



电火花震源高分辨率地震勘探技术及其在海域天然气水合物识别中的应用

骆 迪, 蔡 峰, 闫桂京, 李 清, 孙运宝, 董 刚, 李 昂

High-resolution seismic exploration technology with spark source and its application in identification of natural gas hydrates in marine areas

LUO Di, CAI Feng, YAN Guijing, LI Qing, SUN Yunbao, DONG Gang, and LI Ang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024091301>

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

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

天然气水合物微观测试技术与应用进展

Advances in microscopic testing techniques and applications for natural gas hydrates

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(3): 136-148

波形反演在天然气水合物中的应用研究进展

Application of full waveform inversion to gas hydrate research

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 207-221

非线性层析技术在琼东南天然气水合物成像中的应用

Application of non-linear tomography technology to gas hydrate imaging in the Qiongdongnan area

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 206-213

海洋沉积物微量元素地球化学特征对天然气水合物勘探的指示意义

Trace elements geochemistry of marine sediments and its implications for gas hydrate exploration

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 111-122



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

骆迪, 蔡峰, 闫桂京, 等. 电火花震源高分辨率地震勘探技术及其在海域天然气水合物识别中的应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(6): 34-45.

LUO Di, CAI Feng, YAN Guijing, et al. High-resolution seismic exploration technology with spark source and its application in identification of natural gas hydrates in marine areas[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(6): 34-45.

电火花震源高分辨率地震勘探技术及其在海域天然气水合物识别中的应用

骆迪^{1,2}, 蔡峰^{1,2}, 闫桂京^{1,2}, 李清^{1,2}, 孙运宝^{1,2}, 董刚^{1,2}, 李昂^{1,2}

1. 青岛海洋地质研究所自然资源部天然气水合物重点实验室, 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: 精准识别天然气水合物对于保障国家能源安全、优化能源结构和环境保护等方面都具有重要的战略意义。地震勘探技术是水合物勘查的重要手段, 但海域多道地震勘探多采用气枪震源, 震源主频较低, 导致地震波的分辨率有限, 限制了其在探测浅表层或细微地质结构中的能力。随着水合物勘查精度和难度日益增长, 采用气枪震源的地震勘探技术已无法满足精细刻画水合物矿体的需要。因此, 提高地震勘探技术的分辨率对于水合物勘查而言至关重要。本文介绍了一种基于电火花震源的小道距高分辨率地震探测技术, 通过与气枪震源的对比分析, 深入探讨了电火花震源的特点及其在海域水合物勘查中的应用, 研究结果表明, 电火花震源地震勘探技术在扩散型水合物和浅表层渗漏型水合物识别中都具有良好的应用效果, 尤其是对于浅表层渗漏型水合物, 电火花震源地震可以更好地识别出海底和浅部地层的振幅异常、流体运移通道和海底微地貌, 可有效提高浅表层渗漏型水合物识别的可靠性。

关键词: 高分辨率地震; 电火花震源; 天然气水合物; 地震属性

中图分类号: P631.4; P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024091301

High-resolution seismic exploration technology with spark source and its application in identification of natural gas hydrates in marine areas

LUO Di^{1,2}, CAI Feng^{1,2}, YAN Guijing^{1,2}, LI Qing^{1,2}, SUN Yunbao^{1,2}, DONG Gang^{1,2}, LI Ang^{1,2}

1. The Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266237, China

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

Abstract: Accurate identification of natural gas hydrates is of great strategic importance for ensuring national energy security, optimizing energy structures, and protecting the environment. Seismic exploration technology is a crucial means for hydrate exploration. However, most multi-channel seismic explorations in marine areas use airgun sources with relatively low dominant frequencies, resulting in limited resolution of seismic waves, which limits its ability to detect shallow surface layers or subtle geological structures. With the increasing in demand for accuracy and the difficulty of hydrate exploration, seismic exploration technology using airgun sources can no longer meet the needs of fine characterization of hydrate ore bodies. Therefore, improving the resolution of seismic exploration technology is crucial for hydrate exploration. This paper introduces a high-resolution seismic detection technology based on small-offset electric sparker sources. Through comparative analysis with airgun sources, the characteristics of electric sparker sources and their application in marine hydrate exploration are deeply discussed. Results show that high-resolution seismic exploration technology using electric sparker sources has good application effects in identifying both diffused hydrates and shallow leakage hydrates. Especially for shallow leakage hydrates, using electric sparker source seismology can better identify amplitude anomalies, fluid migration pathways, and subtle seabed morphologies in the seabed and shallow strata, which can improve effectively the reliability of identifying shallow gas hydrate.

Key words: high-resolution seismology; sparker source; gas hydrate; seismic attribute

资助项目: 国家自然科学基金“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), “马克兰增生楔低角度俯冲区断层‘接力’过程及其对水合物成藏的控制”(42076069)

作者简介: 骆迪(1982—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事海洋综合地球物理及天然气水合物研究, E-mail: luodi0927@sina.com

通讯作者: 蔡峰(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事资源评价及油气地质研究, E-mail: caifeng@cgs.cn

收稿日期: 2024-09-13; 改回日期: 2024-11-22. 张现荣编辑

天然气水合物(以下简称水合物)是由水分子和气体分子组成的结晶化合物,通常赋存于海底或永久冻土等低温、高压环境中,是一种清洁能源,具有储量大、分布范围广的特点。精准识别水合物藏对于保障国家能源安全、优化能源结构、推动技术创新、带动相关产业发展、提升国际竞争力以及促进科学研究和环境保护等方面都具有重要的战略意义。

地震勘探技术在水合物勘查中发挥了重要作用^[1-5],通过识别地震剖面中的似海底反射(Bottom Simulating Reflector, BSR)^[2, 6-10]、空白带、振幅异常、速度异常^[10-12]和地震属性异常^[13-15]等特征有效识别水合物。但海域水合物通常赋存于海底浅层疏松沉积物中,埋深一般小于 1 000 m,因此对浅层分辨率具有较高的要求。浅地层剖面测量技术分辨率可达到约 1 m,但勘探深度有限,通常小于 100 m,单道地震测量技术虽然能覆盖更深的勘探深度,但是由于缺少覆盖,信噪比较低且无法获取地震速度信息,限制了在海域水合物识别中的应用。而多道地震勘探技术探测深度大、资料信噪比高,是水合物识别的重要手段,但海域多道地震勘探技术多采用气枪震源,这种震源能量大、频率低、激发间隔大,对于海底以下千米级深度的目的层具有较好的探测效果,但震源主频较低,导致地震波的分辨率有限,通常只有 5~10 m,这限制了其在探测浅表层或细微地质结构中的能力,难以精准识别水合物的分布和内部形态,尤其是对于埋深一般小于 60 m 的浅表层水合物,采用气枪震源的地震勘探技术无法满足要求,难以满足精细刻画水合物矿体的需求。

电火花震源是将电能转化为声能的一种装置,是最早应用于海洋地震勘探的非炸药震源^[16],通过电容器储存大量能量并在极短时间内瞬间放电,形成强大电脉冲导致海水汽化而产生巨大的冲击波,从而激发地震波。具有主频高、频带宽、浅层分辨率高的特点,垂向分辨率可达 1~2 m,且穿透深度可达海底以下数百米至数千米。电火花震源的发展起源于 20 世纪 50—60 年代,经历了从初步研发到广泛应用的发展历程。1957 年,阿尔卑斯地球物理公司生产了世界第一台电火花震源系统^[17],随着海洋勘探难度的增加和勘探精度需求的提高,电火花震源海洋地震勘探领域研究的热点,法国 SIG 公司从 1967 年研制海上电火花震源,其生产的大功率深水震源,稳定性好,安全性高,功率范围 250~10 000 J,频率范围为 50~2 000 Hz,适用于深水勘探,具有较高的分辨率和较大的穿透深度。荷兰 GEO 公司研制的 Geo-Sparker 深海多电极电火花发射阵列系统

