

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.

浅表层天然气水合物高分辨率地震勘探方法与应用

骆迪^{1,2}, 蔡峰^{1,2*}, 闫桂京^{1,2}, 梁杰^{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 266071;

2 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:浅表层天然气水合物资源勘查是天然气水合物资源勘查的重要组成部分, 对深水地质灾害预测和评价、气候变化等都具有重要的指导意义。地震勘探是天然气水合物勘探的重要手段, 但浅表层天然气水合物赋存于近海底沉积物中, 埋深一般小于海底以下 60 m, 对地震浅层分辨率具有较高的要求, 常规地震勘探方法难以满足以高频信号为主的浅表层天然气水合物勘探的需要。针对浅表层天然气水合物的特点, 充分利用小道距高分辨率多道地震电火花震源气泡效应小、可重复性好, 激发频率高、接收系统动态范围大等特点, 结合参量阵浅地层剖面, 形成了一套高分辨率地震勘探方法, 提高了浅部地层的地震分辨率, 满足了浅表层天然气水合物勘查对资料分辨率的要求。浅表层天然气水合物似海底反射 (BSR) 不明显, 通常与海底甲烷渗漏密切相关, 因此海底气体渗漏相关的地形地貌、气体运移通道、速度异常和振幅异常等特征是浅表层天然气水合物的重要识别标志。

关键词:浅表层天然气水合物; 小道距高分辨率地震; 参量阵浅剖; 泥火山

中图分类号: P744; P631.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.059

0 引言

随着天然气水合物勘探开发的逐渐深入, 浅表层天然气水合物的资源潜力日益引起国内外的关注, 尤其是日本海东部浅表层天然气水合物调查获得了突破性进展^[1]。浅表层天然气水合物赋存于近海底沉积物中, 埋深一般小于海底以下 60 m, 具有厚度大、纯度高等特点。浅表层天然气水合物资源勘探对天然气水合物资源勘探、深水地质灾害预测和评价、气候变化等科学问题具有重要的指导意义。浅表层天然气水合物与海底冷泉系统密切相关, 冷泉系统为甲烷流体运移至水合物稳定带提供了有

利通道, 同时浅表层天然气水合物的分解也是冷泉系统甲烷的重要来源^[2]。

地震勘探是目前天然气水合物勘探的重要手段^[3], 但由于浅表层天然气水合物赋存位置较浅, 对地震浅层分辨率具有较高的要求。常规地震勘探方法拖缆间隔大、排列长, 气枪震源能量大、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, 但无法满足以高频信号为主的海底浅表层天然气水合物勘探的需要^[4]。对于常规天然气水合物而言, 似海底反射 (BSR) 是最重要的识别标志^[5-6], 而浅表层渗漏型天然气水合物位于近海底的沉积物中, 在常规的地震数据中没有明显的振幅异常, 因此, 仅仅依靠 BSR 难以在多道地震资料中准确的识别浅表层天然气水合物。海底气体渗漏相关的地貌特征、气体运移通道、速度异常和振幅异常等特征是浅表层泥火山型天然气水合物该重要识别标志。

自 2011 年以来, 青岛海洋地质研究所针对海域浅表层天然气水合物的特点, 逐步形成了一套浅表层天然气水合物高精度地震勘探技术体系, 利用

收稿日期: 2020-05-27

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFC0310001); 国家自然科学基金 (41506085)

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

* 通讯作者: 蔡峰 (1965—), 男, 研究员, 主要从事资源评价及油气地质研究工作. E-mail: caifeng0532@163.com

海洋小道距高分辨率二维、三维多道地震^[7-9], 结合参量阵高频浅地层剖面, 提高了浅部地层的分辨率, 为浅表层天然气水合物资源勘查提供了高品质的数据基础。

1 海洋小道距高分辨率地震勘探方法

1.1 海洋小道距高分辨率二维多道地震勘探技术

震源是提高地震资料探测精度最重要的因素之一。海底以下 50~1 000 m 深度地层是海域地震勘探一个非常重要的范围, 天然气水合物的勘查、海底滑坡等地质灾害的调查与预防、浅部断层的类型及活动性等都与该深度地层有着紧密的联系。传统气枪震源具有能量大、频率低、激发间隔大等特点, 而浅层主要以高频信号为主, 因此使用气枪震源的常规地震勘探方法不能适应海底浅层高精度地震勘探的要求。

