

潘 军, 龚建明, 廖 晶. 非常规观测系统地震数据处理策略——以巴基斯坦水合物调查为例[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(1): 60-66.

# 非常规观测系统地震数据处理策略

## ——以巴基斯坦水合物调查为例

潘 军, 龚建明\*, 廖 晶

(中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071)

**摘 要:**巴基斯坦外海发育有大量水合物, 为研究水合物的分布特征, 在此区域部署了多条多道地震测线。受客观条件制约, 此次采集的地震资料覆盖次数低, 电缆长度短, 电缆噪音严重且存在空白道, 这些不利因素要求在数据处理中必须采用非常规处理方法。指导思想是变非常规地震数据处理为常规数据处理, 在数据处理时要灵活变通, 这既包括处理流程参数的变通, 也包含流程的组合变通。处理的核心问题是如何增强剖面的信噪比, 在处理中通过 3A 去噪、空白道插值、相邻 CMP 道集合并、偏移等技术手段提高了剖面的信噪比, 整体上处理后的剖面可以满足落实水合物分布特征的要求, 达到了处理的目的。

**关键词:**水合物; BSR; 非常规地震数据处理; 巴基斯坦

**中图分类号:** P631.4, P618.13 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16028/j.1009-2722.2019.01007

## 0 引言

巴基斯坦海域蕴藏有丰富的水合物资源, 大量学者在此海域针对水合物做了很多调查工作。调查主要涉及构造<sup>[1,2]</sup>、泥火山<sup>[3-5]</sup>、气体渗漏及对环境影响<sup>[6-9]</sup>等方面。为了进一步研究该区域水合物的特征, 在此区域部署了多条多道地震测线。原计划采用长电缆和大容量气枪相组合的方式进行采集, 但是由于电缆故障和工期限制, 最终改为 24 道地震数据采集。通过对数据分析发现, 存在

以下非常规问题: ①采集的测线为非常规系统, 炮间距为 31.25 m, 道间距为 3.125 m, 最小偏移距 25 m, 因为炮间距太大, 造成覆盖次数仅有 1.2 次, 近乎单道采集; ②仅有的 24 道地震数据缺失 4 道; ③电缆噪音影响严重; ④电缆太短, 无法进行速度分析; ⑤绕射严重, 影响构造解释。本文针对以上问题, 通过处理流程参数和流程组合变通, 变非常规地震数据处理为常规数据处理, 基本解决了非常规地震数据处理中存在的问题, 整体上处理后的剖面可以满足落实水合物分布特征的要求, 达到了处理的目的。

## 1 非常规观测系统的处理策略

### 1.1 低覆盖次数的处理策略

本次调查最大的非常规在于炮间距太大, 炮间距为 31.25 m, 按照道间距为 3.125 m, 24 道拖

收稿日期: 2018-07-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0310000); 中国地质调查局项目(DD20160155)

作者简介: 潘 军(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋地震资料处理方面的研究工作。E-mail: panjun811@163.com

\* 通讯作者: 龚建明(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事油气地质与天然气水合物研究工作。E-mail: gongjianm@aliyun.com

缆,可以根据公式(1)计算覆盖次数为 1.2 次。

$$n = \frac{N \times R}{2S} \quad (1)$$

式中: $n$  为覆盖次数;

$N$  为道数;

$R$  为道间距;

$S$  为炮间距。

这种低覆盖基本相当于将所有采集的数据按照顺序排列展示,虽然数据可以实现最高的横向分辨率,但是由于数据的信噪比太低,追求高的横向分辨率没有太大意义。因此,处理策略采用降低横向分辨率,提高信噪比的方法,即重新划分更大的面元,将面元内的多个 CMP 道集组合成 1 个 CMP 道集,从而达到提高覆盖次数,提高信噪比的目的。这种策略的假设条件为地质构造横向变化不能太剧烈,面元越大越偏离这种假设条件,因此,在处理中可以尝试测试不同的面元大小,在提高信噪比和空间分辨率方面找到平衡点。图 1 是常规叠加剖面与 12.5 m 面元叠加剖面的对比,可以看到采用更大面元后剖面信噪比得到提升,水合物的特征也更为明显。

