息定义观测系统并把导航信息加到地震数据上;②使用高通滤波(低切频率 6~10 Hz)衰减涌浪噪音,同时采用中值滤波的方法衰减异常振幅噪音;③由于海底崎岖,多次波衰减是处理的难点,但由于研究的目标在浅层,多次波衰减并非重点,采用海底相关多次波衰

减(SRME)方法和基于波动方程的方法来衰减多次波,波动方程多次波衰减方法基于海底模型,采用波动方程预测出多次波,并从数据中减去多次波;④在速度分析方面,由于海底地形变化剧烈,为了更好地控制好浅层速度,以每 500 m(80 个 CMP)生成一个控制点来进行速度分析;⑤最后对拾取的速度进行适当平滑,生成偏移速度场,进行叠前时间偏移成像,地震偏移成像结果的主频达到 65 Hz,垂向分辨率约为 6.25 m(假设沉积物速度为 1600 m/s)。

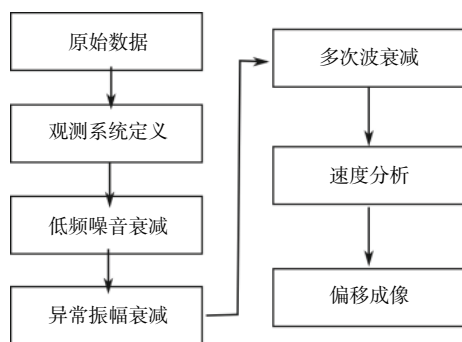


图 4 地震数据处理流程

Fig.4 Work-flow chart of seismic data processing

2 处理结果

图 5、6 展示了本次处理的偏移成果剖面。BSR 是存在海底水合物的最重要标志。在地震剖面上, BSR 具有强振幅、极性与海底相反、与海底近于平行的特征。图 5 为 SN 向地震测线 line 22 的成果剖面,除了增生脊部的下方,在大部分区域均能识别出清晰的 BSR。前人根据 BSR 的连续性及其他特征,将其分为经典 BSR 及非经典 BSR^[8]。由于该海域地层倾斜,经典 BSR 切割地层的特征非常明显(图 6a),而非经典 BSR 表现为强振幅反射终止。类似的 BSR 在墨西哥湾和日本海域均有发现^[9-10]。对于同一个倾斜地层,穿过 BSR 时,存在明显的相位转换。有些 BSR 表现为不连续的强振幅。此外,还识别出清晰的双 BSR(图 6b)。

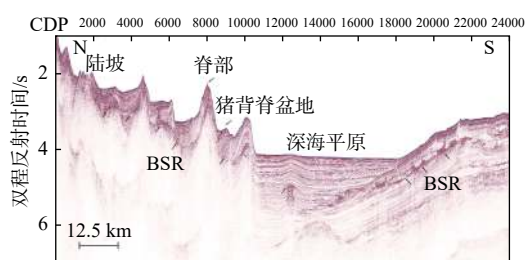


图 5 新采集地震数据南北向测线 line22 的成像剖面

Fig.5 An example of the newly acquired seismic data profile, the north-south line 22

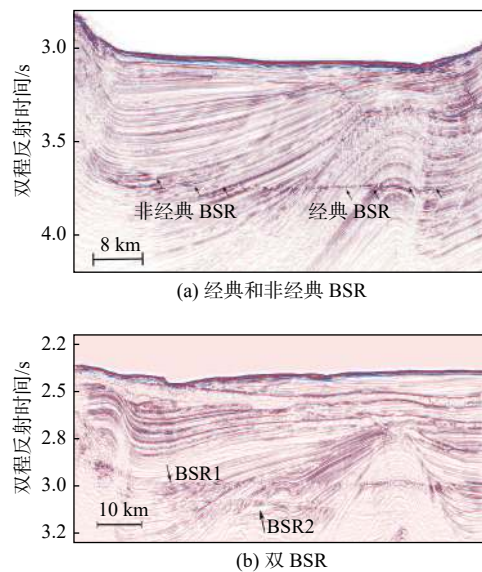


图 6 不同特征的 BSR

Fig.6 BSR with different features

3 讨论

3.1 BSR 及其意义

基于以前采集的低分辨率地震数据,前人已经基本圈定了马克兰海域 BSR 的分布范围,对 BSR 的分布特征也有了一些认识^[5-6]。基于新采集处理的高分辨率地震数据,本研究亦识别出广泛发育的 BSR,与前人的发现一致。广泛发育的 BSR 说明在马克兰海域蕴藏着丰富的水合物。

除了经典的连续 BSR,本研究还识别出大量的非经典 BSR。这些非经典 BSR 表现出非连续的“补丁”状强反射,而且同一个地层在穿过 BSR 时发生极性反转,这可能表明了水合物沿着高渗透的地层富集。据前人研究,该海域的沉积物主要是砂岩^[11],由此我们推测,气体沿着高渗透性的砂层往海底方向运移,当进入水合物稳定带时形成水合物。按照水合物赋存的金字塔理论,砂岩储层赋存的水合物最具有开发前景。从这个意义上讲,马克兰俯冲带的水合物可能不仅储量丰富,而且开发前景较好。