为了克服常规地震勘探方法浅层分辨率低的问题, 本文采用了一种海洋小道距高分辨率二维多道地震探测技术, 该技术接收道数少(一般 24~48 道)、道间距小(3.125~6.25 m), 工作段缆长一般只有 75~300 m, 施工灵活, 对施工海域和船只的要求较低,

同时可以取消用于控制电缆沉放姿态的深度控制器, 从而减少干扰源, 提高地震原始资料的信噪比。

海洋小道距高分辨率二维多道地震探测技术使用大能量(激发能量高达 20 KJ)电火花震源, 它与气枪震源相比显著的优势在于主频高、频带宽, 其有效频率范围为 60~1 000 Hz, 主频一般高达 200 Hz 以上, 因此在具有较大的地层穿透能力的同时保证了勘探分辨率, 能够实现在海水深度 > 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 1~3 m, 在 50~1 000 m 这一深度范围的勘探中发挥了重要作用, 可以满足浅表层天然气水合物勘探的需要^[4]。图 1 为气枪震源与电火花震源叠加剖面 and 频谱对比图, 气枪震源主频为 55 Hz, 优势频带约 40~120 Hz, 而电火花震源主频为 240 Hz, 优势频带约 100~350 Hz, 电火花震源主频较高, 频带较宽, 浅层分辨率远高于气枪震源, 能够提供更丰富的浅层信息, 不仅能够显示清晰的强振幅 BSR 界面, 还能够反映地层走势、断裂特征以及 BSR 与地层斜交现象, 且穿透深度达到海底以下 1 000 m 左右, 满足天然气水合物地震勘探的要求; 而气枪震源只能反映波阻抗差异较大的反射界面, 不能反映精细的构造特征, 且 BSR 零星分布, 识别困难^[10]。