## 1.2 电缆内部噪声处理策略

电缆内部噪声推测跟电缆漏电有关,其噪声具有周期性(200 ms),且信号特征近似一致,因此,处理的策略是通过自适应相减<sup>[10,11]</sup>的方法进行去除。即首先将道集数据向下移动 200 ms,再

将其与原始道集自适应相减即可有效去除该噪声。在处理中采用以下质控手段:①由于该噪声出现时间比较固定,且延续时间相同,在不同的道集上表现特征一致,因此,自适应相减时仅针对噪声时窗范围内的数据进行相减,这样处理更有针对性;②为避免自适应相减伤害浅部有效信号,通过时窗对浅层进行控制,即海底以下 500 ms 的范围内并不做自适应相减,从而保护了有效信号;③自适应相减并不追求将噪声全部去除,因为当去噪效果太强时,对有效信号也有影响,且处理后容易出现“白条”,处理的原则是最大程度地保护有效信号,容忍部分噪声衰减得不彻底。首道数据处理效果对比见图 2,可以看到经过噪声衰减后,内生噪声得到较大程度的衰减,图 3 是叠加剖面处理前后的对比,可以看到处理后横条噪声得到消除,剖面信噪比得以提高。

## 1.3 电缆外部噪声处理策略

外力影响形成的电缆噪声具有非规则干扰道频率低、能量强的特点。针对此特点采用分频多道统计异常振幅压制技术<sup>[12]</sup>,在不损失有效反射的前提下,最大限度地压制干扰。其基本思路是:将叠前地震数据进行傅里叶变换到频率域,对频率域的道集分频段应用空间中值滤波,设定阈值,在一定的时窗内针对振幅中值差异较大的振幅,对其进行系数衰减或进行相邻道插值处理。

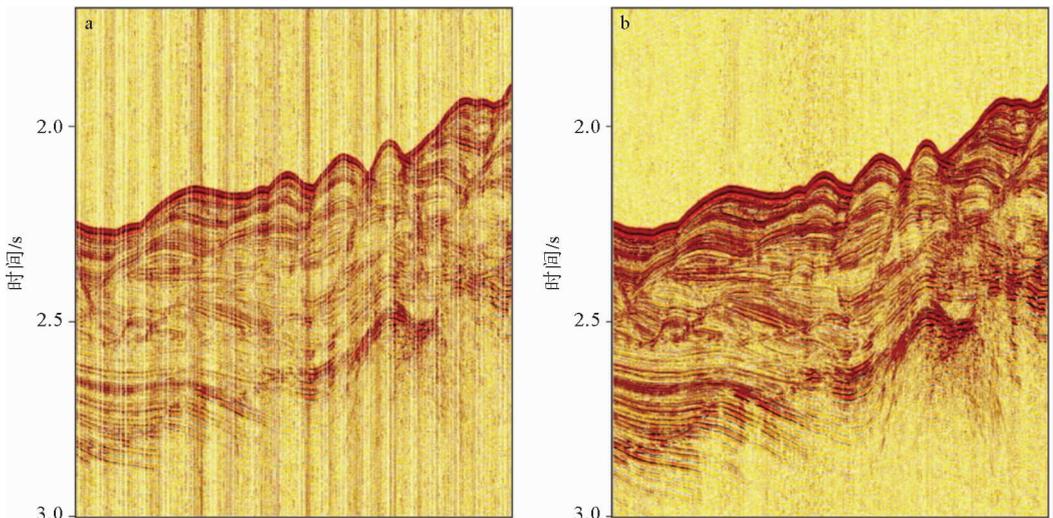


图 1 常规叠加剖面(a)与 12.5 m 面元叠加剖面(b)的对比

Fig. 1 Comparison of normal stack section (a) and stack section with 12.5 m bin width (b)