双 BSR 现象在全球多个水合物发育区都有报道,也提出了不同的形成机制。总的来说,双 BSR 的存在表明由于地层温度、压力条件的变化,水合物系统处在一个动态的变化过程中,但具体的形成机制以及对水合物的指示意义还需要进一步的定量研究。虽然前人在研究该海域的 BSR 时曾指出疑似的双 BSR 或者三 BSR,但特征不明显^[12]。本研究基于新采集的高分辨率地震数据,识别出了清

晰可靠的双 BSR 现象(图 6)。然而, 仅仅基于地震剖面, 难以推测该海域双 BSR 的形成机制。考虑到该海域沉积速率较大, 构造运动活跃, 推测该海域双 BSR 的形成与局部地层的压力变化有关。

3.2 短排列地震数据对水合物勘探的影响

排列长度是地震勘探的一个非常重要的参数, 它对后续的处理, 成像与反演起着十分重要的作用。在油气勘探领域, 尽可能地采集长排列地震数据是一个基本的共识。当然, 排列长度的长短和施工的成本和难易程度直接相关。在油气勘探领域, 在施工设计阶段就需要根据勘探目标的深度、勘探的处理目的以及施工的成本等来设计最优的排列长度参数。在水合物勘探领域, 很多时候并不重视排列长度这个参数, 使得水合物勘探中采集的地震数据大多排列长度较短。产生这一现象的主要原因之一可能与一个长久以来的看法有关, 认为水合物赋存在海底浅部的沉积层中, 短排列多道地震足够了。不可否认, 短排列多道地震, 甚至单道地震数据都能提供沉积层中水合物的信息。在水合物勘探的早期, 通过分析单道地震上的 BSR 特征就获得了关于水合物的很多信息^[13], 但在水合物勘探进入定量研究阶段, 短排列地震数据的缺陷就非常明显了。地震数据的排列长度对速度分析、多次波压制、成像、反演等各个环节都有重要的影响。下面主要以速度分析和 AVO 反演 2 个环节为例简单说明排列长度的影响。

众所周知, 速度是水合物储层的一个非常重要的参数。由于水合物的速度比较高, 沉积层中含有水合物时, 会引起高速异常, 这是水合物存在的一个重要标志。获得地层的速度方法有很多, 包括叠加速度分析、旅行时反演、偏移速度分析以及全波形反演等。这些分析方法无一不要求数据有足够大的排列长度。以叠加速度分析为例, 其基本原理是用不同的速度拟合地震数据上的同相轴, 一般采用双曲线公式:

$$t = t_0 + \frac{h^2}{V_{rms}^2} \quad (1)$$

式中: t 为反射波的旅行时, s;

h 为排列长度, m;

t_0 为零偏移距双程时间, s;

V_{rms} 为均方根速度, m/s。

当排列长度范围比较小时, 存在很多的速度都能够很好地拟合双曲线, 对应的速度分析谱上没有

可区分的极值点, 这就没办法确定出地层的速度。

AVO(amplitude versus offset)反演是获得地层岩性参数, 刻画储层的重要手段, 广泛用于油气领域和水合物勘探领域。AVO 就是通过分析振幅随着排列长度变化的特征来获取地层参数。其理论基础是波动理论中的 Zoeppritz(佐普利兹)方程, 其中入射角度和反射角度是方程的参数, 而入射角和反射角直接和排列长度相关。由于佐普利兹方程比较复杂, 在实际的应用中, 一般都要做不同程度的近似。理论研究和勘探实践表明, 当地震数据的角度超过 30° 时, 才能较好地反演出地层的纵横波速度。而如果要同时反演纵横波速度以及密度, 则要求角度超过 40° 才能获得可信的反演结果。以一个简单的计算来进行说明(图 7)。根据公式 $h=2 \times \tan(\theta) \times D$, 假设目标地层深度 D 为 2 km; 当 $\theta=30^\circ$, $h=2\ 309$ m; 当 $\theta=45^\circ$, $h=4\ 000$ m。若目标地层深度 D 为 2.5 km; 当 $\theta=30^\circ$, $h=2\ 880$ m; $\theta=45^\circ$ 时, $h=5\ 000$ m。

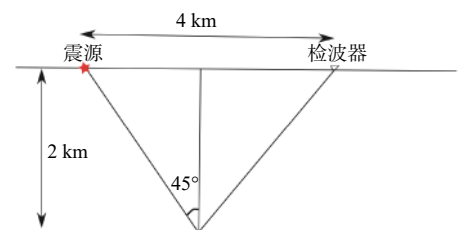


图 7 角度与排列长度示意图

Fig.7 An illustration of the relationship between the angle and offset

通过上述简单的分析可以看出, 虽然水合物赋存在海底浅部地层中, 但如果后续要进行深入研究, 排列长度是一个需要详细设计的参数。尤其是在深水区域, 尽管水合物赋存在海底浅部沉积层中, 但其深度仍然是较大的。当勘探目标的深度超过 2 km 时, 保守估计排列长度也应该为 4 km。此次马克兰水合物调查区域, 水深变化较大, 但大多 $>1\ 500$ m, 而且有些地方水深 >2 km(如图 6a 所示, 海底时间为 3 s, 海底深度为 2 250 m)。由此可知, 此次短排列地震数据对于该区域水合物的量化研究是不够的。

