



高分辨率小道距处理技术及属性分析在水合物识别中的应用

颜中辉, 杨 睿, 冯 京, 刘欣欣, 刘 鸿, 王小杰, 姜春涛

Application of high-resolution small group interval processing technology and attribute analysis for hydrate identification

YAN Zhonghui, YANG Rui, FENG Jing, LIU Xinxin, LIU Hong, WANG Xiaojie, and JIANG Chuntao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024111901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海神狐海域天然气水合物微观赋存特征的超分辨率CT图像识别

Super-resolution CT image recognition of micro-occurrence characteristics of natural gas hydrates from Shenhu area in northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(3): 149–159

末次冰盛期山东半岛高分辨率气候环境变化

High resolution climatic and environmental changes in Shandong Peninsula during the last glacial maximum

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 103–111

南海神狐海域非均质性天然气水合物储层的分频反演

Frequency-divided inversion method of heterogenous natural gas hydrates reservoir in the Shenhu area, South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 106–120

西太平洋帕劳砗磲高分辨率氧同位素记录及其指示的气候环境变化

High-resolution oxygen isotope records of *Tridacna gigas* from Palau, Western Pacific and its climatic and environmental implications

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 1–13

基于改进的广义S变换的海洋地震资料随机噪音压制

Random noise suppression of marine seismic data based on improved generalized S transform

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 184–193

基于长链烯酮及其氢同位素重建过去1.42万年来东海海表温度和盐度高分辨率记录

High-resolution records of sea surface temperature and salinity in the East China Sea in the last 14.2 ka: Implication from alkenone and its hydrogen isotopes

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(4): 71–84



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

颜中辉, 杨睿, 冯京, 等. 高分辨率小道距处理技术及属性分析在水合物识别中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(6): 46-59.
YAN Zhonghui, YANG Rui, FENG Jing, et al. Application of high-resolution small group interval processing technology and attribute analysis for hydrate identification[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(6): 46-59.

高分辨率小道距处理技术及属性分析在水合物识别中的应用

颜中辉^{1,2}, 杨睿^{1,2}, 冯京^{1,2}, 刘欣欣^{1,2}, 刘鸿^{1,2}, 王小杰^{1,2}, 姜春涛^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

摘要: 天然气水合物资源在能源勘探中扮演着越来越重要的地位, 浅表层天然气水合物的类型特征和成藏模式日益受到学者的广泛关注。浅表层天然气水合物一般赋存于近海底地层中, 在勘探过程中要求有更高的分辨率, 常规多道地震由于主频较低难以满足要求。海洋高分辨小道距地震探测技术具有分辨率高、作业方式灵活等优势, 在浅表天然气水合物勘探中得到广泛应用。实际的高分辨小道距资料由于采集设备条件的影响, 往往具有低信噪比的特点。本文针对高分辨小道距地震数据的特点开展精细化处理和属性分析。首先采用基于 $f-x$ 域和曲波域的多域噪声压制方法、基于频率域自适应虚反射压制和基于相干函数控制的虚反射走时电缆等浮校正等关键技术方法, 获得了波组特征更清晰的地震剖面。处理后的剖面具有信噪比较高、连续性好、地层结构清晰等特点, 可以更好地揭示BSR特征、空白带、气通道等地震反射特征, 为识别浅层天然气水合物赋存区地质信息奠定了基础; 然后对精细处理后的数据进一步开展瞬时振幅属性、瞬时频率属性、烃类检测等地震属性分析, 以此识别浅层天然气水合物的分布类型和成藏规律。

关键词: 高分辨率小道距; 浅层天然气水合物; 属性分析; 噪声压制; 虚反射压制; 电缆等浮校正

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024111901

Application of high-resolution small group interval processing technology and attribute analysis for hydrate identification

YAN Zhonghui^{1,2}, YANG Rui^{1,2}, FENG Jing^{1,2}, LIU Xinlin^{1,2}, LIU Hong^{1,2}, WANG Xiaojie^{1,2}, JIANG Chuntao^{1,2}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geology Survey, Qingdao 266237, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

Abstract: Natural gas hydrate resources are playing more and more important role in energy exploration, and the type characteristics and accumulation patterns of shallow layer natural gas hydrate have attracted more and more attention. Shallow layer gas hydrates generally occur in the near-seabed strata, and require higher resolution in the exploration process. Conventional multi-channel seismic are difficult to meet this requirement due to their low dominant frequency. With the advantages of high resolution and flexible operation mode, the marine high-resolution small group interval seismic exploration technology has been widely used in shallow gas hydrate exploration. Due to the influence of acquisition equipment conditions, the actual high-resolution small group interval data often has the characteristics of low signal-to-noise ratio. Therefore, fine processing and attribute analysis were carried out according to the characteristics of high-resolution small group interval seismic data. First, the key technical methods such as multi-domain noise suppression method based on the $f-x$ (f : frequency; x : the offset) domain and curvelet domain, adaptive ghost suppression based on frequency domain, and cable floating correction based on combination of gather coherence and ghost reflection traveltimes were used to obtain seismic profiles with clearer wave group characteristics. The processed profile has

资助项目: 国家自然科学基金“基于多分辨HHT时频分析的南黄海中深层弱地震反射补偿研究”(42106208), “东海陆架盆地长排列地震数据高精度叠前逆时深度偏移成像”(42106207); 山东省自然科学基金“跨频段融合天然气水合物储层检测研究”(ZR2021MD118); 自然科学基金地质联合基金“南海北部高富集天然气水合物储层特征与成藏控制机理研究”(U2244224); 中国地质调查项目(DD20230643, DD20191003)

作者简介: 颜中辉(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋地震资料处理及方法研究, E-mail: zhonghui4564573@163.com

通讯作者: 杨睿(1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋地球物理研究, E-mail: yangr@mail.cgs.gov.cn

冯京(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋地质与地球物理研究, E-mail: fengjing200272@163.com

收稿日期: 2024-11-19; 改回日期: 2024-12-23. 张现荣编辑

the characteristics of high signal-to-noise ratio, good continuity, and clear stratigraphic configuration, which can better reveal the seismic reflection characteristics such as BSR characteristics, blank zone, and gas channel, and lay a foundation for identifying the geological information to locate the shallow gas hydrate occurrence area. Secondly, the seismic attributes such as instantaneous amplitude attribute, instantaneous frequency attribute, and hydrocarbon detection were further analyzed for the finely processed data for the identification of the distribution type and accumulation law of shallow gas hydrate.

Key words: high resolution small group interval; shallow gas hydrate; attribute analysis; noise suppression; ghost suppression; cable floating correction

随着天然气水合物勘查工作和研究程度的深入,地质、地球物理、地球化学技术方法逐步完善,形成了一套综合勘查技术体系^[1-4]。目前天然气水合物探测最常用的方法是地震勘探,其中,海洋拖缆多道地震已经广泛应用于常规海洋油气资源勘探。为了获得较深的穿透深度以及高的覆盖次数,海上采集一般选择大能量震源、长排列电缆、较低的主频激发方式^[5-6],满足了常规油气资源勘探的需求,以及对区域深部地质构造的综合研究。由于常规多道地震主频较低,获得的地层分辨率相对较低,加上采集过程对震源和电缆的要求较高,施工往往比较复杂,难以满足对浅地层和微构造的勘探需求,且对天然气水合物识别精度不够。浅表层水合物具有特殊的成藏模式,主要以薄层分布在近海底区域,跟断层、气烟囱等破碎带紧密相连。目前针对浅地层勘探技术主要有高分辨小道距地震和单道以及浅地层剖面,单道地震由于穿透深度不够难以获得有效的信息。海洋高分辨率小道距探测具有小震源能量、短排列、小道距、较高主频等特点,已被广泛应用于第四纪地层层序研究,以及浅表天然气水合物高精度识别等^[7-10]。短排列保障了采集过程中的灵活和实用性,较高的激发主频保证了地震资料具有较高的纵向分辨率。从探测深度来看,地层穿透深度最大可达约 1 000 m,有效能量能穿透到基岩面顶部,而海洋天然气水合物赋存埋藏深度分布范围基本在海底以下 100~1 000 m 的沉积层中^[11-13],因此,小道距高分辨率地震探测技术从分辨率和穿透深度上都很好满足了这种要求。

高分辨率地震勘探的重要环节是获得高分辨率、高信噪比的地震资料,这是浅表层水合物识别的关键地球物理数据。在实际的高分辨小道距采集过程中,受电火花震源、沉放深度以及电缆姿态的影响,采集到的原始资料存在背景噪音严重、电缆姿态不稳导致的信号反射时间-距离不符合双曲线变化规律、虚反射效应明显等问题,使得地震数据信噪比低、成像品质较差。为获得高分辨率、高信噪比地震资料,必须对原始数据进行针对性的精

细化处理^[14-16]。由于小道距采集一般采用短排列,没有水鸟进行控制,电缆的水深数据未知,常规的基于源缆深度的虚反射压制技术难于满足要求,而针对电缆校正的剩余时差校正方法不考虑电缆深度变换的影响,同样不适用。本文通过拾取虚反射走时与常规相干剩余校正结合方法解决电缆不等浮问题,在虚反射压制方法上采取基于数据驱动的频率域自适应调整滤波算子,应对缆深变换问题,以此获得成像较高的地震数据。