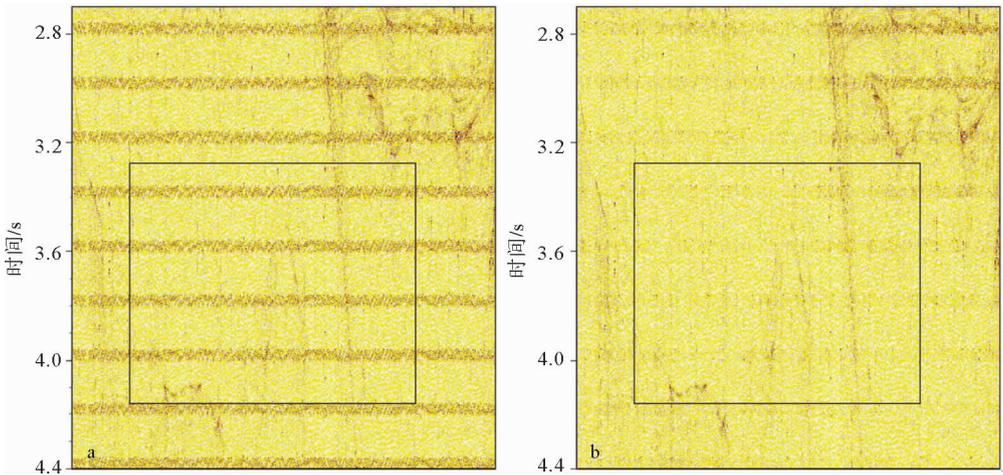


图2 首道内生噪音衰减前(a)后(b)对比

Fig. 2 Comparison of first trace gather before (a) and after (b) inter-noise attenuation

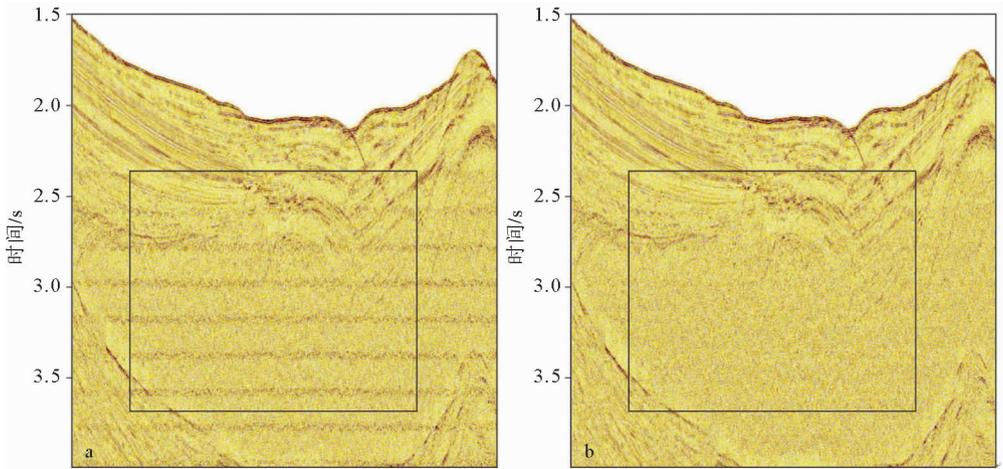


图3 叠加剖面内生噪音衰减前(a)后(b)对比

Fig. 3 Comparison of stack section before (a) and after (b) inter-noise attenuation

在不同的域中对异常振幅处理,对处理效果影响比较大,经过试验,在道域中进行异常振幅噪音去除效果较好,但是需要注意的是,由于外力影响异常振幅噪音能量值远远超过周围有效波能量,因此在处理中可以设置较大的阈值以保护有效信号。图4是异常振幅处理效果,可以看到异常振幅压制效果明显,同时衰减的能量中并没有有效信号。

#### 1.4 空白道的处理策略

对于常规油气地震勘探,如果某道检波器出现故障,一般在处理中采取设置坏道进行处理,但是本次数据仅为24道采集,却有2、3、16、19道为

空白道,对数据质控影响较大,而且,由于道间距仅有3.125 m,因此,在处理中采用相邻道插值的方法<sup>[13]</sup>重新构建空白道,这比单纯的设置坏道效果更好(图5)。需要注意的是,空白道插值应该在外部噪音去除之后再行,很明显噪音并不是有效信号,如果将噪音构建到空白道则插值也没有什么意义。

#### 1.5 速度选择的处理策略

由于本工区的水深较深(1 000~3 000 m),同时电缆长度太短(75 m),造成24道检波器接收的反射波同相轴时间差很小,基本上都是水平同相轴,因此速度分析没有什么意义,处理中速度