专为水深而设计,探测深度 2~4 500 m,垂直分辨率可达 30 cm,广泛应用于海洋地形调查等方面。国内,自 20 世纪 70 年代开始,中国科学院电工研究所开始研发电火花震源,并取得了一系列研究成果^[18-19],2000 年,中国利用电火花震源在渤海、黄海、东海和南海海域采集了近十万公里地震资料^[20]。2004 年,国家海洋局第一海洋研究所研发了智能控制复合相干电火花震源装置,有效增强了地震勘探的分辨率^[21]。中国科学院电工研究所与广州海洋地质调查局联合自主研发了海鳗 20 KJ 电火花震源系统,于 2009 年在南海北部 1 200~2 500 m 水深的海域开展了搭载试验并取得了成功。自 2011 年以来,中国海洋大学海洋地震探测团队通过对等离子体震源放电机理的研究,首次利用比理想气体状态方程精度更高的昂尼斯方程表征电火花震源激发产生的气泡的状态,研发了穿透深度大、频带宽(3~1 200 Hz)、激发间隔短的宽高频大能量(50 000 J)等离子体电火花震源,大幅度提高了海底以下 50~1 000 m 深度范围内地震探测精度,解决了海底高精度成像的震源需求难题^[16, 22]。目前,电火花震源已成功地应用于海底浅部地层的调查研究^[22-25],本文通过与气枪震源的对比分析,深入探讨了电火花震源高分辨率地震探测技术的特点及其在海域水合物勘查中的应用。

1 电火花震源高分辨率地震勘探技术

1.1 地震勘探分辨率的影响因素

地震分辨率是地震勘探中的一个重要概念,是指地震记录能够反映地质体的最小尺寸,分为纵向分辨率和横向分辨率,分别代表了地震勘探在垂直方向和水平方向上的分辨能力。在地震勘探中,通常认为最大的纵向分辨率约为地震波波长的 1/4,这意味着,当地层厚度小于地震波波长的 1/4 时,地震勘探可能无法准确分辨出地层的顶底反射。

地震分辨率受多种因素的影响,主要包括震源子波、地质体埋藏深度、信噪比以及观测系统参数等,具体如下:

(1) 震源子波特性

震源子波的主频、频带宽度、延续时间长度以及相位都对地震分辨率有影响,其中子波的主频和频带宽度是关键因素,频率越高,地震波的波长越短,对地下小尺度的地质体变化更为敏感,因此分辨率也越高,同时频带越宽,地震波包含的频率成

分越丰富,能够更精确地反映地下地质体的特征,从而提高分辨率。因此,想要提高地震分辨率,就要提高主频,拓宽子波有效频带宽度。波形特性会影响地震波的反射和透射特性,进而影响分辨率,零相位子波通常具有最高的分辨率,因此,在地震处理过程中通常通过子波处理,把最小相位子波转换为零相位子波,从而提高地震分辨率。

(2)信噪比

信噪比是信号与噪声的比值,高信噪比意味着地震记录中的有效信号更为突出,噪声干扰较小,信噪比越高,地震分辨率越接近无噪声情况下的分辨率,分辨率越高。信噪比受多种因素影响,包括观测系统、环境噪声水平和数据处理方法等。

(3)观测系统参数

观测系统参数包括炮检距、道间距和电缆沉放深度等,都是影响地震分辨率的因素。炮检距是指震源点到接收点之间的距离,炮检距过大会导致地震波传播路径复杂化,增加高频信号的衰减,从而影响分辨率,因此,在采集过程中,采用小排列施工,适当减小炮检距可有效提高地震分辨率。道间距是各道之间检波点的间距,较小的道间距可以增加覆盖次数,从而增加地震资料的信噪比和分辨率。虚反射是影响地震分辨率的一个重要因素,震源和电缆的沉放深度越浅,虚反射陷波的频率越高,因此,将震源和电缆尽可能地接近水面,可有效减少虚反射陷波对地震分辨率的影响。

(4)地下岩石的弹性性质和地质体埋深

地下岩石的弹性性质(如速度、密度等)会影响地震波的传播速度和波形,进而影响分辨率。不同性质的岩石对地震波的响应不同,因此需要通过地质调查和测井资料等手段了解地下岩石的弹性性质以提高分辨率。地质体埋藏深度越深,地震波在传播过程中受到的吸收、散射等衰减作用越明显,导致信号减弱、分辨率降低。

在上述地震分辨率的影响因素中,震源主频是最主要的影响因素,在地震勘探中,选择合适的主频对于提高分辨率至关重要,高频地震波虽然能够提供更高的分辨率,但也会受到传播介质衰减和噪声干扰等因素的影响,导致信号减弱和信噪比降低。因此,在实际应用中需要根据勘探目标和地质条件等因素综合考虑,选择合适的主频和观测系统,从而提高地震勘探分辨率。

1.2 电火花震源的特点

电火花震源利用电容器储存大量的能量,并在

极短的时间内通过专用的放电电极瞬间放电,形成强大的电脉冲,导致周围的海水迅速电离,生成高温等离子区,使海水迅速汽化,形成高温高压气团。随后,气团在高压驱动下膨胀,形成气泡,并向外辐射压力波,从而激发地震波。因此,电火花震源是一种非炸药地震勘探震源,其特点主要包括以下 4 个方面:

(1)安全性与环保性高

电火花震源不使用炸药,因此在操作过程中不会产生爆炸性危险,对人员和环境的安全性更高。同时,其操作过程对环境的影响小,符合现代绿色环保的勘探理念。

(2)地震分辨率高

电火花震源具有较高的主频,一般可达数百至上千赫兹不等,具有较高的浅层分辨率^[23],大容量的电火花震源可以在保证较大地层穿透深度的同时提高勘探分辨率,能够实现在海水深度大于 1 000 m 的海域穿透超过 1 000 m 厚度的地层,且垂向分辨率达到 1~2 m^[24,26],对于聚焦浅层分辨率的水合物勘探而言具有显著优势。

(3)施工灵活,适用范围广

电火花震源体积较小,施工灵活,适合陆地和海域等复杂的野外条件,可根据具体勘探需求进行调整,适用范围广,并且激发间隔可以根据实际需要进行定制,既适合走航式探测也适合定点放炮应用,提高了勘探的灵活性和效率。

(4)成本低

与炸药震源相比,电火花震源在设备购置、维护和使用成本方面成本相对较低,经济成本低。

1.3 电火花震源与气枪震源对比分析

为了深入评估电火花震源与气枪震源在地震勘探中的差异,我们对同一条测线进行了不同采集方式的对比实验,分别从频谱分析、激发能量、噪声等方面综合分析了电火花震源的优缺点。

(1)子波对比分析

从子波频谱分析图(图 1)可以看出,电火花震源主频高、频带宽,而气枪震源主频相对较低,频带相对较窄,二者频率差异较大。气枪震源资料的频带分布在 25~150 Hz,电火花震源资料频带分布在 60~400 Hz。从低通滤波扫描(图 2)和高通滤波扫描(图 3)对比来看,电火花资料主要能量分布在 90~400 Hz,气枪震源资料主要能量分布在 20~120 Hz。由叠加剖面可以看出,电火花震源资料具有更高的分辨率,可以清晰地反映浅部地层内部的变化。

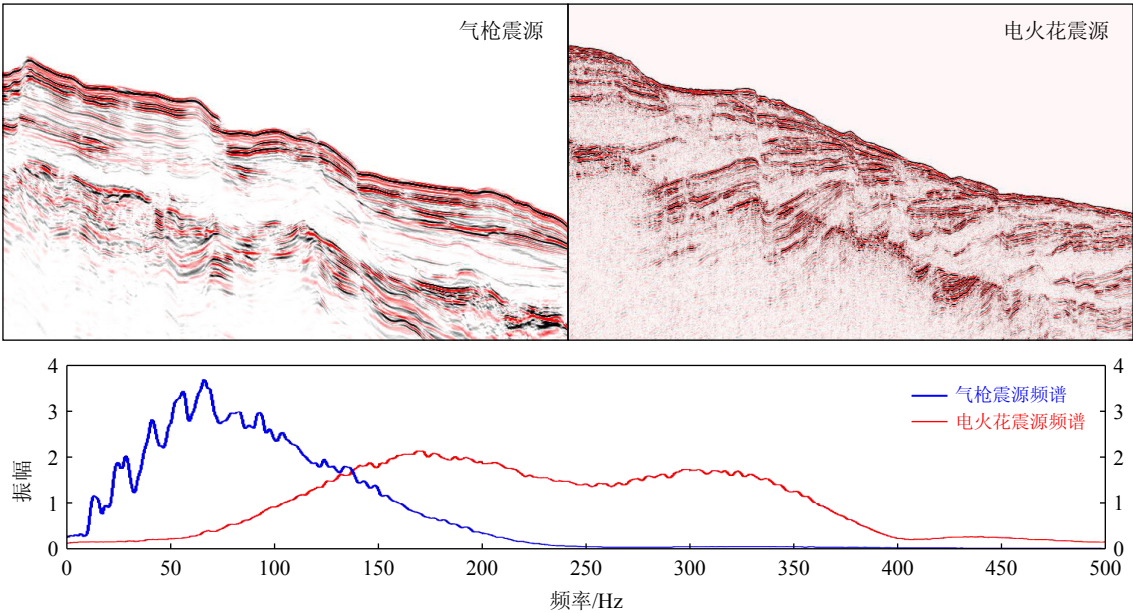


图 1 气枪震源与电火花震源叠加剖面及对应频谱^[27]