似海底反射(BSR)是天然气水合物识别过程中的重要地球物理证据^[17-20],随着勘探实践的深入和理论研究的发展,尤其是浅表层水合物,在成藏机制、赋存类型等方面存在多样性,体现在地震剖面上则显示为复杂异常响应的多重组合,而非 BSR 与水合物赋存带“一一对应”的关系。这一方面使曾经“看不到”的水合物纳入了人们的视野;另一方面也增加了水合物特征识别的难度。地震属性分析技术是以地震信号的振幅、频率、相位等信息或信息组合为基础,通过数学运算,提取同一数据不同信息的异常响应,其在油气储层预测等领域已得到广泛应用。理论上讲,由于浅表层水合物生长对周缘沉积物的破坏作用,地震信号必然记录其异常响应,完全可以通过属性分析技术提取多种异常^[21-23],筛选敏感属性,进而综合研判,揭示水合物矿体的存在及分布特点,同时分析其成藏机制。

为了给浅表水合物与 BSR 水合物分析提供高保真地震数据,本文首先采取 $f-x$ 域和曲波域的联合叠前相干噪音压制技术有效压制噪音,提高资料信噪比;然后通过基于虚反射走时和道集相干联合的电缆等浮校正方法使共中心点同相叠加,提高速度分析精度与叠加质量;最后通过基于频率域自适应虚反射压制方法有效压制虚反射,提高成像品质。在针对性精细处理的基础上,开展针对水合物及 BSR 的地震特征反射解释和地震多属性研究,并通过地震反射特征、BSR 特征、气通道发育及地震属性的识别,指出工区可能存在的不同类型的天然气水合物分布有利区。

1 高分辨率小道距地震资料处理关键技术及效果分析

1.1 叠前多域噪音压制技术

高分辨小道距采集频率较高, 噪音也相对较严重。同时, 受缆放长短及沉放深度浅的影响, 实际原始资料上的外源干扰比较严重, 噪音类型也较特殊, 影响其信噪比的主要噪音表现为线性噪音和双曲形噪音。线性噪音在炮集上表现为全覆盖, 速度大概 1 500~2 000 m/s, 从近偏移距到远偏移距振幅能量逐渐变弱(图 2a), 强能量的噪音严重掩盖了有效地震反射, 导致了原始资料信噪比极低。双曲形噪音表现为似海底反射形态(图 3a), 可能是由于震源本身或者外源干扰所产生, 速度大约 1 500 m/s, 在 $t-x$ 域难以与有效信号进行区分, 频率范围与有效反射主频相比稍低。

根据原始资料中线性噪音速度的特点, 针对性的采取 $f-x$ 域相干噪音压制技术^[24]。首先通过傅里叶变换将地震记录从 $t-x$ (时间-偏移距) 域变换到 $f-x$ (频率-偏移距) 域, 对应地震记录内 $f-x$ 域表达式为:

$$d(w, x) = s(w, x) + c(w, x) + r(w, x) \quad (1)$$

式中, $d(w, x)$ 为原始地震记录, $s(w, x)$ 为有效信号, $r(w, x)$ 为随机噪音, $c(w, x)$ 为相干噪音, x 为偏移距, w 为角频率。

然后结合扇形滤波器原理和最小平方法, 对给定速度区间内的不同频率噪音进行相邻道的估算,

得到最小平方误差估算表达式:

$$Q(w) = \sum_n [d(w, x_n) - f(w, x_n)a(w, x_n)]^2 \quad (2)$$

式中, $Q(w)$ 为最小平方函数, $f(w, x_n)a(w, x_n)$ 为相干噪音, 其中 $a(w, x_n)$ 对应加权函数, $f(w, x_n)$ 对应时间延迟算子。最后将估算的相干噪音在 $f-x$ 域从地震记录中减去, 逆傅里叶变换后, 将减去的结果变换回到时间-偏移距域, 从而达到去除线性噪音的效果。

针对原始资料中的双曲形噪音, 本次处理采取基于曲波变换进行噪音压制^[25-27]。理论上来说, 曲波变换是一种具有多尺度的傅里叶变换(图 1), 表达式为:

$$c(j, k, l) = \langle f, \phi_{j, k, l} \rangle = \int_{R^2} f(x) \overline{\phi_{j, k, l}(x)} dx \quad (3)$$

其中, $f(x)$ 表示输入的原始地震信号; $\phi_{j, k, l}$ 为曲波函数, $c(j, \phi_{j, k, l})$ 为曲波系数, 其中, j 为尺度, l 为方向, k 为尺度在 j 方向上的矩阵系数。基于有效信号和噪音在速度、频率上的差异, 通过多尺度的曲波变换, 建立时间域内不同频率范围的倾角和曲波域内不同的尺度和方向之间的对应关系, 使得时间域的有效信号和噪音在不同尺度下表现出更多“细微”的区别。其处理过程是, 首先通过分频扫描获得有效信号和噪音的主要频带, 动校正后, 先对大尺度的有效信号和双曲形噪音进行分离; 然后在曲波域内, 根据频率和倾角的差异选取不同尺度进行滤波, 其滤波参数根据差异大小进行调整。通过这种先大尺度再小尺度的压制方法, 可以对不同尺度范围的噪音进行针对性的压制。

经过 $f-x$ 域压制线性噪音前后的炮集对比见

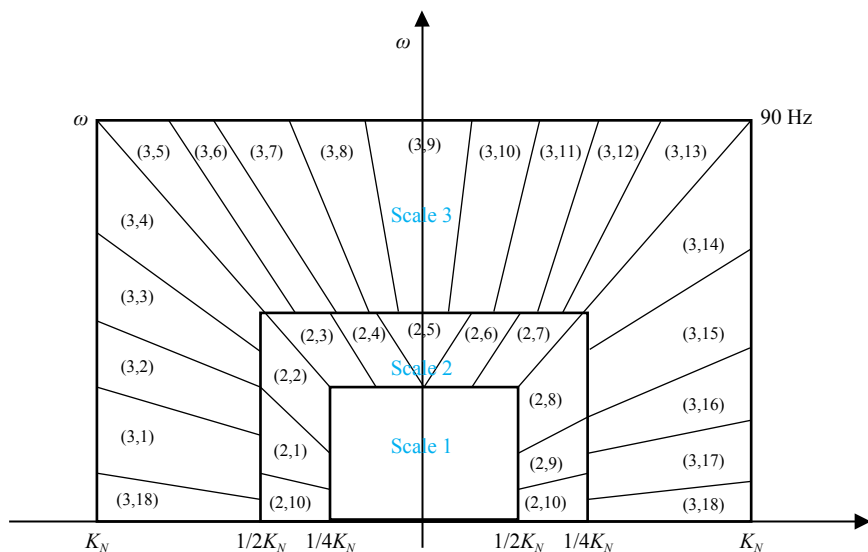


图 1 曲波变换示意图

Fig.1 Diagram of curvelet transform

图 2, 从压制效果来看, 线性噪音得到有效的去除, 有效同相轴得到恢复。经过曲波变换进行双曲形噪音压制前后的对比见图 3, 从压制效果来看, 低频的双曲形噪音基本得到去除, 炮集信噪比有了提升, 有效同相轴连续性得到改善。叠加剖面上压制噪音前后的对比见图 4、5, 可以看出压制后的剖面信噪比更高, 地层分辨率得到有效提升。

1.2 电缆等浮时差校正技术

常规多道拖缆采集过程中, 会通过水鸟来控制不同检波器位置的深度, 来保持相同水平深度, 以

此达到不同偏移距的同相叠加效果, 有效波同相轴表现为标准的双曲线形态, 近偏移距范围内虚反射和一次波时差基本可以忽略不计。但是, 一般的高分辨率小道距采取短排列的模式, 采集实施过程中不通过水鸟进行深度控制, 受海况和重力的影响, 导致电缆会存在不等浮状况, CMP 道集动校正后表现为同相轴动校不平的现象, 同时伴有抖动的情況 (图 6a), 难以达到同相叠加的效果。因此, 需要对电缆不等浮引起的时差进行校正。