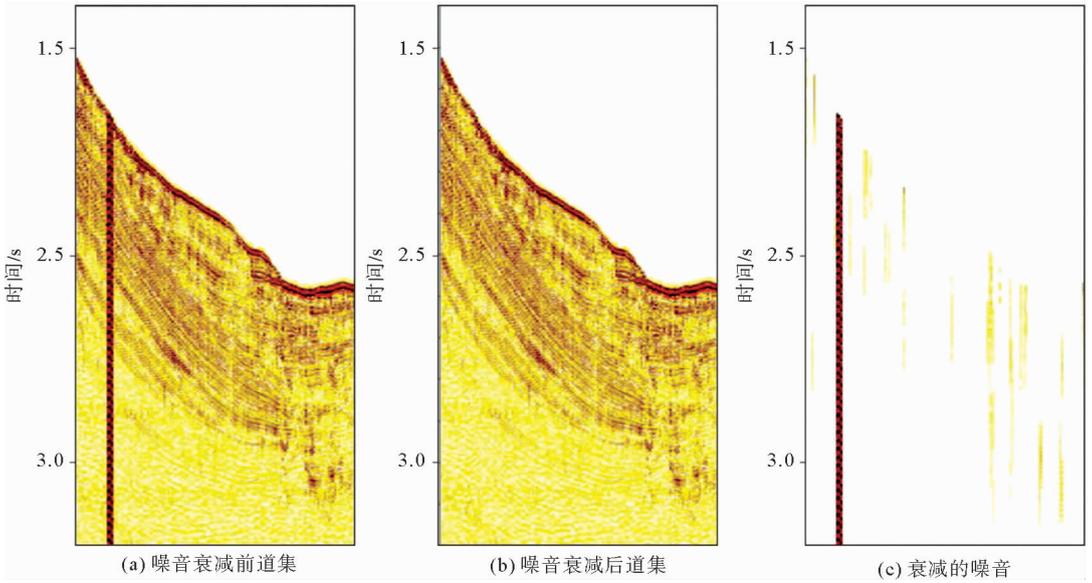


图 4 电缆噪音衰减前后首道对比

Fig. 4 Comparison of first trace gather before and after cable noise attenuation

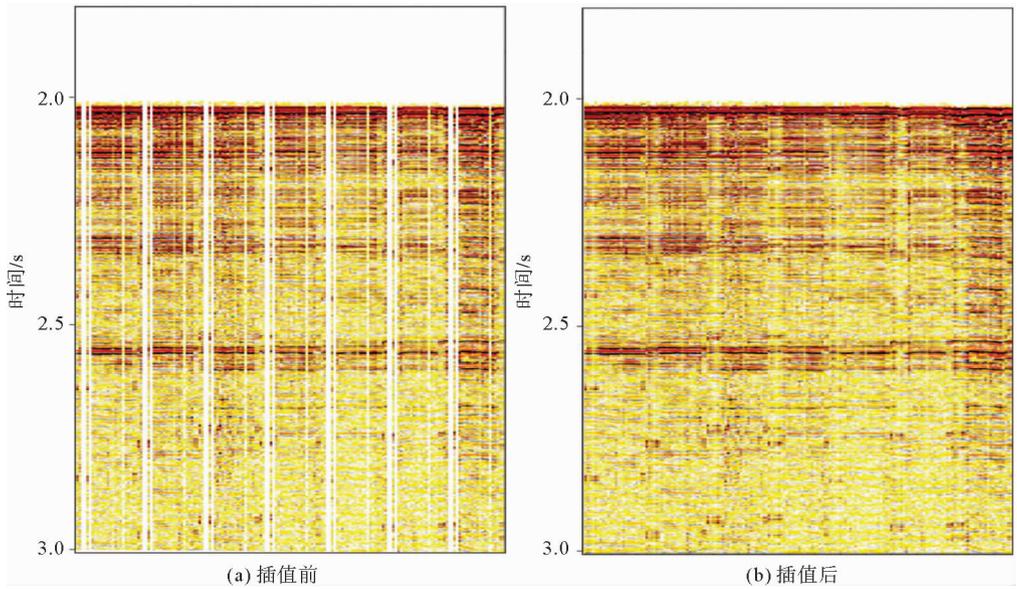


图 5 空白道插值前后对比

Fig. 5 Comparison of the data before and after interpolation of blank trace data

采用常速,即速度设置为水速。考虑到目标层位较浅,即海底以下 600 ms,速度设置为水速的假设也基本可以满足处理的要求。

### 1.6 时间偏移的处理策略

由于本工区海底地形起伏较大,造成叠加剖面绕射波比较发育,偏移的主要目的是为了绕射波归位。处理中试验了 F-X 域陡倾角有限差

分法叠后偏移<sup>[14]</sup>和 Kirchhoff 叠前时间偏移<sup>[15]</sup>,由于电缆长度仅有 75 m,这两种方法的偏移效果相差不大。Kirchhoff 叠前时间偏移的信噪比更强,但同时叠前时间偏移画弧现象更严重。图 6 为偏移前后的效果对比,可以看到,无论叠后偏移还是叠前偏移,偏移后绕射波都得以归位,偏移后地层层位更为准确,而水合物的 BSR 特征也更为明显。