Fig.1 Stacked profiles and corresponding frequency spectra of airgun and sparker sources

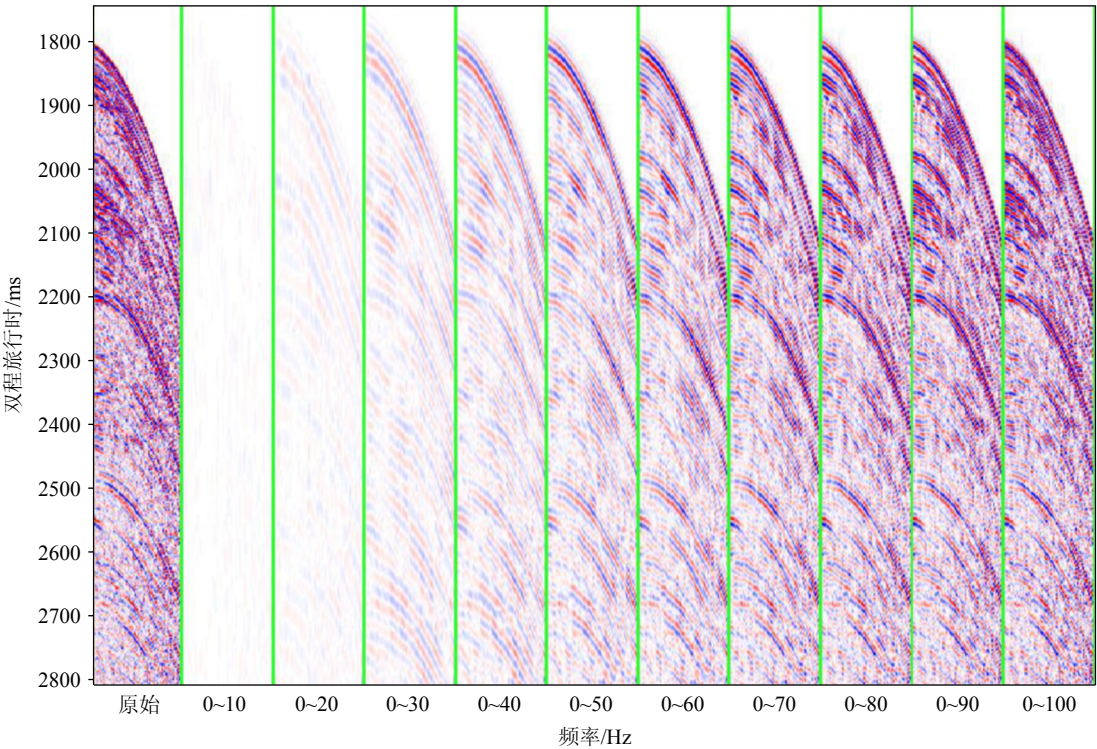


图 2 电火花震源单炮低通滤波扫描

Fig.2 Single-shot low-pass filter scanning of sparker source

(2) 激发能量对比分析

通过对单炮进行定量分析, 评价两类资料的能量差异。图 4 是气枪震源及电火花震源的单炮及对应时窗内的均方根振幅值, 气枪震源背景噪音的均方根振幅是 0.0018, 接收到有效信号后均方根振幅是 0.426, 而电火花震源的背景噪音是 0.122, 接收到有效信号后的均方根振幅是 0.498, 由接收到有效

信号前后的能量变化强度计算, 气枪震源的能量约为电火花震源的 59 倍。

(3) 噪声特点分析

由原始资料来看, 气枪震源资料的噪音少、信噪比高, 局部存在大船干扰、低频干扰和少量异常振幅干扰等, 而电火花震源噪声相对复杂, 可见明显的线性噪音、有源干扰等噪声, 能量相对较强, 部

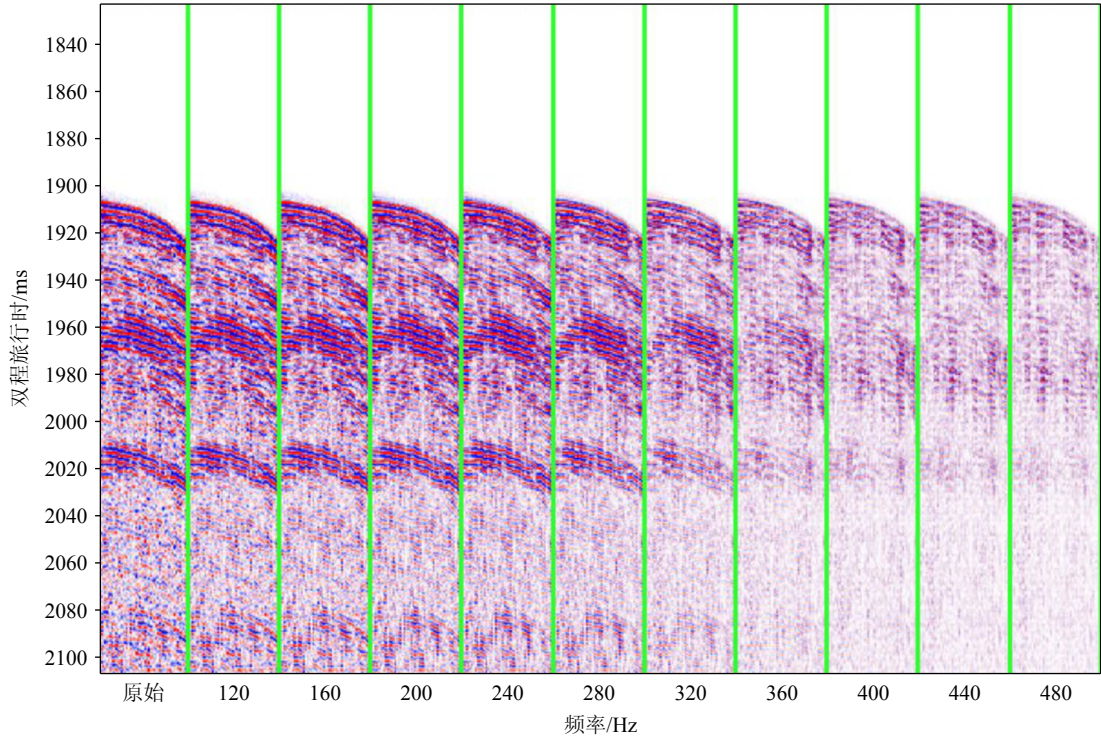


图 3 电火花震源单炮高通滤波扫描
Fig.3 Single-shot high-pass filter scanning of sparker source

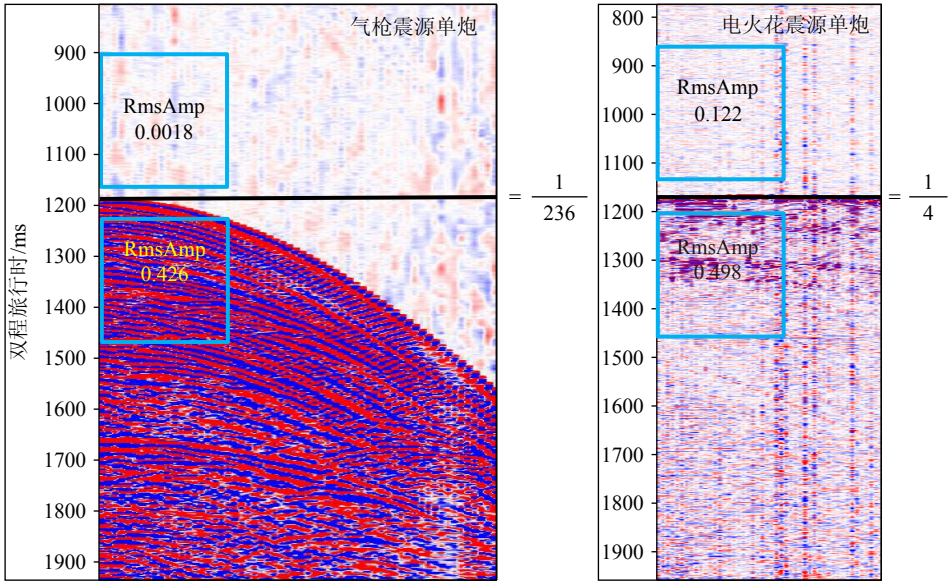


图 4 气枪震源与电火花震源单炮振幅能量对比
Fig.4 Comparison in amplitude energy between airgun and sparker sources