常规的剩余时差校正方法基本是不考虑电缆深度变换引起的时差, 加上实际处理过程中不同检

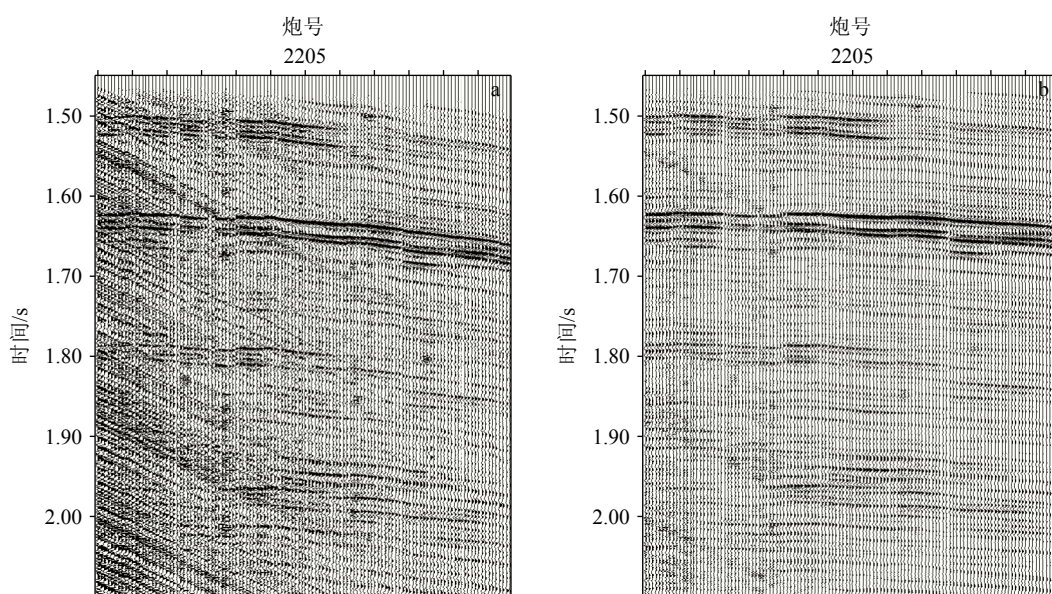


图 2 炮集上线性噪音压制前 (a) 后 (b) 的效果对比

Fig.2 Shot gather before (a) and after (b) linear noise attenuation

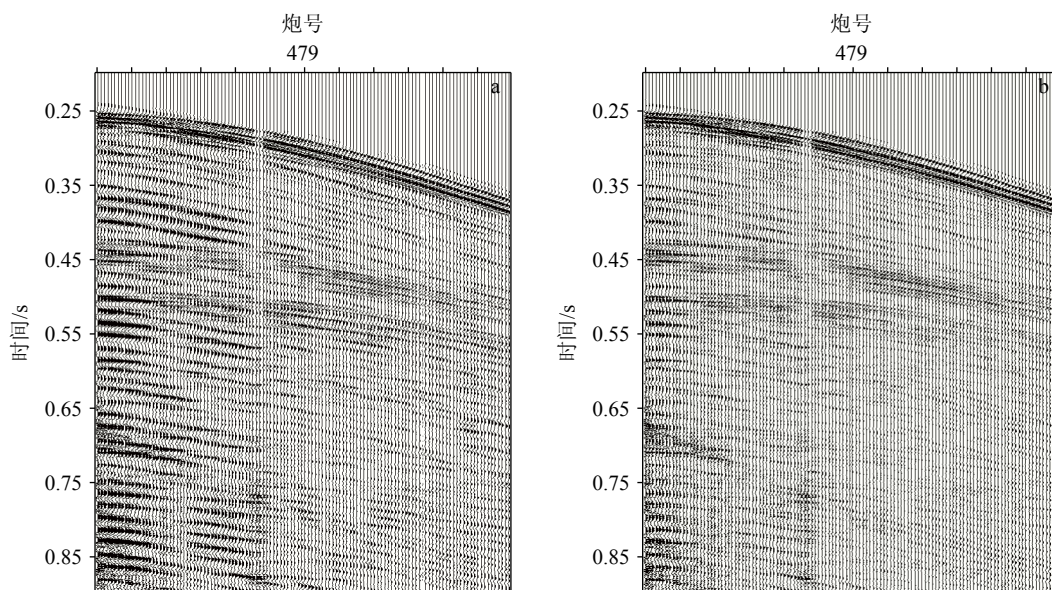


图 3 炮集上双曲形噪音压制前 (a) 后 (b) 效果对比

Fig.3 Shot gather before (a) and after (b) hyperbolic noise attenuation

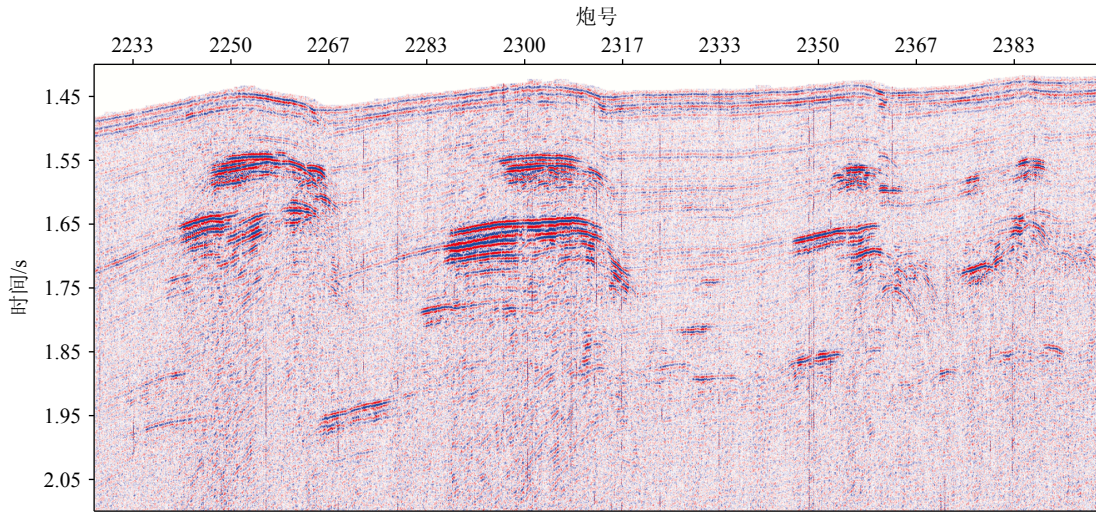


图 4 噪音压制前的叠加剖面

Fig.4 Stacked profile before noise suppression

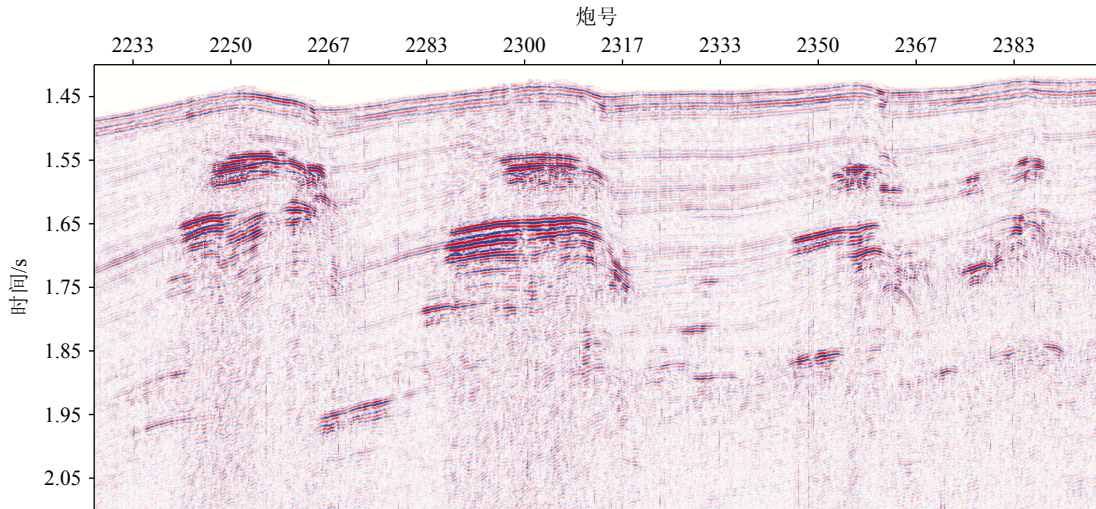


图 5 噪音压制后的叠加剖面

Fig.5 Stacked profile after noise suppression

波器位置的实时深度未知,得到的时差量不是缆深度引起时差的准确体现。我们采用常规互相关时差校正方法结合虚反射走时方法,通过相干函数建立这两种方法的联系,同时充分考虑两者的技术优势,以此实现电缆不等浮引起的时差校正。主要思路是:首先交互拾取炮集海底反射时间和检波点的虚反射时间(以一定间隔),所有炮相应的时间以线性插值的方式获得,再通过公式(4)、(5)、(6)计算出实际不同检波器的深度,进而获得初步的时差校正量^[28];然后选择合适的模型参考道,基于互相关剩余时差方法获取参考的时差校正量^[29-30];最后通过相干函数对两个时差量加权选择,获得符合实际的剩余时差,应用修正后的校正量实现剩余时差校正,消除电缆不等浮带来的影响,以此获得更好的成像质量。

基于有效反射和虚反射的走时原理,可以计算两者的时差 dT 公式:

$$dT = \frac{1}{V} \left[\sqrt{(2D_{WB} + D_R - D_s)^2 + X_{off}^2} - \sqrt{(2D_{WB} - D_R - D_s)^2 + X_{off}^2} \right] \quad (4)$$

式中, X_{off}^2 为炮检距, V 为海水速度, D_{WB} 为海底深度, D_s 为震源放沉深度, D_R 为水听器放沉深度。

由公式(4)可知,对应水听器的深度表达式如下:

$$D_R = \sqrt{\frac{(2D_{WB} - D_s)^2 + X_{off}^2 - (VdT)^2 / 4}{\frac{4(2D_{WB} - D_s)^2}{(VdT)^2} - 1}} \quad (5)$$

可以看出,只要获得海底反射和虚反射之间的时差,在海底深度、偏移距已知的情况下,电缆上实

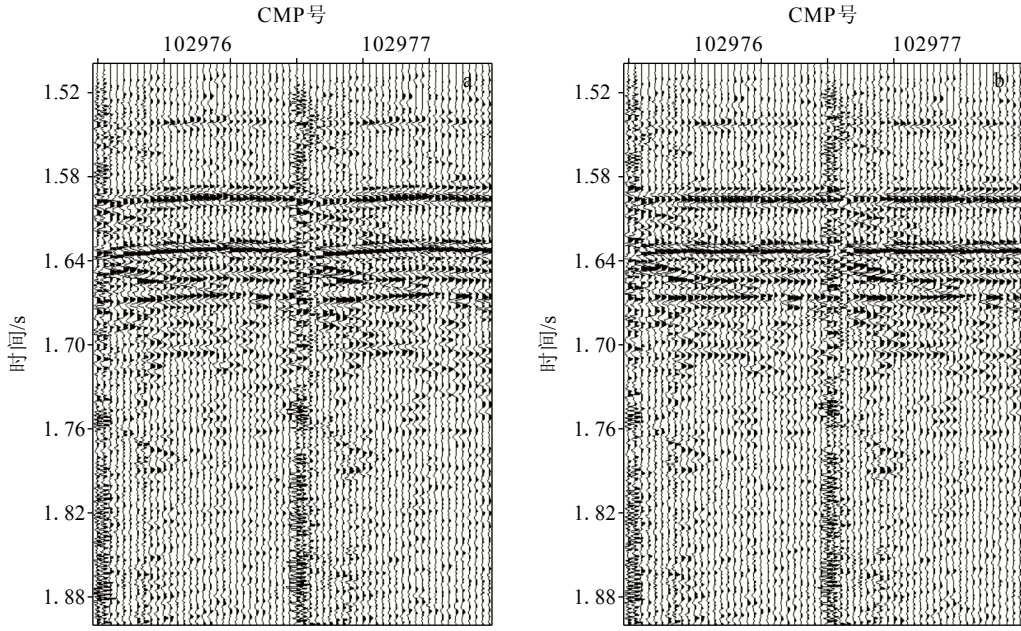


图 6 电缆等浮时差校正前 (a) 后 (b) CMP 道集

Fig.6 CMP gathers before (a) and after(b) cable float time correction

际的各个检波点对应水深值可以通过公式(5)计算, 以此获得道集上相应的初始剩余时差 dT_{re} :