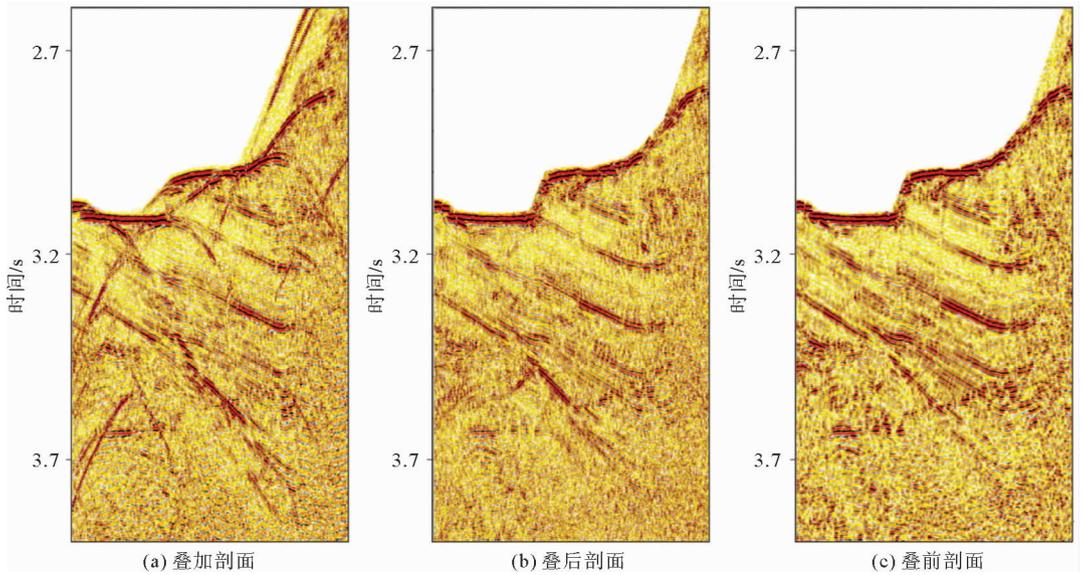


图6 偏移前后对比

Fig. 6 Comparison of the profiles before and after migration

## 2 处理效果分析

经过上述处理工作,处理后的剖面浅层较复杂的构造成像较清晰,剖面上断点、断面较清晰,波组特征较清楚,接触关系较明显,可以达到落实构造的形态、幅度、类型及位置,处理效果达到了预期目的。处理后的剖面 BSR 特征更加明显(图7),BSR 的埋藏深度大约在海底之下 600 ms,空间展布形态与海底近似平行,延伸范围较广,穿层特征也比较明显,相对于周围地层振幅明显增强。本次采集的数据为高分辨率地震数据,频带范围为 60~300 Hz,因此,其浅层分辨率远高于传统的油气地震(频带范围 4~120 Hz),这对于浅部地层的精细解释具有重要意义,但是本次采集的高分辨率地震数据缺失低频成分(4~60 Hz),而这部分能量对于水合物成像至关重要,同时由于高分辨率地震采用小容量气枪震源采集,穿透深度大约只有 1 s,深部的地层结构难以成像,无法研究构造演化对水合物的控制作用等课题,因此从构造演化角度看,下一步采用大容量气枪震源进行水合物的勘探可以对当前数据进行有益补充,充分发挥本次采集的高分辨率地震数据浅层分辨率高的优势以及大容量气枪震源穿透深度大的优势,达到优势互补的目的。