分噪音能量超过有效反射信号能量,资料信噪比较低,且多次波和虚反射发育。由于频率高、信噪比低,多次波压制的难度较大,因此做好叠前去噪、提高资料信噪比,是电火花震源资料处理的关键。

综上所述,电火花震源地震资料与气枪震源相比,具有频带宽、主频高、地层分辨率高的特点,但是激发能量较低,资料信噪比较低,噪声发育,因此

在处理过程中需要针对资料特点,采用针对性的处理技术,提高地震资料的信噪比和分辨率至关重要^[28]。

1.4 小道距高分辨率地震采集技术

如前所述,除震源以外,炮检距、道间距和电缆沉放深度等观测系统参数也是影响地震分辨率的因素,因此,本文采用小道距高分辨率地震观测系

统,炮间距 12.5 m,道间距 6.25 m,48 道采集(图 5)。震源采用法国 SIG 生产的 6 000 J 电火花震源,可穿透海底以下 500 m 沉积层,满足水合物勘查的需要。

虚反射陷波频率 f_n 的计算公式为: $f_n = V/2h$, 其中, V 为地震波在水中的传播速度,一般为 1 500 m/s, h 为震源或电缆的沉放深度,本文设置沉放深度为 2 m,可有效保护 380 Hz 以内的频率信息。

由于小道距地震采集系统电缆较短,无需在尾部加水鸟以保持其姿态和深度,因此与长排列地震采集系统相比,小道距地震采集系统可以获得原始信噪比更高的地震数据。

2 电火花震源高分辨率地震勘探技术在水合物勘查中的应用

2.1 水合物高分辨率地震响应特征数值模拟

电火花震源主频高、频带宽,与采用气枪震源的地震采集技术对水合物的响应特征具有明显差异,因此,建立水合物赋存的地质模型,设置与实际地震采集相同的观测系统,开展数值模拟,从而研究水合物储集层的地震响应特征,可有效减少水合物识别的多解性。

含水合物沉积层具有速度高、密度低的特点,与饱水沉积层物性存在明显差异。设计含水合物沉积层层状模型,如图 6 所示。该模型为水合物赋存在地层中的理想状态,即水合物与下覆游离气同时存在,含水合物沉积层厚度为 150 m,其下伏含游离气沉积层厚度为 50 m,假设含水合物沉积层和含游离气沉积层孔隙度均为 40%,水合物和游离气饱

和度分别为 20% 和 5%。建立小道距地震观测系统:炮间距 12.5 m,道间距 6.25 m,采样率 0.5 ms,分别采用 50 Hz 和 200 Hz 主频雷克子波模拟气枪震源和电火花震源。由模拟结果对比图(图 7)可见,200 Hz 主频的模拟结果分辨率较高,对于较薄的含游离气沉积层具有较好的分辨能力,BSR 与含游离气沉积层底界面分别表现为一个强反射界面,且虽然波组较多,但 BSR 仍然具有与海底反极性的特点。而 50 Hz 主频的模拟结果表明,在主频较低的情况下,地震分辨率较差,BSR 与含游离气沉积层底界面合为一组强振幅界面,难以区分两个界面。

数值模拟结果表明,在电火花震源高分辨率地震中,BSR 具有强振幅、空白带、与海底平行、与海底反射波极性相反等特征,与以气枪为震源的地震响应特征相似,但区别在于在以气枪为震源的地震资料中,BSR 通常表现为一套强振幅波组,波峰波谷易于追踪,有利于识别 BSR 与海底极性相反的特征,而在电火花震源高分辨率地震中,BSR 表现为多套强振幅波组,难以追踪每套波组的波峰和波谷,因此,在实际资料中不能严格按照极性相反的特点来识别 BSR。

2.2 扩散型水合物预测

扩散型水合物的典型识别标志是 BSR,电火花震源高分辨率地震勘探技术,由于具有较高的浅层分辨率,可以更好地反映出 BSR 的特征。图 8 为过 BSR 的高分辨率地震剖面,由图可见,BSR 在高分辨率地震剖面中能量强,极性特征清晰,可明显看出与海底平行且极性相反的特征,上方发育较厚的振幅空白带。但是,BSR 的解释具有较强的多解