$$dT_{re} = \frac{(D_R - D_s) \times 1000}{V} \quad (6)$$

参考的时差校正量通过选择的模型参考道和每个道集内所有道进行绝对互相关获得, 公式如下:

$$r_{xy}(\tau) = \sum_{j=T_1}^{T_2} y(j)x(j+\tau) \quad (7)$$

式中, $r_{xy}(\tau)$ 为互相关函数, $y(j)$ 为模型道。实际处理中, 我们会根据道集的情况优选出信噪比好的道进行叠加形成; $x(j+\tau)$ 为需要处理的 CMP 道集, $\tau = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm M$, $T_2 - T_1$ 为选定时窗的长度, T_1 、 T_2 为对应的起始和终止时间; j 为对应时窗范围内给定的振幅采样序号; M 表示剩余时差校正量给定的最大阈值。

电缆等浮校正计算的剩余时差主要是电缆深度变换引起的。我们则以初始时差为标准, 在给定的时窗范围内采取适合的步长对两者进行互相关系数的估算。根据系数大小, 以一定的规则对两者进行比例加权, 获得比较准确的时差校正量。相关系数计算公式如下:

$$p = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

其中 $\text{Cov}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n}$, σ_x , σ_y 分别为 x , y 的标准差。

等浮校正之前的道集见图 6a, 动校正后远偏移

距明显存在上翘的情况, 同时不同偏移距位置伴随存在异常拉伸的现象, 导致道集上同相叠加效果不佳, 叠加剖面(图 7)表现出有效地层反射能量弱、连续性较差、信噪比低等问题, 局部可能存在地层异常错位的现象。道集校正后的结果见图 6b, 动校正不平情况得到了明显的改善, 整体处理效果较好。从叠加剖面来分析(图 8), 校正后不同偏移距产生了同相叠加的效果, 地层的有效反射能量相应增强, 尤其内幕反射。总体来说, 资料信噪比和成像质量得到有效提升。

1.3 基于频率域自适应虚反射压制方法

小道距地震资料中炮检点的虚反射尤为明显, 叠加剖面是表现为“多轴”的情况, 同时, 虚反射的存在会引起陷波现象, 降低资料的频带宽度和地震剖面波组特征关系之间的清晰度, 从而影响地质解释和地层识别的精度。因此, 虚反射压制是小道距地震数据高分辨处理的重要环节^[31-32], 其主要目的是消除假的同相轴和频谱陷波带来的影响, 有效补偿陷波能量, 拓宽频带宽度, 提升有效信号的分辨率。实际小道距采集一般不使用水鸟控制电缆深度, 炮检波点准确的深度信息无法获得。因此, 常规利用源缆深度参数的虚反射压制方法不可取, 我们采用基于数据驱动的自适应算法, 在频率域设计虚反射的反滤波算子对虚反射进行压制^[33]。

虚反射的产生实际上是由于海水界面的滤波作用导致的, 对应的地震记录 $f(t)$ 在频率域中可表

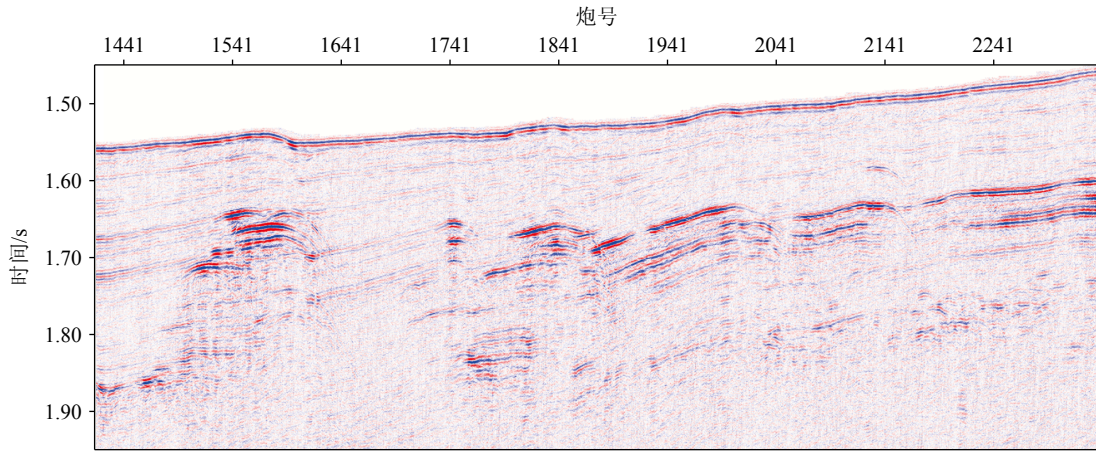


图 7 电缆等浮时差校正前叠加剖面

Fig.7 Stacked profile before cable float time correction

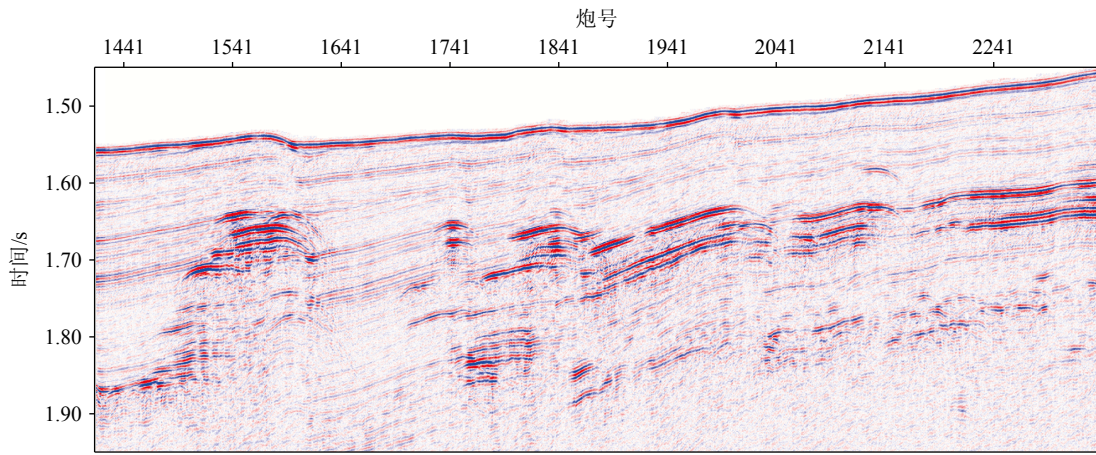


图 8 电缆等浮时差校正后叠加剖面

Fig.8 Stacked profile after cable float time correction

示为:

$$F(W) = S(w)V(w) \quad (9)$$

式中, $V(w)$ 为鬼波滤波器; $S(w)$ 为一次有效波频率。

对于激发产生的虚反射, 在满足垂直反射的条件下, 一次波旅行时相对于虚反射有固定的延迟时间 τ_s , 对应的公式表示为:

$$f(t) = S(t) + r \cdot s(t - \tau_s) \quad (10)$$

上式通过傅里叶变换得到:

$$F(w) = S(w)(1 + re^{-i w \tau_s}) \quad (11)$$

对比式 9 和式 11 可得:

$$V(w) = 1 + re^{-i w \tau_s} \quad (12)$$

同时考虑震源虚反射、检波点虚反射、震源加检波点虚反射的存在, 可得:

$$V(w) = 1 + re^{-i w \tau_s} + re^{-i w \tau_r} + r^2 e^{-i w \tau_{sr}} \quad (13)$$

对于一维模型, 震源虚反射延迟时间为 $\tau_s = 2h_s/v$, 垂直波数 $k_z = w/v$, 可得频率-波数域虚反射滤波算

子表达式:

$$A(f) = \frac{1}{1 + re^{-2ik_z h_s} + re^{-2ik_z h_r} + r^2 e^{-2ik_z h_{sr}}} \quad (14)$$

通过式 (14) 可以看出, 水平波数 k_z 即地震波入射角、震源和电缆沉放深度这些变量会影响反虚反射算子的计算。处理过程中, 通过傅里叶变换到频率域, 从地震数据道头中获得相应的数据, 自适应修改滤波参数进行虚反射压制, 消除了地震波入射角度和炮检点沉放深度变化造成的影响, 在频率域内反滤波, 转换到时间域得到压制虚反射后的地震记录。

经过虚反射压制后叠加剖面的对比见图 9、10, 对应的压制前后的频谱对比见图 11、12。通过基于频率域自适应虚反射压制方法处理后, 跟着有效地层反射后的假同相轴得到了很好的压制, 地层波组特征以及接触关系更加清晰 (黑色箭头所示位置)。由于算法的局限性, 在电缆深度变换较剧烈情况下, 存在虚反射压制不彻底的情况 (红色箭头