4 结论

(1)对马克兰海域新采集的高分辨率短排列地震数据的处理取得了较好效果, 识别出经典 BSR、非经典 BSR 及双 BSR 等反射特征。这些不同特征的 BSR 反映了该区域水合物系统的复杂性。

(2)结合马克兰海域采集的数据以及理论公式,以速度分析和 AVO 反演为例分析了排列长度对水合物勘探的影响,指出排列长度对水合物勘探,尤其是对深水水合物的勘探是一个非常重要的参数,需要在设计之初进行优化设计。

(3)受马克兰海域新采集的高分辨率地震数据排列长度较短限制,难以定量刻画该海域水合物的特征。该海域后续的勘探需要优化排列长度参数。

致谢:感谢 2018—2019 年印度洋联合科考航次的所有成员!

参考文献:

- [1] BOSWELL R, COLLETT T S. Current perspectives on gas hydrate resource[J]. *Energy and Environmental Science*, 2011, 4: 1206-1215.
- [2] KVENVOLDEN K A. Gas hydrates-geological perspective and global change[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31: 173-187.
- [3] WHITE R S. Seismic bright spots in the gulf of Oman[J]. *Earth Planetary Science Letter*, 1977, 37: 29-37.
- [4] SMITH G L, MCNEILL L C, HENSTOCK T J, et al. Fluid generation and distribution in the highest sediment input accretionary margin, the Makran[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 403: 131-143.
- [5] 龚建明, 廖晶, 尹维翰. 北印度洋马克兰增生楔天然气水合物的成藏模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(2): 148-155.
- [6] 龚建明, 廖晶, 孙晶, 等. 巴基斯坦马克兰增生楔天然气水合物的主控因素[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(12): 10-15.
- [7] 王旭东, 黄慧文, 孙跃东, 等. 北印度洋海底冷泉流体活动研究进展[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(6): 82-89.
- [8] HILLMAN J I T, COOK A E, SAWYER D E, et al. The character and amplitude of “discontinuous” bottom-simulating reflections in marine seismic data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 459: 157-169.
- [9] SHEDD W, BOSWELL R, FRYE M, et al. Occurrence and nature of “bottom simulating reflectors” in the northern gulf of Mexico[J]. *Marine and petroleum geology*, 2012, 34: 31-40.
- [10] TAMAKI M, FUJI T, SUZUKI K. Characterization and prediction of the gas hydrate reservoir at the second offshore gas production test site in the eastern Nankai Trough, Japan[J]. *Energies*, 2017, 10(10): 1678.
- [11] SAIN K, MINSHULL T A, SINGH S C, et al. Evidence for a thick free gas layer beneath the bottom simulating reflector in the Makran accretionary prism[J]. *Marine Geology*, 2000, 164(1/2): 3-12.
- [12] DING F, SPIESS V, FEKETE N, et al. Interaction between accretionary thrust faulting and slope sedimentation at the frontal Makran accretionary prism and its implications for hydrocarbon fluid seepage[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(8): 1-16.
- [13] MCGEE T M. A single-channel seismic reflection method for quantifying lateral variations in BSR reflectivity[J]. *Marine Geology*, 2000, 164(1/2): 29-35.

High-resolution seismic data processing and preliminary results for gas hydrates in the Makran subduction zone

LIU Bin^{1,2}, LI Keliang¹, DENG Xiguang¹, HUANG Jianyu¹, ZHOU Dasen¹, GUO Wu¹

(1 Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510760, China; 2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

Abstract: Integrated geophysical survey has revealed that the Makran subduction zone in the northern Indian Ocean is rich in hydrates resources. Recently, high-resolution multi-channel seismic data have been collected by the authors to investigate hydrates and hydrates-related fluid activities in the area. We analyzed the characteristics of the original seismic data, processed the data following a standard data processing flow, and obtained good results. Using the newly collected and processed seismic data, we have not only identified the classical BSR, but also found the phenomena of non-classical BSR and double BSR. The presence of double BSR indicates that the hydrate in this sea area is in a complex dynamic manner, which may have significant implications for gas hydrate investigation in the area. Owing to the short offset of the seismic data, which is only 1 300 m in maximum, the quantitative analysis and fine characterization of hydrate in this area are limited. In this paper, the influence of offset on hydrate exploration is analyzed based on the data of short offset collected from this survey as well as the theoretical formula. It is suggested that the offset is also a parameter which needs to be optimized in hydrate exploration.

Key words: gas hydrate; Makran subduction zone; short offset; high resolution seismic; BSR