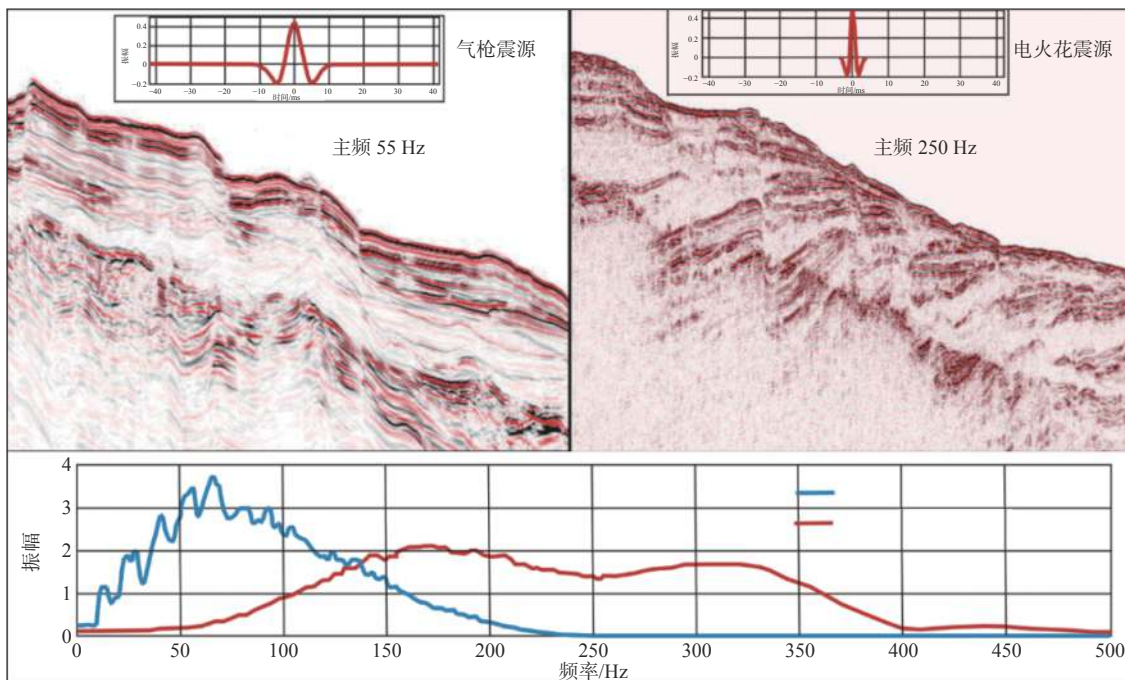


图 1 气枪震源与电火花震源地震叠前时间偏移剖面对比

Fig.1 Comparison of prestack time migration profiles with air gun source and sparker source

1.2 海洋小道距高分辨率地震资料处理关键技术

针对海洋小道距高分辨率地震资料的特点, 本文采用了适用性的地震资料处理技术: ①电火花震源与气枪震源相比, 激发能量相对较弱, 原始资料中环境背景噪音、线性噪音及异常振幅等干扰发育。针对不同类型噪音的特点采用针对性的去噪技术, 分级、分类、多域联合进行噪音压制, 有效提高资料信噪比, 从而提高地震资料的成像质量。②针对资料采集时电缆沉放深度空间动态变化对地震分辨率的影响, 采用基于虚反射走时识别与模拟计算的电缆沉放深度校正方法, 对每炮的海底反射及其对应的虚反射时间进行拾取分析, 计算每炮采集时的电缆沉放深度, 并将其校正到统一基准面, 提高共中心点同相叠加效果及速度分析精度, 从而提高地震资料分辨率。③速度分析的精度决定了地震资料处理过程中各个环节成果的准确性, 是海域天然气水合物识别的重要依据, 但是, 由于采用的小道距多道地震排列长度较短, 只有 300 m, 提供速度分析所需的走时信息较少, 速度谱能量团聚焦性较差, 速度拾取困难, 因此速度分析精度较低。针对小道距多道地震速度分析精度较低的问题, 根据地震模型学相似性原理, 将地震数据在横向尺度和时间上等比例扩大, 增加了远炮检距道提供速度分析所需的时差信息, 增强速度谱能量团的聚焦性, 从而提高速度分析精度, 确保速度信息的可靠性。④虚反射引

起陷波效应导致地震记录频带变窄, 降低地震剖面的分辨率和成像精度, 是提高小道距高分辨率地震成像精度的关键问题。采用 $F-K$ 域与预测反褶积组合的虚反射压制技术, 有效的消除了虚反射, 拓展了地震资料的频带宽度 [4]。

1.3 小道距高分辨率三维地震探测技术

随着我国天然气水合物勘查开发利用的快速发展, 常规二维多道地震的探测精度已无法满足精细刻画天然气水合物矿体的要求。2011 年以来, 青岛海洋地质研究所与中国海洋大学开展了“天然气水合物小道距高分辨率三维地震探测”技术研发, 并应用于天然气水合物资源勘查, 取得了良好的效果。这是国内首次探索自主研发, 用于海域天然气水合物勘查领域的小道距高分辨率三维地震采集技术。该套采集技术充分利用电火花震源气泡效应小、可重复性好, 激发频率高、接收系统动态范围大等特点, 满足了天然气水合物勘查对资料分辨率的要求。

小道距高分辨率三维地震探测系统采用窄缆距双缆双源作业方式, 双电火花震源交替激发, 纵向 12 次覆盖, 采用 $3.125\text{ m} \times 12.5\text{ m}$ 小面元 (图 2)。在 2 000 m 水深条件下, 地层最大穿透深度 $> 500\text{ m}$, 垂向分辨率可达 1 m。由此可见, 小道距高分辨率三维地震探测技术具有超高的空间分辨率和时间分辨率, 同时具有高效快速的特点, 在确保地震资料高质量的同时可有效提高工作效率, 缩短工期 [7]。