位置)。从频谱对比可以看出,有效补偿了陷波点的能量,提升了频带宽度。

1.4 处理效果分析

在处理过程中,充分把握高分辨小道距地震资料的特点,分析引起低信噪比的原因,通过针对性的精细处理方法,重点提升资料的信噪比和有效反射能量,以此获得能有效识别浅层水合物和BSR水合物的特征。经过本文针对性处理技术和常规处理技术后的地震剖面与原始剖面对比见图13。常规处理主要是噪音压制,不涉及有效信号能量的提升和虚反射的压制。整体来说,二套方法处理后的剖面的信噪比有了较大提升,而我们采用的针对性处理技术后,由于有效能量的恢复和频带的拓宽,

地层的分辨率有了很好的改善,BSR的地震反射特征刻画也更加清晰(箭头所示)。对比图13b和图13c,可以看出,针对性处理后的剖面不同位置地层表现出不同的反射特征,浅层水合物相应的空白带反射特征明显(矩形框所示),气烟囱范围内的信息更加丰富(椭圆所示),更有利于浅表层水合物的识别。

2 浅层天然气水合物地震反射特征识别

精细处理后的小道距成果剖面信噪比较高,同相轴连续性较好,地层层序分辨率较高,构造断裂比较清晰,可有效识别出海底以下600ms以内地层。水合物主要发育在海底以下约150~200ms位

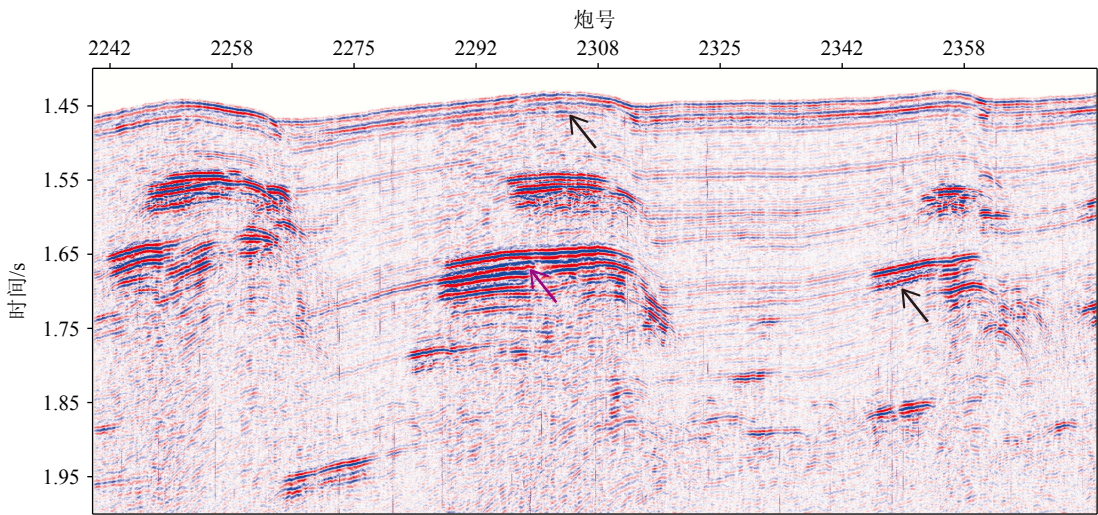


图 9 虚反射压制前叠加剖面
Fig.9 Stacked profile before ghost suppression

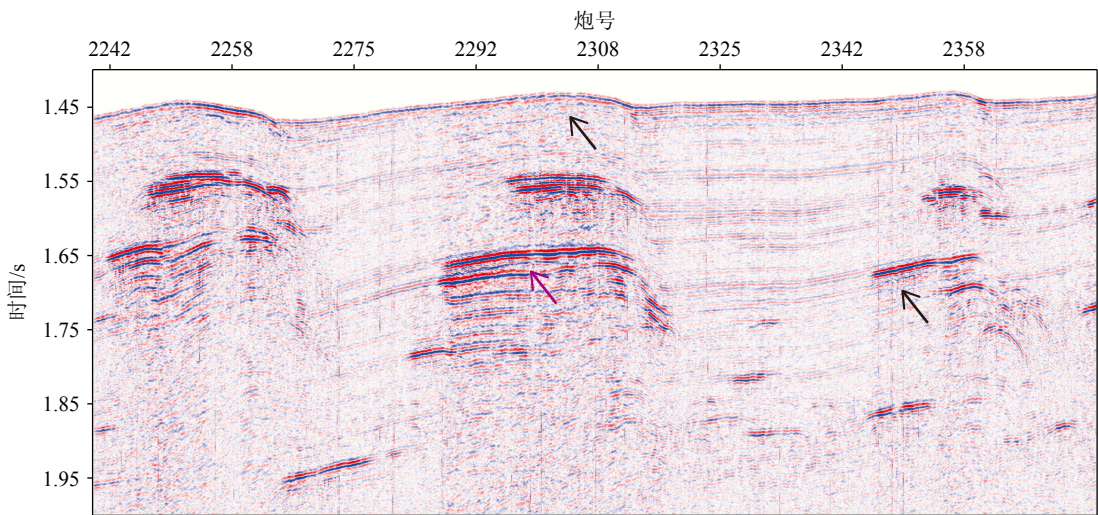


图 10 虚反射压制后叠加剖面
Fig.10 Stacked profile after ghost suppression

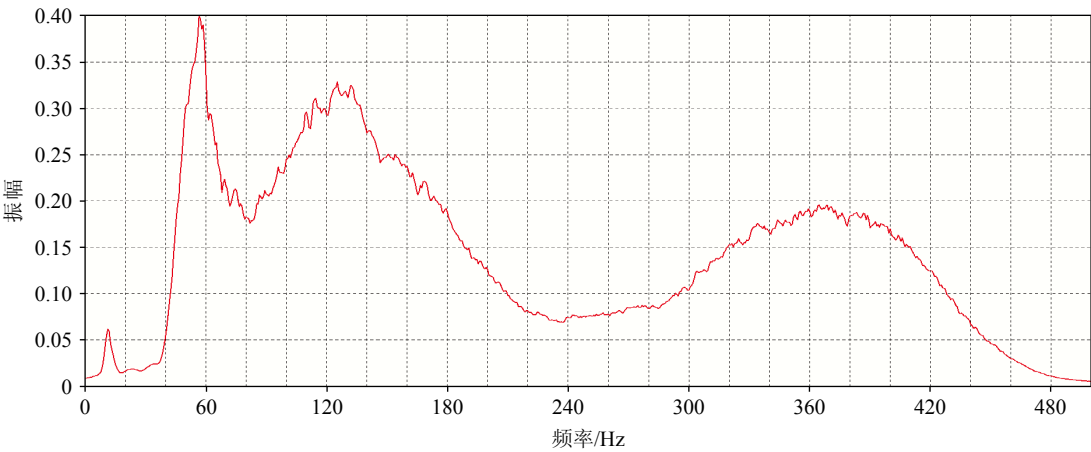


图 11 虚反射压制前频谱
Fig.11 The spectrum before ghost suppression

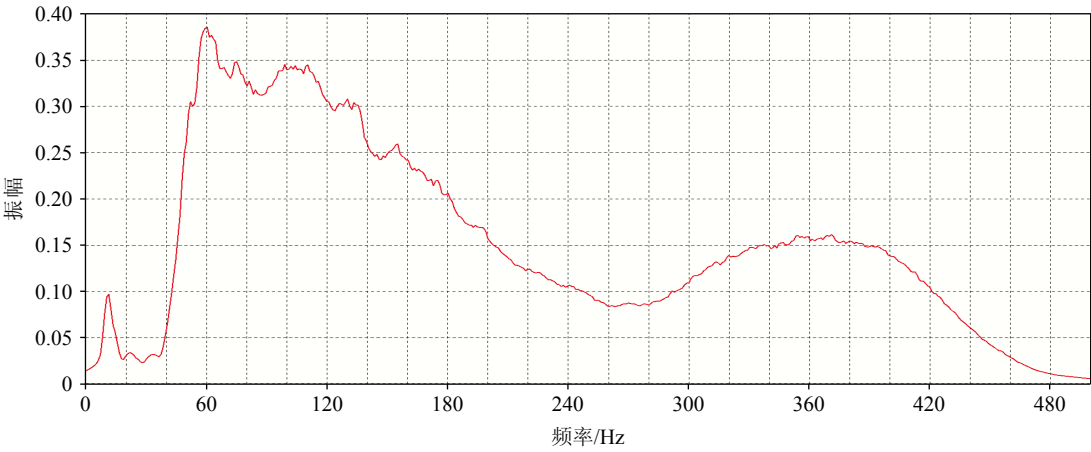


图 12 虚反射压制后频谱
Fig.12 The spectrum after ghost suppression

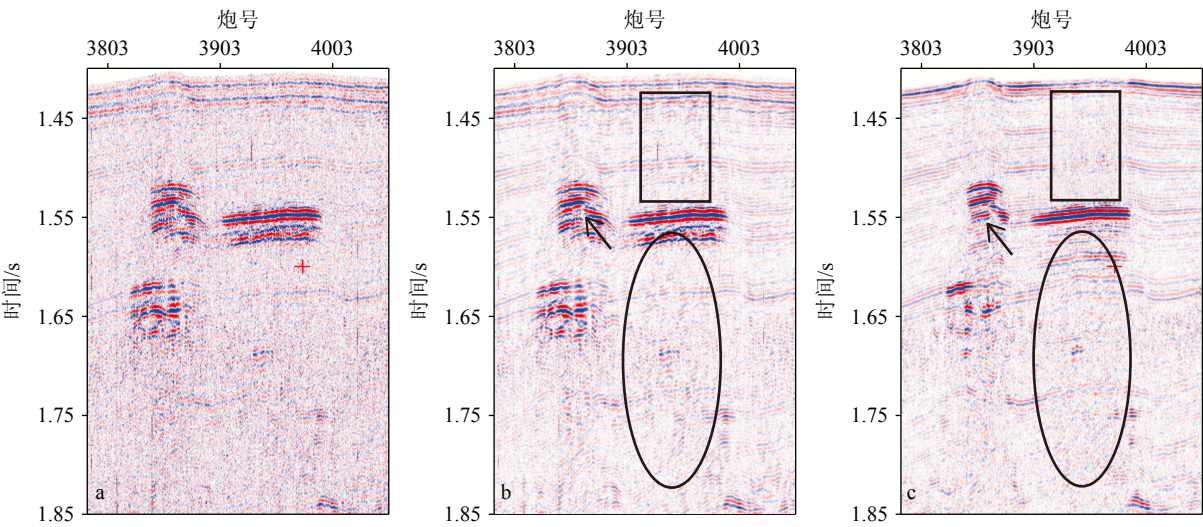


图 13 针对性精细处理和常规处理对比
a: 原始剖面, b: 常规处理剖面, c: 针对性处理剖面。

Fig.13 Comparison between Targeted fine processing and conventional processing
a: Original profile, b: conventional processing profile, c: targeted processing profile.