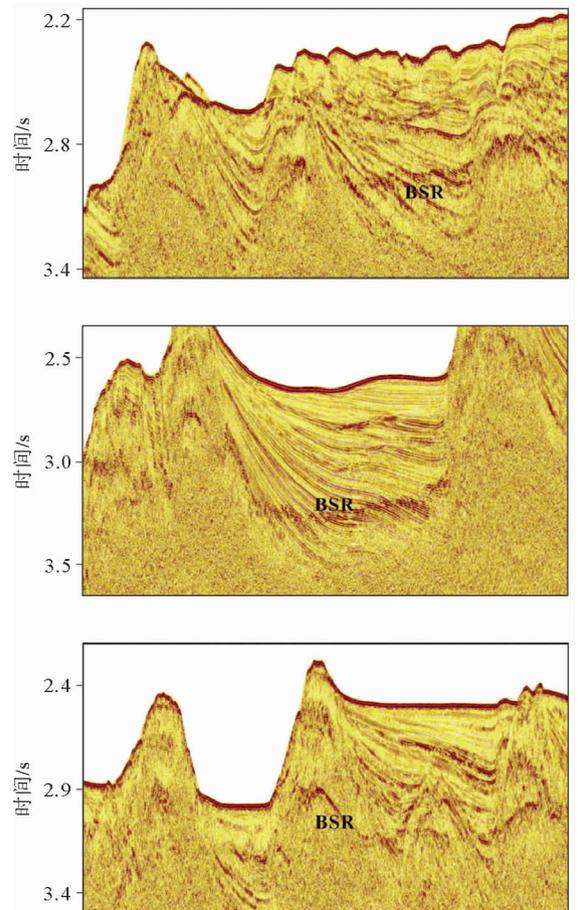


图7 处理后地震剖面上 BSR 特征清晰

Fig. 7 Processed profiles showing easily identified BSR

### 3 结论

2018 年巴基斯坦水合物调查采集的数据为非常规地震数据。测线的覆盖次数低,电缆长度短,电缆噪音影响严重且存在空白道,这些因素造成数据处理需采用非常规处理方法。这种非常规地震数据处理的指导思想是变非常规地震数据处理为常规数据处理,在数据处理时根据数据的特点在流程参数和流程组合上灵活变通。

(1)针对炮间距过大的问题,处理策略采用降低横向分辨率,提高信噪比的方法,即重新划分更大的面元,将面元内的多个 CMP 道集组合成 1 个 CMP 道集,从而达到提高覆盖次数,提高信噪比的目的。

(2)电缆外部噪音采用异常振幅噪音去除的方法进行去除。由于噪音能量级别大,因此在处理中设置较大的阈值即可。电缆内部噪音依据其周期性进行去除,但是由于自适应相减容易伤害浅层的有效信号,因此在处理时容忍部分噪音衰减得不彻底。电缆噪音受采集条件制约,只能在道集上进行去除,且需要在进行道间插值之前进行去除,即需要优先处理。

(3)空白道插值是处理中必须的流程,主要在于数据道数太少,且由于道间距仅有 3.125 m,因此通过相邻道插值重新构建的空白道可靠性较高。插值后既方便处理效果的质量控制,同时也可以提高叠加剖面的信噪比。因此,空白道插值比单纯的设置坏道效果明显更优。

(4)对于短电缆,当目标层位较浅无法进行有效的速度分析时,采用水速进行叠加或偏移也基本可以反映出构造特征。水合物发育地区往往海底地形起伏较大,因此在处理中需要让绕射波归位,叠后偏移和叠前时间偏移都可以很好满足这一要求,且两者偏移效果相差不大。叠前时间偏移的信噪比更强,但同时叠前时间偏移在无有效反射能量的深部区域更容易画弧。

(5)处理后的剖面整体上信噪比较高,波组特征突出,地层反射信息丰富,可以满足 BSR 分布特征识别的要求,有利于本区天然气水合物的深入研究,达到了处理的目的。

**致谢:**对参与海上多道地震测量调查的全体

工作人员表示衷心的感谢!