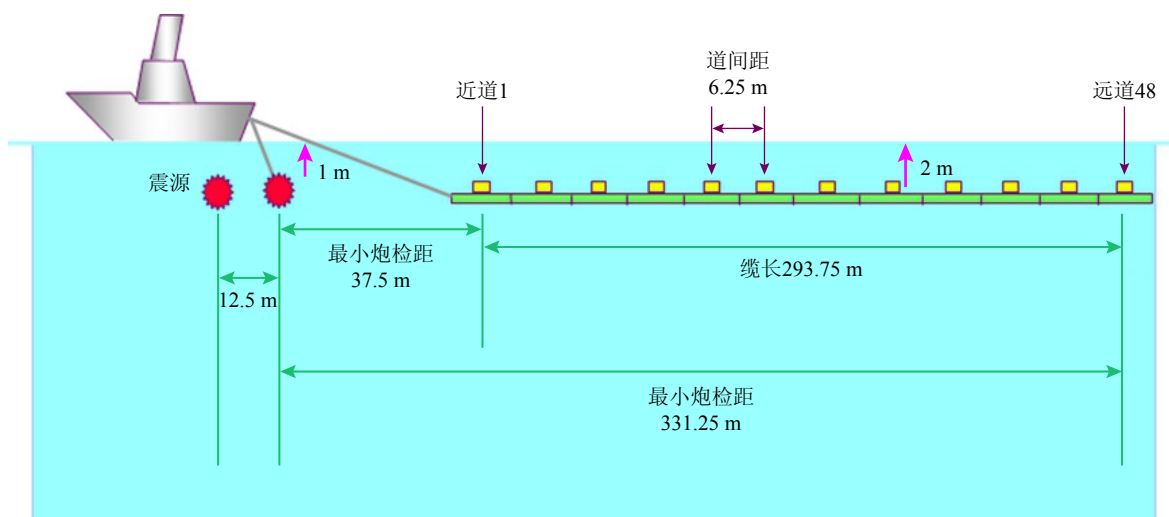


图 5 小道距高分辨率地震采集观测系统示意图

Fig.5 The observation system of small-scale high-resolution seismic acquisition

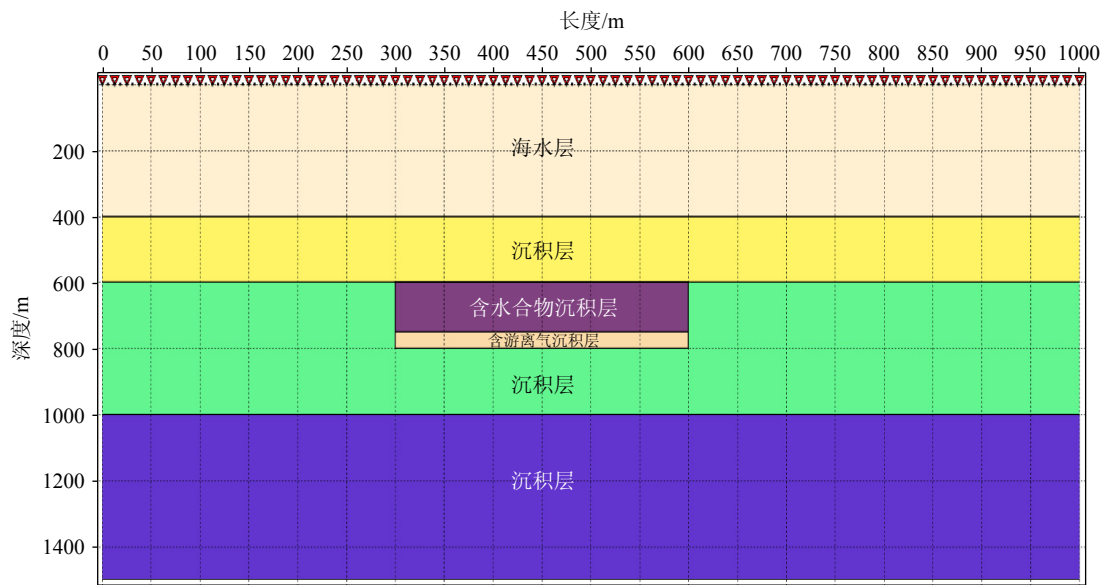


图 6 含水合物沉积层模型
Fig.6 Model of hydrate-bearing sediment layer

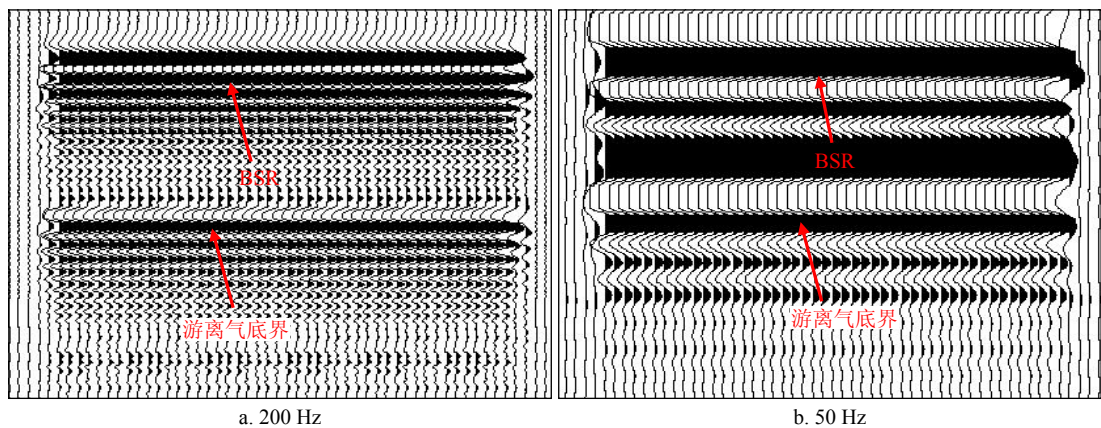


图 7 气枪震源和电火花震源数值模拟结果对比
Fig.7 Comparison of numerical simulation results between airgun and sparker sources

性,而且数值模拟结果表明,含水合物沉积层下覆的游离气也表现为强振幅异常反射,与BSR特征相似,为精准识别水合物带来困扰,因此,需要结合地震属性分析,通过地震属性综合分析可以提高水合物识别的可靠性,有效预测扩散型水合物富集区分布。通过对比分析,优选了一组对水合物及其伴生游离气敏感的地震属性,包括振幅类属性、频率类属性、相位属性、波形相似性和吸收衰减属性等。

(1)振幅类属性

振幅类属性包括瞬时振幅、均方根振幅和甜点属性(图9a)等,对强反射振幅异常具有较好的响应,能够较好地反映BSR特征。能量半衰时属性计算给定时窗内,振幅能量达到一半的相对时间位置,测定时窗内能量变化的速度,对含游离气等孔隙度有明显变化的地层比较有效。能量半衰时属

性通过计算给定时窗内振幅能量达到一半的相对时间位置,从而预测时窗内能量变化的速度,对含游离气等孔隙度有明显变化的地层具有较好的响应,可有效识别游离气(图9b)。

(2)频率类属性

地震波频率是反映油气的一个重要标志。由于地层的吸收作用,地震波的频谱随传播距离的增加,高频成分逐渐吸收,低频成分相对丰富,沉积层孔隙度中充填了流体或气体,这会增大地层的衰减系数,因此当地震波通过含油气沉积层后,增大地震波的高频成分的衰减,从而使地震波主频降低。由于游离气和水合物常常赋存在一起,当地震波穿过含游离气沉积层时,频率会发生明显衰减,而在未固结沉积物中,当孔隙度被水合物充填,会提高地震波的频率,因此,频率属性是识别水合物的一