置, 出现 BSR、空白反射、气烟囱等反射特征。

图 14 为研究区内一条南北向的剖面, 显示海底浅层存在大量雁行排列的高角度断层, 大部分直通海底, 这与该区域张裂背景有直接关系; 而图 15 则显示一处理深较大的 BSR, 其上部存在空白反射带, BSR 处可见极性反转, 其下可观察到杂乱反射区, 与强烈的气体充注和气运移有关。区内大量的近海底振幅空白带可能预示着这里存在大量的流体渗漏, 尤其是甲烷气体的渗漏。受能量穿透深度影响, 难以判断气源是否主要来自深层, 但其在浅层的发育程度是可以确定的。前人的钻探也表明, 这一区域广泛分布有浅层水合物。剖面显示大量高角度气烟囱, 顶部多数伴有疑似 BSR, 虽然可能的水合物分布区域较多, 但规模都较小, 且呈散点

分布, 如图 15 所示, 类型水合物赋存响应在区内则较为少见, 但从空白带厚度推测, 该处水合物应具有较高的饱和度。

图 16 为该研究区内一条东西向剖面, 东部(右)地势较高但地形相对平缓, 沉积层呈逐渐收窄的趋势。西部则发现一处规模较大的侵入体, 自深部突破至近海底, 这是导致测线西部地形隆起的主要原因, 隆起边缘清晰、陡峭, 受能量穿透不足等因素影响, 难以判断侵入体类型, 但因其强烈隆起; 在其东侧形成了一个规模可观的沉积中心, 是整条测线浅部沉积厚度最大的区域。在沉积中心底部, 有一处活动性较强的气烟囱, 其一侧边缘与高角度断层重合。该断层应为气烟囱主要的气体运移通道, 气烟囱顶部有显著的 BSR 响应和振幅空白带, 应与水合

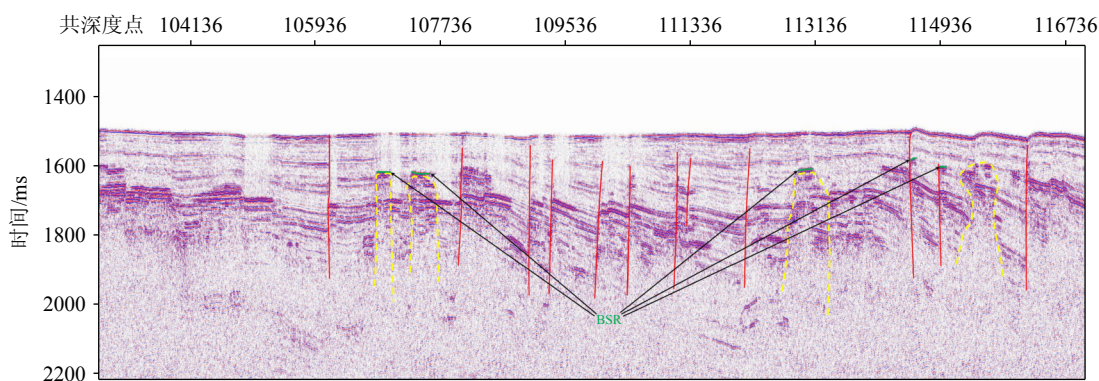


图 14 地震剖面上构造及水合物特征

黄色虚线为气烟囱, 红色实线为断层, 绿色实线为 BSR。

Fig.14 Structure and hydrate characteristics on seismic profile

Yellow dotted lines indicate gas chimney, red solid lines indicate fault, and green solid lines are BSR.

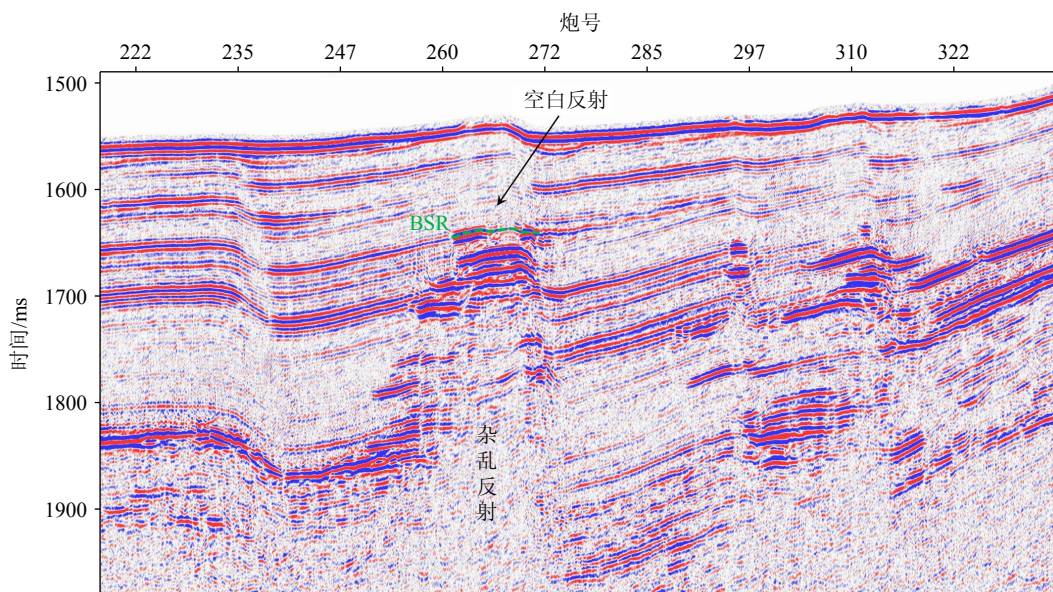


图 15 BSR 等异常响应局部放大图

Fig.15 Partial enlargement of of BSR and other abnormal responses

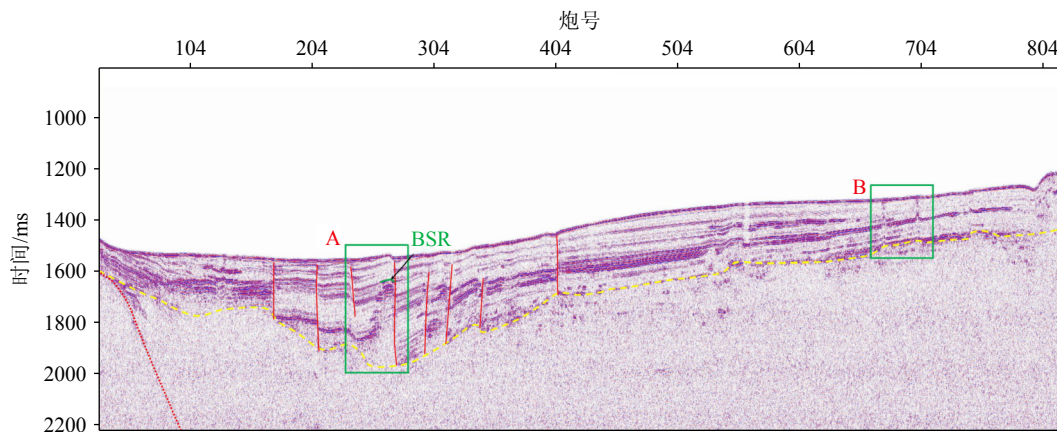


图 16 地震剖面上构造及水合物特征

黄色虚线为基底, 红色实线为断层, 红色虚线为侵入体边界, 绿色实线为 BSR。

Fig.16 Structure and hydrate characteristics on seismic profile

Yellow dotted line marks the basement, red solid lines are the fault, the red dotted lines are the boundary of intrusive rocks, and the green solid line is BSR.