#### 参考文献:

- [1] Kukowski N, Schillhorn T, Flueh E R, et al. Newly identified strike-slip plate boundary in the northeastern Arabian Sea[J]. *Geology*, 2000, 28(4): 355-358.
- [2] Grando G, McClay K. Morphotectonics domains and structural styles in the Makran accretionary prism, offshore Iran[J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 196(1/4): 157-179.
- [3] Delisle G, Rad U V, Andruleit H, et al. Active mud volcanoes on-and offshore eastern Makran, Pakistan[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2002, 91(1): 93-110.
- [4] Wiedicke M, Neben S, Spiess V. Mud volcanoes at the front of the Makran accretionary complex, Pakistan[J]. *Marine Geology*, 2001, 172(1): 57-73.
- [5] Schlüter H U, Prexl A, Gaedicke C, et al. The Makran accretionary wedge: sediment thicknesses and ages and the origin of mud volcanoes[J]. *Marine Geology*, 2002, 185(3): 219-232.
- [6] 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 Solid Earth*, 2010, 115(B08106): 1-16.
- [7] 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 & Planetary Science Letters*, 2014, 403: 131-143.
- [8] Rad U V, Berner U, Delisle G, et al. Gas and fluid venting at the Makran accretionary wedge off Pakistan[J]. *Geo-Marine Letters*, 2000, 20(1): 10-19.
- [9] Kaul N, Rosenberger A, Villinger H. Comparison of measured and BSR-derived heat flow values, Makran accretionary prism, Pakistan[J]. *Marine Geology*, 2000, 164(1): 37-51.
- [10] 弗斯丘尔 D J. 地震多次波去除技术的过去、现在和未来 [M]. 陈浩林, 张保庆, 刘军, 等, 译. 北京: 石油工业出版社, 2010: 71-119.
- [11] Verschuur D J, Berkhout A J, Wapenaar C P A. Adaptive surface-related multiple elimination[J]. *Geophysics*, 1992, 57: 1166-1177.
- [12] 潘 军, 栾锡武, 刘 鸿, 等. 异常振幅衰减技术在多道地震数据处理中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(4): 1639-1645.
- [13] Spitz S. Seismic trace interpolation in the F-X domain[J]. *Geophysics*, 1991, 56: 785-794.
- [14] Lee M W, Suh S Y. Optimization of one-way wave equations[J]. *Geophysics*, 1985, 50: 1634-1637.

- [15] 渥·伊尔马兹.地震资料分析:地震资料处理、反演和解释  
[M].刘怀山,王克斌,童思友,等,译.北京:石油工业出版

社,2006:395-405.

## THE SEISMIC DATA PROCESSING STRATEGY FOR AN UNCONVENTIONAL MONITORING SYSTEM: TAKING THE PAKISTAN GAS HYDRATE SURVEY FOR EXAMPLE

PAN Jun, GONG Jianming\* , LIAO Jing

(Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China;

Function Laboratory for Marine Mineral Resource Geology and Exploration, Qingdao National Laboratory for  
Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Gas hydrate is quite rich in offshore Pakistan. In order to pursue the occurrence of gas hydrate, multiple channel seismic survey was deployed. The data, however, was unconventional due to the acquisition environment which is only 1.2 fold and short in cable, rich in serious cable noise and of missing data sometimes. Therefore, the data need a special flow for processing. The key principle of data processing is to transform the unconventional seismic data processing into the conventional. Both the parameters of the module and the combination of the flow might be changed for conventional data processing. The key point is to increase the signal to noise ratio and the flow, including anomalous amplitude attenuation, missing data interpolation, adjacent CMP gather summation and migration. The processed section may satisfy the requirements of gas hydrate exploration.

**Key words:** gas hydrate; BSR; unconventional seismic data processing; Pakistan