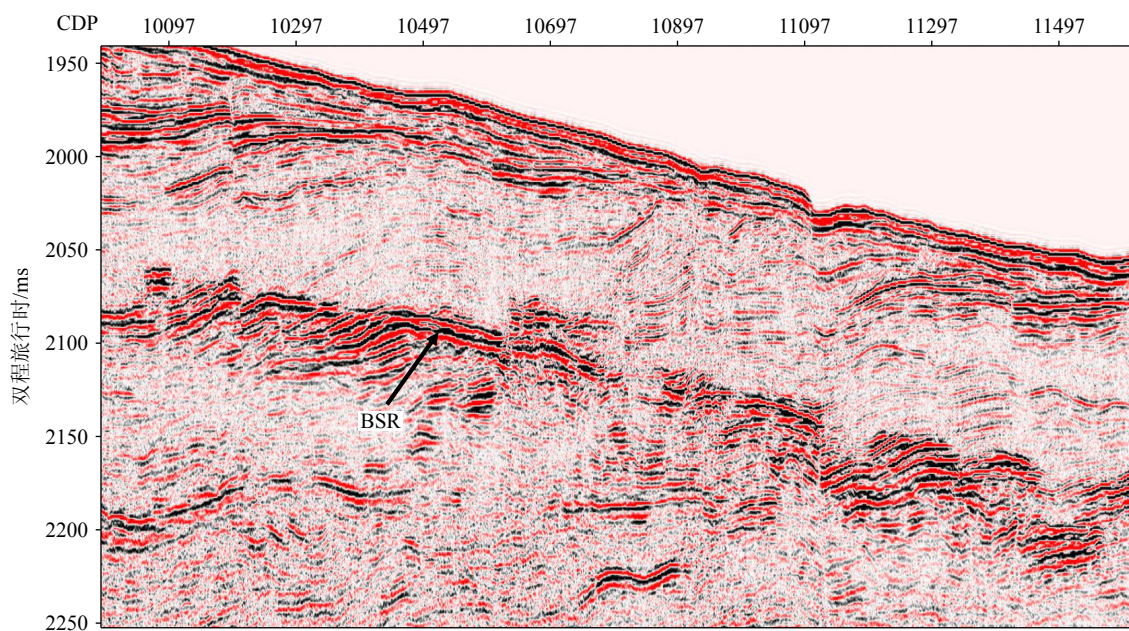


图 8 过扩散型水合物的地震剖面
Fig.8 Seismic profile of diffused gas hydrate

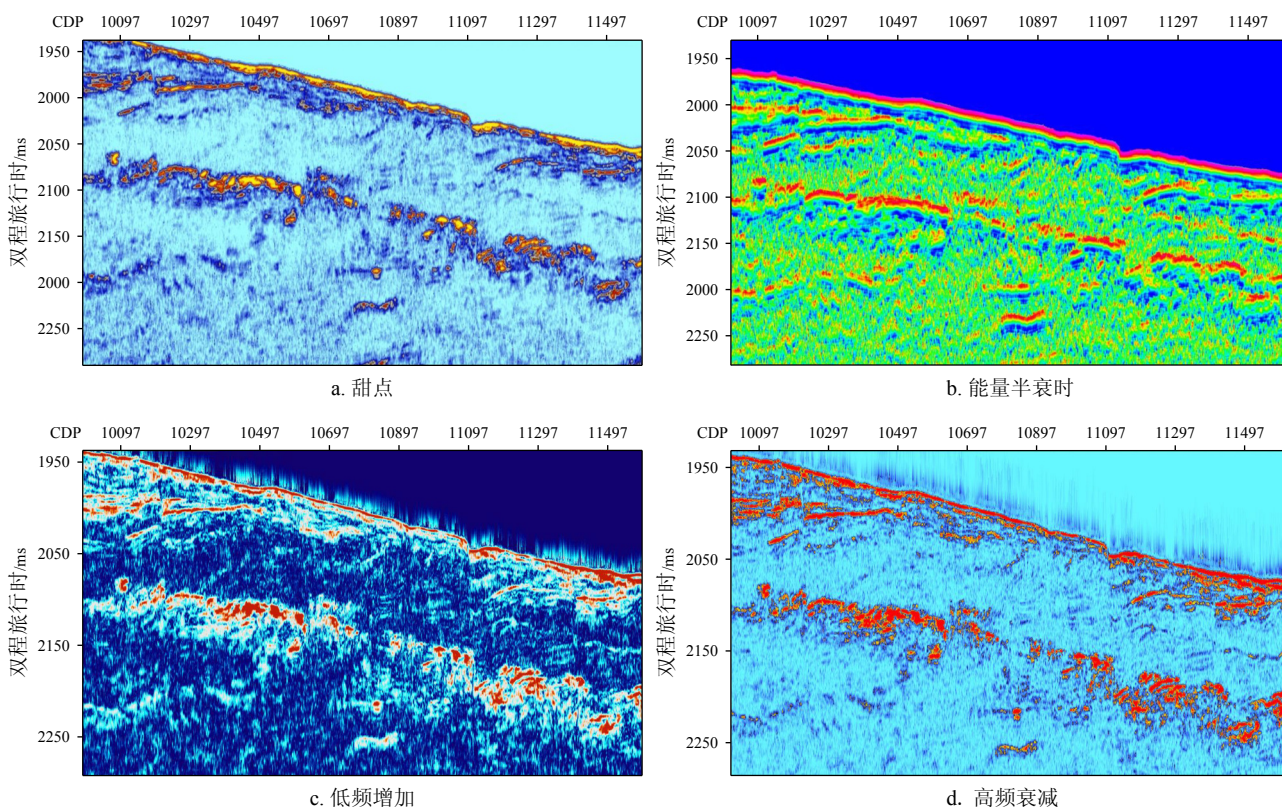


图 9 过扩散型水合物的地震属性剖面
Fig.9 Seismic attribute profiles of diffused gas hydrate

个重要标志。

瞬时频率是对应于给定时刻信号的复能量密度函数(即功率)的初始瞬间中心频率(均值)的一种度量,可有效反映地层介质对地震波的吸收衰减特性,能够清楚地反映具有低频特征的游离气富集

区。在瞬时频率剖面中(图 9c)可以看出,BSR 处及其上部,频率较周围地层略高,而在 BSR 下方,存在大面积的低频,指示了 BSR 下方游离气的存在。

(3) 相位属性

瞬时相位是地震剖面上同相轴连续性的度量,

地震波在不同物性的地层传播时会发生相位改变,因此瞬时相位可以反映地层的连续性及构造特征。瞬时相位和反射强度无关,相位值不受能量强弱的影响。BSR 反映含水合物沉积层的底界,受温压场条件控制,往往与沉积地层斜交,在地震反射剖面中,BSR 反射界面与地层斜交的现象并不明显,瞬时相位属性可以增强反射的弱同相轴,在较强的 BSR 反射界面旁边可以看到相对较弱的地层反射界面,并反映出明显的 BSR 穿层现象。

(4) 波形相似性

波形相似性是分析时窗内平均地震道能量与输入地震道能量的比值,该属性可以突出地层的波形差异,在波形相似性剖面中(图 9d),BSR 处表现为较高的波形相似度,推测由于周边地层同为含水合物沉积层,所以波形相似度较高。

(5) 吸收衰减属性

由于岩层的吸收作用,地震信号在实际传播中其高频成分衰减比低频成分更快,当地层中含油气、水合物和游离气等烃类流体时,这种频率衰减现象更加明显,因此吸收衰减属性可有效预测水合物和游离气的赋存。低频增加属性(图 9e)通过计算低频段内(最小有效频率到峰值频率)地震能量增加的快慢,可反映游离气低频能量异常的情况,高频衰减属性(图 9f)通过计算高频段内(峰值频率到最大有效频率)地震能量减少的快慢,反映游离气高频能量降低快的特征,因此低频增加和高频衰减属性都可以有效反映水合物和游离气的赋存。

由属性分析可知,电火花震源高分辨率地震中扩散型水合物表现为强振幅、高波形相似性、强高频衰减及与地层斜交等特征,在瞬时频率剖面中表现为 BSR 及上方频率增强,而下方低频存在明显低频异常区。通过地震属性综合分析,可有效识别

BSR, 提高扩散型水合物识别的可靠性。

2.3 浅表层渗漏型水合物预测

浅表层渗漏型水合物赋存于海底浅表层^[29],一般没有明显的 BSR 反射特征。通过正演分析(图 10)发现,当近海底地层中存在水合物时,会引起海底振幅略微增强,同时在海底下存在明显的强振幅异常反射,是浅表层渗漏型水合物的主要识别标志。另一方面,由于渗漏型水合物通常与海底冷泉活动密切相关^[30],因此气烟囱^[31]等流体运移通道以及海底麻坑^[32]、泥火山^[33-34]等海底微地貌也是间接识别浅表层渗漏型水合物的主要标志^[26]。常规地震勘探技术分辨率有限,通常只能分辨十几米甚至几十米的地层,难以满足精细识别浅表层渗漏型水合物的要求。而电火花震源高分辨率地震勘探技术具有较高的浅层分辨率,浅层分辨率可达 1~2 m,可以反映浅部地层细小的振幅变化,对于识别浅表层渗漏型水合物具有显著优势。

针对浅表层渗漏型水合物的识别,主要利用海底振幅异常和地震属性分析等进行综合分析。

(1) 海底振幅异常特征

通过提取海底波峰反射下方的振幅分布曲线(图 10),可发现海底附近存在与正演模型反射特征相似的振幅异常,高于周围背景值,疑似存在浅表层渗漏型水合物。

(2) 地震属性分析

由于浅表层渗漏型水合物常伴随高通量的流体活动,与气烟囱、麻坑、泥火山等海底冷泉活动密切相关,地震属性可以有效反映地层中流体的变化,因此可以利用振幅属性、频率属性、相位属性、波形属性、吸收衰减属性和分频属性等地震属性综合识别浅表层渗漏型水合物。

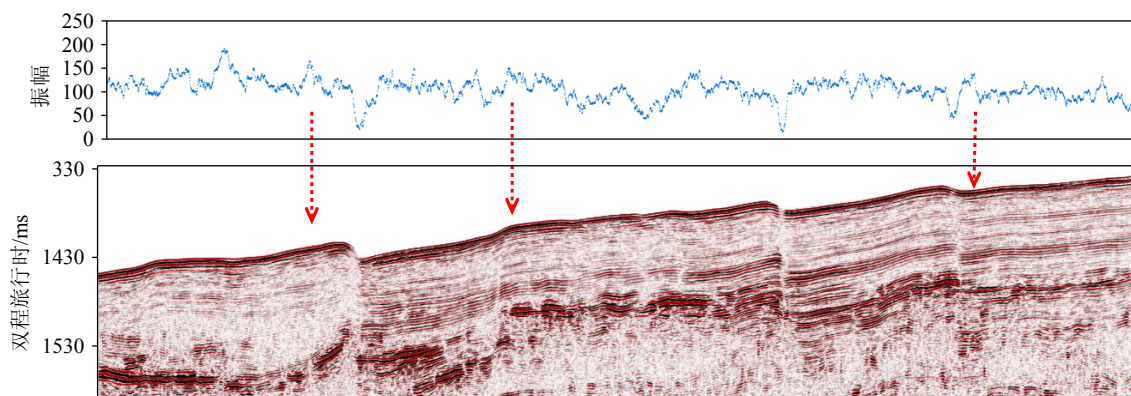


图 10 过浅表层水合物地震剖面(下)和沿海底下方振幅分布曲线(上)

Fig.10 Seismic profile (below) and amplitude distribution curve (upper) of shallow gas hydrate.