物赋存相关。

3 浅层天然气水合物地震属性识别

目前, 地震属性分析技术已被广泛应用于地震数据处理、地质解释、地震反演及油藏描述等领域。一般地说, 当地下沉积层在纵、横向上存在物性差异, 尤其是含油气性的差异, 会以不同的地震响应显示出来, 可以通过地震属性分析的方法突显其响应的差异性, 从而达到“信息提取”的目的。如地层孔隙中充填了流体(如油、气等), 则会导致沉积层速度、频率的降低, 与周缘不含流体的地层相比, 其振幅在地震剖面上则表现出明显的差异, 而这种差异性具有不确定性, 流体类型、充填程度、沉积物种类等很多因素都有可能影响成像。因此, 可以引入适当的地震属性来验证, 从而多角度验证, 提高解释结果的可信度。

选取图 16 中剖面具有代表性的位置(对应左绿色方框)进行地震属性分析, 对比地震剖面 and 瞬时振幅属性剖面(图 17), 发现 BSR 大约出现于双程旅行时 1.64 s 附近, 其上存在空白带, 但不甚显著, 可能与水合物的饱和度偏低、层厚较薄有关, 但其下的气烟囱区则相当明显, 在瞬时振幅剖面上形成明显的模糊区, 地层出现断续, 即与周缘地层存在分界, 可视为气烟囱的边界。这些特征均指示了水合物的存在。烃类检测属性剖面(图 17)显示, 在地震剖面、瞬时振幅剖面上浅层存在的丰富薄地层并无显著的烃类响应, 其主要原因在于这一区域的近海底沉积物中, 没有大量流体(尤其是气体, 此区域

重点考虑甲烷气)充注。由此可以推测, 此处水合物为深部甲烷流体渗漏至浅部水合物温压稳定带内形成, 为渗漏型水合物。

通过图 16 剖面中右侧绿色方框位置的地震属性分析(图 18), 显示在炮号 670 到 705 范围内存在明显的气体逃逸, 瞬时振幅表现为明显的低频、振幅异常, 尤其在烃类检测剖面上, 存在与地层平行的浅层流体充注现象, 可能与该处地层孔隙度偏高, 有大量气体在地层内横向运移有关。这佐证了两处流体逃逸发生的可能性, 当充注程度较高时, 气体压力逐渐增大, 必然会在沉积层薄弱点形成突破, 进而破坏海底形成逃逸。这也说明在该地区存在大量的浅层气, 印证了前人的研究, 也为水合物形成提供了更多元的气源供给。

4 结论

(1) 高分辨率小道距地震探测技术具有主频高、频带宽的特点, 同时还具备一定的探测深度。相比于单道地震、浅地层剖面, 它在勘探水深和地层穿透深度上具有较大的优势, 满足浅表层天然气水合物勘探的需要。

(2) 高分辨率小道距地震资料处理的难点在于电缆不等浮和虚反射效应, 本文基于虚反射走时和道集相干联合的电缆等浮校正方法进行剩余时差校正, 解决了电缆深度未知情况下的电缆等浮校正问题, 保证了时差校正的准确性; 对于虚反射压制, 通过基于数据驱动的自适应频率压制方法, 消除缆深变换的影响, 补偿陷波能量, 针对性解决资料信

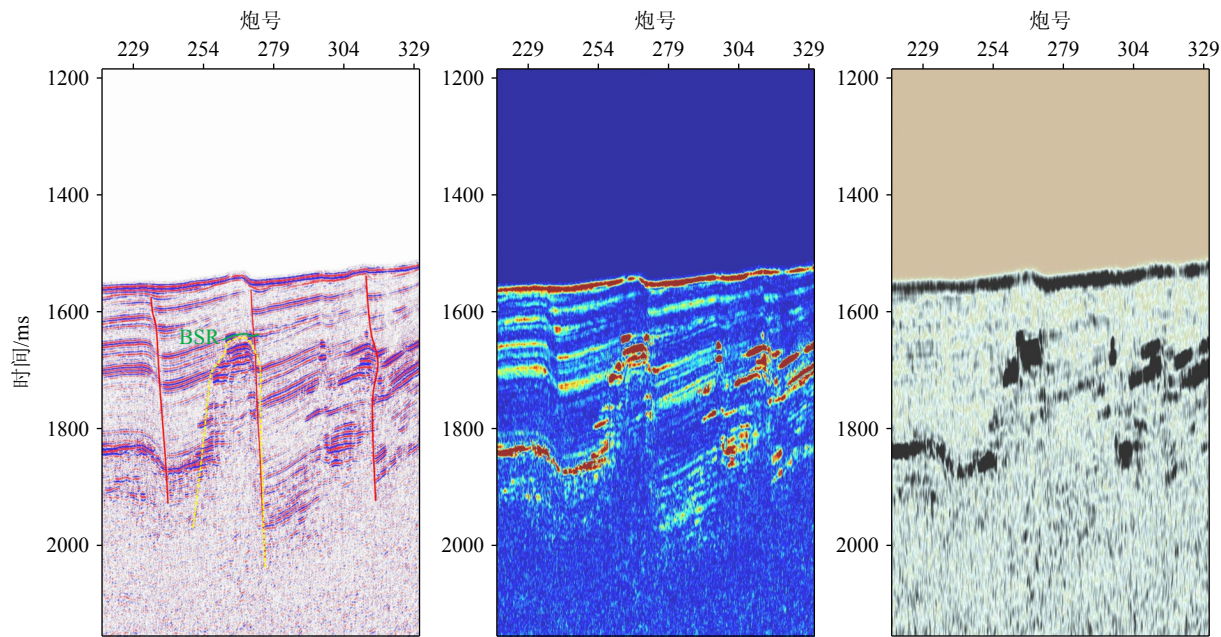


图 17 地震解释剖面及属性
地震剖面(左)、瞬时属性剖面(中)、烃类检测剖面(右)。

Fig.17 Seismic interpretation profile and attributes

Seismic profile (left), instantaneous attribute profile (middle), hydrocarbon detection profile (right).

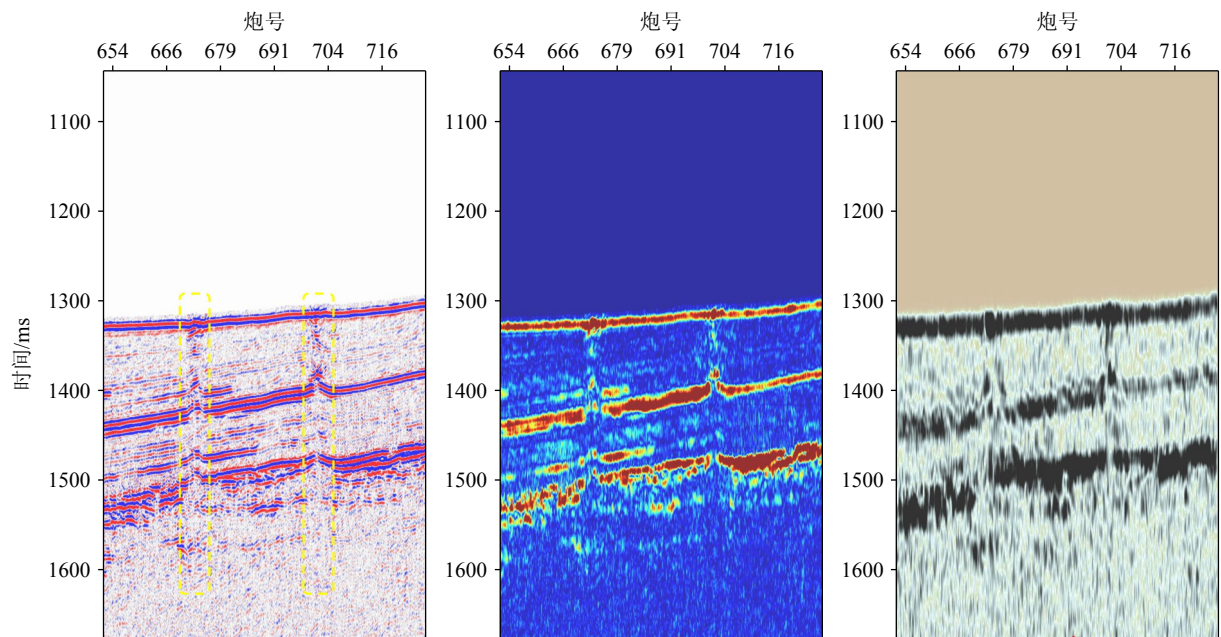


图 18 地震解释剖面及属性
地震剖面(左)、瞬时属性剖面(中)、烃类检测剖面(右)。

Fig.18 Seismic interpretation profile and attributes

Seismic profile (left), instantaneous attribute profile (middle), hydrocarbon detection profile (right).

噪比低和有效反射能量弱的问题,并能提供地震属性分析,以此突出水合物的不同地震特征。

(3)高分辨率小道距地震成果剖面,更清晰地展示了 BSR 与空白带、流体运移通道与水合物赋

存带的空间叠置关系,为浅层水合物成藏机制研究提供了更可靠的地质模型。同时,其对浅表层流体逃逸的清晰成像,也为水合物分解研究、海底地质环境研究与灾害预测提供了高精度的地球物理基

础数据支撑。

参考文献 (References)