图 11 地震剖面中存在能量较强的强振幅异常, 主要分布在气烟囱附近, 而在远离气烟囱的区域, 反射振幅迅速减弱或消失, 经勘探证实, 该强振幅为块状渗漏型水合物, 围绕气烟囱呈环状分布。瞬时振幅属性中(图 12a), 水合物和游离气形成的强反射特征十分清楚, 根据强反射顶底可以确定水合

物顶底面。瞬时振幅属性显示横向振幅有明显变化, 表明水合物分布不均匀, 水合物饱和度存在横向变化。瞬时频率属性中(图 12b), 强振幅下方整体以低频为主, 气通道内部和周边发育大量的低频纵向异常, 向下与深部大片低频异常相连, 推测与深部游离气层厚度大、气层发育相关, 而厚层水合

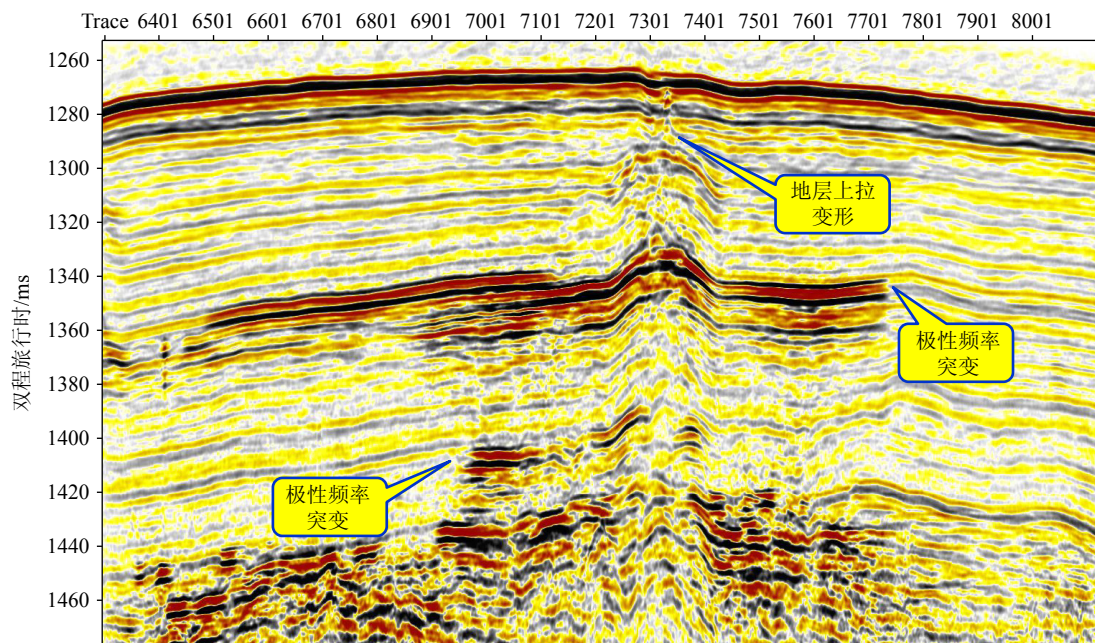


图 11 围绕气烟囱环状分布的浅表层渗漏型水合物地震剖面

Fig.11 Seismic profile of shallow gas hydrate distributed annularly around gas chimneys.

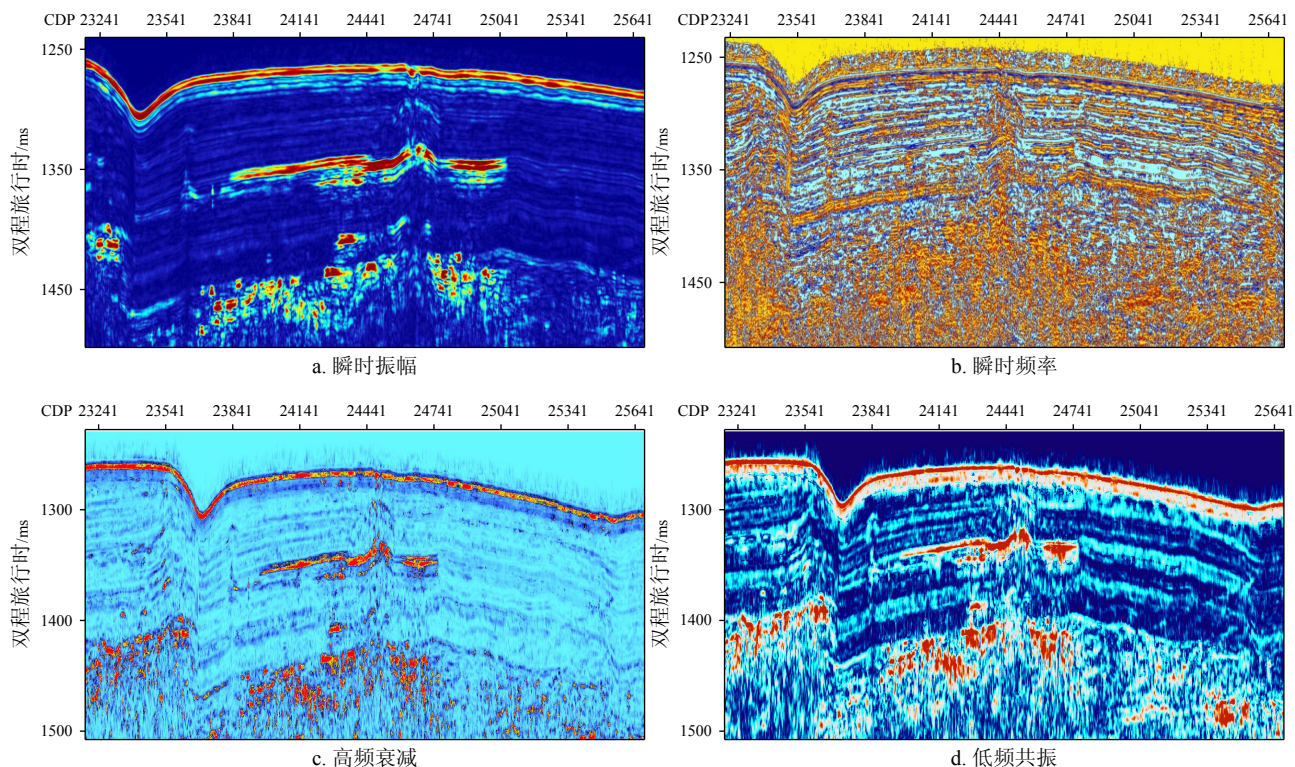


图 12 围绕气烟囱环状分布的浅表层渗漏型水合物地震属性剖面

Fig.12 Seismic attribute profiles of shallow gas hydrate distributed annularly around gas chimneys.

物没有明显的频率异常。高频衰减属性中(图 12c), 厚层水合物和下伏游离气呈现明显的高频衰减异常, 气通道上方海底也呈现明显的衰减异常, 同时, 海底、水合物和深层游离气衰减属性的横向变化表明, 水合物和游离气横向分布非均质性较强。低频共振属性中(图 12d), 厚层水合物和深部游离气呈现明显的高频衰减异常, 气通道上方海底也呈现明显的低频异常, 但游离气的低频共振异常最明显。

3 结论

与常规地震勘探技术相比, 电火花震源地震勘探技术具有较高的浅层分辨率, 垂向分辨率可达 1~2 m, 在水合物识别中发挥了重要作用。

(1) 电火花震源是一种非炸药地震勘探震源, 利用大容量电极瞬时放电从而形成地震波, 具有安全性与环保性高、分辨率高、施工灵活、适用范围广和成本低等特点, 是地震勘探重要的震源系统。

(2) 电火花震源地震资料与气枪震源相比, 具有频带宽, 主频高, 地层分辨率高的特点, 但是激发能量较低, 资料信噪比较低, 噪声发育, 因此在资料处理过程中针对资料特点和处理难点, 采用针对性的处理技术, 提高地震资料的信噪比和分辨率至关重要。

(3) 电火花震源地震资料在扩散型水合物和浅表层渗漏型水合物识别中都具有良好的应用效果, 尤其是对于浅表层渗漏型水合物, 电火花震源地震资料, 结合地震多属性综合分析, 可以更好地识别出海底和浅部地层的振幅异常、流体运移通道和海底微地貌, 有效提高浅表层渗漏型水合物识别的可靠性。

参考文献 (References)