- [1] 栾锡武, 赵克斌, 孙冬胜, 等. 海域天然气水合物勘测的地球物理方法 [J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 210-219. [LUAN Xiwu, ZHAO Kebin, SUN Dongsheng, et al. Geophysical methods for marine gas hydrates exploration[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(1): 210-219.]
- [2] 周大森, 杨册, 曾宪军, 等. 高精度小三维地震采集技术在深水天然气水合物勘探中的应用 [J]. 地质学报, 2024, 98(9): 2678-2685. [ZHOU Dasen, YANG Ce, ZENG Xianjun, et al. Application of high-precision small 3D seismic acquisition technology in deep water gas hydrate exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(9): 2678-2685.]
- [3] 魏峥嵘, 裴彦良, 刘保华. 深拖式多道高分辨率地震探测系统在南海首次应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(5): 965-972. [WEI Zhengrong, PEI Yanliang, LIU Baohua. The first application of a deep tow multi-channel high-resolution seismic detection system in the South China Sea[J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2020, 55(5): 965-972.]
- [4] 王祥春, 马文秀, 黄天蔚, 等. OBS 技术在南海天然气水合物勘探中的应用 [J]. 石油物探, 2021, 60(1): 105-113. [WANG Xiangchun, MA Wenxiu, HUANG Tianwei, et al. Application of an ocean bottom seismometer for gas hydrate exploration in the South China Sea[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(1): 105-113.]
- [5] 李绪宣, 王建华, 张金淼, 等. 南海深水地震资料采集设计和处理关键技术及其野外试验效果 [J]. 中国海上油气, 2013, 25(6): 8-14. [LI Xuxuan, WANG Jianhua, ZHANG Jinmiao, et al. Some seismic acquisition designs and key processing techniques and their testing effects in the deep water areas, South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(6): 8-14.]
- [6] 邓桂林, 丁龙翔, 李福元, 等. 海洋长排列单源单缆三维窄方位地震资料处理技术 [J]. 物探与化探, 2019, 43(4): 828-834. [DENG Guilin, DING Longxiang, LI Fuyuan, et al. The processing technology of narrow azimuth Quasi three-dimensional seismic data acquisition by single source and single long streamer system in marine seismic exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(4): 828-834.]
- [7] 邢磊. 海洋小多道地震高精度探测关键技术研究 [D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2012. [XING Lei. Study of the key technologies of high-precision marine multichannel seismic survey[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2012.]
- [8] 骆迪, 蔡峰, 吴志强, 等. 海洋短排列高分辨率多道地震高精度成像关键技术 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(2): 730-742. [LUO Di, CAI Feng, WU Zhiqiang, et al. The key technologies of marine small scale high resolution multichannel seismic high-precision imaging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(2): 730-742.]
- [9] 王威, 徐华源, 孙波, 等. 高分辨率多道地震勘探技术在南海天然气水合物调查中的应用 [J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(9): 19-24. [WANG Wei, XU Huayuan, SUN Bo, et al. Application of high resolution multichannel seismic survey technique to the investigation of natural gas hydrate resources in the south china sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(9): 19-24.]
- [10] 裴彦良, 刘保华, 连艳红, 等. 海洋高分辨率多道数字地震拖缆技术研究与应 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3280-3286. [PEI Yanliang, LIU Baohua, LIAN Yanhong, et al. Marine high resolution multi-channel digital seismic streamer and its application in the ocean engineering[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 3280-3286.]
- [11] 王秀娟, 韩磊, 刘俊州, 等. 天然气水合物与游离气共存的地球物理特征与识别 [J/OL]. 地学前缘, 2024: 1-22. [4-12-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3370.P.20240417.1503.010.html>. [WANG Xiujuan, HAN Lei, LIU Junzhou, et al. The geophysical characteristics and identification of the coexistence of gas hydrate and free gas[J]. Earth Science Frontiers, 2024: 1-22. [2024-12-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3370.P.20240417.1503.010.html>.]
- [12] 文鹏飞, 刘斌, 徐云霞, 等. 面向海域水合物精细刻画的地震勘探技术: 耙缆式地震勘探 [J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 2215-2221. [WEN Pengfei, LIU Bin, XU Yunxia, et al. Novel seismic exploration technique targeting fine characterization of marine gas hydrates: seismic exploration with a harrow-like acquisition geometry[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 2215-2221.]
- [13] Otsuka H, Morita S, Tanahashi M, et al. Foldback reflectors near methane hydrate bottom-simulating reflectors: indicators of gas distribution from 3D seismic images in the eastern Nankai Trough[J]. *Island Arc*, 2015, 24(2): 145-158.
- [14] 张光学, 张明, 杨胜雄, 等. 海洋天然气水合物地震检测技术及其应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(4): 51-58. [ZHANG Guangxue, ZHANG Ming, YANG Shengxiong, et al. Application of seismic detecting technique to marine gas hydrate survey[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(4): 51-58.]
- [15] 颜中辉, 杨传胜, 王小杰, 等. 海洋低信噪比小道距地震处理关键技术 [J]. 海洋科学进展, 2024, 42(3): 501-514. [YAN Zhonghui, YANG Chuansheng, WANG Xiaojie, et al. The key technology of marine low SNR seismic data processing for small group interval[J]. Advances in Marine Science, 2024, 42(3): 501-514.]
- [16] 褚宏宪, 孙运宝, 秦轲, 等. 小道距高分辨率多道地震对天然气水合物勘查的适用性 [J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(6): 50-54. [CHU Hongxian, SUN Yunbao, QIN Ke, et al. Application of small-scale array high-resolution multi-channel seismic to gas hydrates exploration[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(6): 50-54.]
- [17] Haines S S, Hart P E, Collett T S, et al. High-resolution seismic characterization of the gas and gas hydrate system at Green Canyon 955, Gulf of Mexico, USA[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 82: 220-237.
- [18] 刘鹏奇. 基于地震波频散特征的天然气水合物识别方法研究 [D]. 中国石油大学 (北京) 博士学位论文, 2022. [LIU Pengqi. Research on gas hydrate identification method based on seismic wave dispersion characteristics[D]. Doctor Dissertation of China University of Petroleum (Beijing), 2022.]
- [19] 徐华宁, 陆敬安, 梁金强. 珠江口盆地东部海域近海底天然气水合物地震识别及地质成因 [J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 57-65. [XU Huanning, LU Jing'an, LIANG Jinqiang. Seismic identification and geologic-

- al origin of gas hydrate in near seafloor sediments in the eastern part of the Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 57-65.]
- [20] 王秀娟, 吴时国, 董冬冬, 等. 琼东南盆地块体搬运体系对天然气水合物形成的控制作用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(1): 109-118. [WANG Xiujuan, WU Shiguo, DONG Dongdong, et al. Control of mass transport deposits over the occurrence of gas hydrate in Qiongdongnan basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(1): 109-118.]
- [21] 王伟巍, 伍忠良, 龚跃华, 等. 地震属性在海洋天然气水合物识别中的应用[J]. *海洋技术学报*, 2020, 39(3): 75-81. [WANG Weiwei, WU Zhongliang, GONG Yuehua, et al. Application of seismic attributes in the identification of marine gas-hydrate[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2020, 39(3): 75-81.]
- [22] 杨睿, 霍元媛, 陈江欣, 等. 利用相干属性技术实现参量阵浅地层剖面上的水合物识别[J]. *地质论评*, 2020, 66(S1): 87-89. [YANG Rui, HUO Yuanyuan, CHEN Jiangxin, et al. Gas hydrate identification of parametric array sub-bottom profile by coherence attribute analysis[J]. *Geological Review*, 2020, 66(S1): 87-89.]
- [23] Liu Y J, Liu X X, Liu D M, et al. Applications of seismic techniques to gas hydrates prediction[J]. *Applied Geophysics*, 2008, 5(1): 67-73.].
- [24] 王兆湖, 王建民, 高振山, 等. 叠前自适应 F-X 域相干噪声衰减技术及应用[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(5): 2605-2610. [WANG Zhaohu, WANG Jianmin, GAO Zhenshan, et al. Pre-stack self-adapting F-X domain coherent noise attenuation technique and application[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(5): 2605-2610.]
- [25] Hennenfent G, Fenelon L, Herrmann F J. Nonequispaced curvelet transform for seismic data reconstruction: a sparsity-promoting approach[J]. *Geophysics*, 2010, 75(6): WB203-WB210.
- [26] 杨凯, 刘伟, 潘永. 基于曲波域的软硬阈值折中地震信号去噪[J]. *工程地球物理学报*, 2013, 10(4): 437-441. [YANG Kai, LIU Wei, PAN Yong. Random noise attenuation based on soft and hard threshold compromise in curvelet domain[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2013, 10(4): 437-441.]
- [27] 王小杰, 颜中辉, 刘俊, 等. 基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5): 221-230. [WANG Xiaojie, YAN Zhonghui, LIU Jun, et al. Generalized free surface multiple suppression technique based on model optimization and its application to the deep water of the Indian Ocean[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(5): 221-230.]
- [28] 颜中辉, 王小杰, 徐华宁, 等. 基于虚反射走时和道集相干联合的电缆等浮校正方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2023, 58(6): 1365-1373. [YAN Zhonghui, WANG Xiaojie, XU Huaning, et al. Method of cable floating correction based on combination of gather coherence and ghost reflection traveltimes[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2023, 58(6): 1365-1373.]
- [29] 张汛汛, 张繁昌, 刘汉卿. 基于快速匹配追踪算法的地震道集剩余时差校正[J]. *石油物探*, 2015, 54(4): 420-426. [ZHANG Xunxun, ZHANG Fanchang, LIU Hanqing. Seismic gathers residual moveout correction based on fast matching pursuit algorithm[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2015, 54(4): 420-426.]
- [30] 周鹏, 张益明, 刘志斌, 等. 地震道集优化方法及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(2): 232-237. [ZHOU Peng, ZHANG Yiming, LIU Zhibin, et al. Seismic gather optimization[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(2): 232-237.]
- [31] 王冲, 顾汉明, 许自强, 等. 最小二乘反演迭代算法在压制海上变深度缆采集数据虚反射中的应用[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(5): 1790-1803. [WANG Chong, GU Hanming, XU Ziqiang, et al. The application of least-squares inversion iteration algorithm to deghost for marine variable-depth streamer data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(5): 1790-1803.]
- [32] Fang Z Y, Shi W Y, Zhang X Y, et al. Complex sea-surface condition deghosting technology of towed streamer data[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2017, 14(5): 1061-1071.
- [33] 董政, 李黎, 徐超, 等. 海上虚反射频率域自适应压制技术及应用: 以珠江口盆地陆丰 A 油田为例[J]. *中外能源*, 2023, 28(6): 59-64. [DONG Zheng, LI Li, XU Chao, et al. Adaptive suppression technology for offshore ghosting frequency domain and its application: a case study of Lufeng a oilfield in pearl river mouth basin[J]. *Sino-Global Energy*, 2023, 28(6): 59-64.]