- [1] Rincón-Martínez D, Ruge S M, Arias A S. Seismic analysis of the geological occurrence of gas hydrate in the Colombian Caribbean off-shore[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2022, 116: 103800.
- [2] Shipley T H, Houston M H, Buffler R T, et al. Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1979, 63(12): 2204-2213.
- [3] Vanneste M, De Batist M, Golmshtok A, et al. Multi-frequency seismic study of gas hydrate-bearing sediments in Lake Baikal, Siberia[J]. *Marine Geology*, 2001, 172(1-2): 1-21.
- [4] Foschi M, Etiope G, Cartwright J A. Seismic evidence of extensive microbial gas migration and trapping in submarine gas hydrates (Rakhine Basin, Bay of Bengal)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 149: 106100.
- [5] Yoo D G, Kang N K, Yi B Y, et al. Occurrence and seismic characteristics of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47: 236-247.
- [6] Pecher I A, Kukowski N, Huebscher C, et al. The link between bottom-simulating reflections and methane flux into the gas hydrate stability zone – new evidence from Lima Basin, Peru Margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185(3-4): 343-354.
- [7] Zhang W, Liang J Q, Qiu H J, et al. Double bottom simulating reflectors and tentative interpretation with implications for the dynamic accumulation of gas hydrates in the northern slope of the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 229: 105151.
- [8] 宋海斌, 张岭, 江为为, 等. 海洋天然气水合物的地球物理研究 (III): 似海底反射 [J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(2): 182-187. [SONG Haibin, ZHANG Ling, JIANG Weiwei, et al. Geophysical researches on marine gas Hydrates (III): bottom simulating reflections[J]. *Progress in Geophysics*, 2003, 18(2): 182-187.]
- [9] Yi B Y, Lee G H, Horozal S, et al. Qualitative assessment of gas hydrate and gas concentrations from the AVO characteristics of the BSR in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1953-1966.
- [10] Yuan T, Spence G D, Hyndman R D, et al. Seismic velocity studies of a gas hydrate bottom-simulating reflector on the northern Cascadia continental margin: amplitude modeling and full waveform inversion[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B1): 1179-1191.
- [11] Crutchley G J, Maslen G, Pecher I A, et al. High-resolution seismic velocity analysis as a tool for exploring gas hydrate systems: an example from New Zealand's southern Hikurangi margin[J]. *Interpretation*, 2016, 4(1): SA1-SA12.
- [12] Turco F, Crutchley G J, Gorman A R, et al. Seismic velocity and reflectivity analysis of concentrated gas hydrate deposits on the southern Hikurangi Margin (New Zealand)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 120: 104572.
- [13] Jeong T, Byun J, Choi H, et al. Estimation of gas hydrate saturation in the Ulleung basin using seismic attributes and a neural network[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, 106: 37-49.
- [14] 沙志彬, 梁金强, 郑涛, 等. 地震属性在天然气水合物预测中的应用 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(5): 185-192. [SHA Zhibin, LIANG Jinqiang, ZHENG Tao, et al. The application of seismic attributes to the prediction of gas hydrates[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(5): 185-192.]
- [15] 王秀娟, 吴时国, 徐宁. 地震属性参数在识别天然气水合物和游离气分布模式中的应用 [J]. *海洋与湖泊*, 2006, 37(3): 271-279. [WANG Xiujuan, WU Shiguo, XU Ning. Determining the distribution model of hydrate and free gas occurrence in sediment with seismic attribute parameters[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2006, 37(3): 271-279.]
- [16] 邢磊. 海洋小多道地震高精度探测关键技术研究 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2012. [XING Lei. Study of the key technologies of high-precision marine multichannel seismic survey[D]. Master Dissertation, 2012.]

- tation of Ocean University of China, 2012.]
- [17] 戚宾, 王祥春, 赵庆献. 海洋电火花震源地震勘探研究进展 [J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 107-111. [QI Bin, WANG Xiangchun, ZHAO Qingxian. Research on the progress of marine sparker seismic exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 107-111.]
- [18] Buogo S, Cannelli G B. Implosion of an underwater spark-generated bubble and acoustic energy evaluation using the Rayleigh model[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 111(6): 2594-2600.
- [19] 卢新培, 潘垣, 张寒虹. 水中脉冲放电的电特性与声辐射特性研究 [J]. 物理学报, 2002, 51(7): 1549-1553. [LU Xinpei, PAN Yuan, ZHANG Hanhong. The electrical and acoustical characteristics of pulsed discharge in water[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(7): 1549-1553.]
- [20] 秦曾衍, 左公宁, 王永荣, 等. 高压脉冲放电及其应用 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2000. [QIN Zengyan, ZUO Gongning, WANG Yongrong, et al. The Application of High Voltage and Super-Density Pulse Discharge[M]. Beijing: Beijing Industry University Press, 2000.]
- [21] 裴彦良, 王揆洋, 李官保, 等. 海洋工程地震勘探震源及其应用研究 [J]. 石油仪器, 2007, 21(2): 20-23. [PEI Yanliang, WANG Kuiyang, LI Guanbao, et al. Application study of marine engineering seismic sources[J]. Petroleum Instruments, 2007, 21(2): 20-23.]
- [22] 刘怀山, 王文秋, 尹燕欣. 海洋地球物理探测在海岸工程建设中的应用: 以曹妃甸港为例 [J]. 海岸工程, 2022, 41(4): 313-327. [LIU Huaishan, WANG Wenqiu, YIN Yanxin. Offshore geophysical prospecting on coastal engineering: a case study in Caofeidian[J]. *Coastal Engineering*, 2022, 41(4): 313-327.]
- [23] Anitha G, Ramana M V, Ramprasad T, et al. Shallow geological environment of Krishna-Godavari offshore, eastern continental margin of India as inferred from the interpretation of high resolution sparker data[J]. *Journal of Earth System Science*, 2014, 123(2): 329-342.
- [24] Mangipudi V R, Goli A, Desa M, et al. Synthesis of deep multichannel seismic and high resolution sparker data: implications for the geological environment of the Krishna-Godavari offshore, Eastern Continental Margin of India[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 339-355.
- [25] 易虎, 詹文欢, 闵伟, 等. 小多道地震震源效果在海域活动断裂探测中的对比研究 [J]. 地震地质, 2022, 44(2): 333-348. [YI Hu, ZHAN Wenhuan, MIN Wei, et al. A comparative study of source effect based on mini-multichannel seismic profile in marine active fault detection[J]. *Seismology and Geology*, 2022, 44(2): 333-348.]
- [26] 骆迪, 蔡峰, 闫桂京, 等. 浅表层天然气水合物高分辨率地震勘探方法与应用 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 101-108. [LUO Di, CAI Feng, YAN Guijing, et al. High resolution seismic method for shallow gas hydrates exploration[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(9): 101-108.]
- [27] Luo D, Cai F, Wu Z Q. Numerical simulation for accuracy of velocity analysis in small-scale high-resolution marine multichannel seismic technology[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2017, 16(3): 370-382.
- [28] 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.]
- [29] 蔡峰, 吴能友, 闫桂京, 等. 海洋浅表层天然气水合物成藏特征 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 73-78. [CAI Feng, WU Nengyou, YAN Guijing, et al. Characteristics of shallow gas hydrates accumulation in the sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(9): 73-78.]
- [30] Barnes P M, Lamarche G, Bialas J, et al. Tectonic and geological framework for gas hydrates and cold seeps on the Hikurangi subduction margin, New Zealand[J]. *Marine Geology*, 2010, 272(1-4): 26-48.
- [31] Ye J L, Wei J G, Liang J Q, et al. Complex gas hydrate system in a gas chimney, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 104: 29-39.
- [32] Hovland M, Svensen H. Submarine pingoes: indicators of shallow gas hydrates in a pockmark at Nyegga, Norwegian Sea[J]. *Marine Geology*, 2006, 228(1-4): 15-23.
- [33] Ben-Avraham Z, Reshef M, Smith G. Seismic signature of gas hydrate and mud volcanoes of the South African continental margin[C]//Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Mud Volcanism, Geodynamics and Seismicity. Baku, Azerbaijan: Springer, 2005: 17-27.
- [34] Bohrmann G, Ivanov M, Foucher J P, et al. Mud volcanoes and gas hydrates in the Black Sea: new data from Dvurechenskii and Odessa mud volcanoes[J]. *Geo-Marine Letters*, 2003, 23(3-4): 239-249.