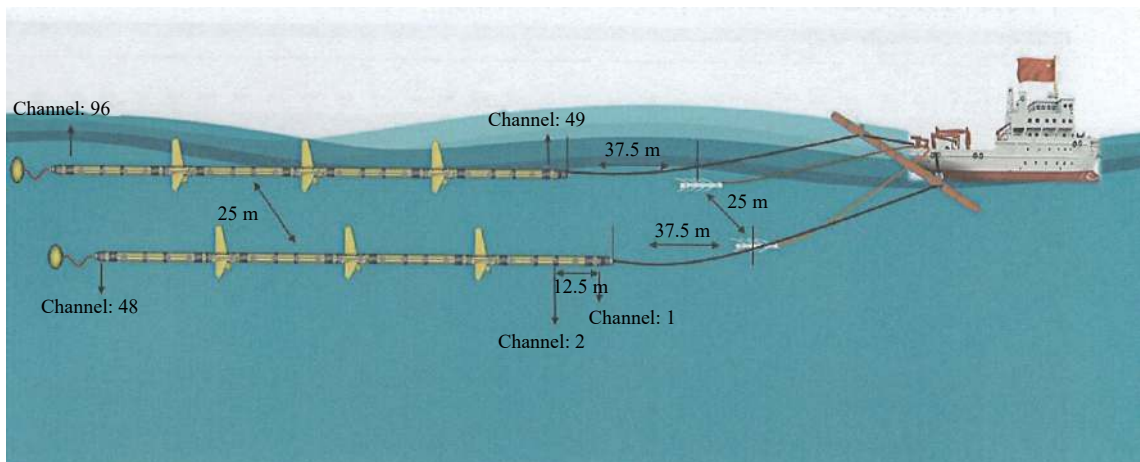


图 2 小道距高分辨率三维地震双源双缆采集系统示意图

Fig.2 Sketch map of small-scale high-resolution 3D seismic acquisition system with dual source and dual cable

2 基于参量阵高频浅地层剖面技术的浅表层天然气水合物识别与预测

2.1 参量阵高频浅地层剖面测量技术

参量阵高频浅地层剖面测量是一种基于水声学原理探测水下浅部地层结构的地球物理方法,是海洋地质调查的重要手段之一,对于识别天然气水合物或甲烷流体渗漏引起的沉积物声学异常特征(如声混浊、空白带、增强反射、亮点、速度下拉、泥底辟、气烟囱等)、海底微地貌异常特征(如麻坑、泥火山、自生碳酸盐岩岩隆等)以及天然气进入水体形成的气泡羽状流等异常特征具有关键作用^[11]。

参量阵高频浅地层剖面技术是非线性调频浅地层剖面探测技术,其原理是利用地层波阻抗差异特性,通过发射2组相近的原始声波信号,利用声波在介质中传播的非线性特征,自解调产生差频信号,形成参量阵声学场,实现差频窄波束声波发射,减少水体噪音和海底混响等干扰。基于非线性调频技术的参量阵高频浅地层剖面仪具有穿透性强、发射波束角小以及分辨率高等优点,小体积、轻量化的换能器就能具有足够的穿透力,从而获取更高分辨率和更深地层的剖面数据^[12]。

本文参量阵浅地层剖面采集使用的设备为船载 TOPAS PS18 全海深参量阵浅地层剖面仪,该仪器由挪威 Kongsberg 公司生产,基于水柱中的2个

高强度声束在较高频率下(大约 18 kHz 中心对称)的非线性相互作用而产生低频声波。TOPAS PS18 浅地层剖面仪产生的信号具有较高的相对带宽,窄波束剖面(接近所发射的高频信号)并且没有旁瓣,可高精度的刻画浅部地层结构。该浅地层剖面仪工作水深为 20 m 至全海深,穿透能力较好,且分辨率非常高。

TOPAS 系统最大的特点是操作者可以根据水深、地层等实际情况进行发射信号的选取。系统可使用的发射信号波形包括: Ricker 波、CW 微波(Bursts 波)、Chirp 波和其他根据用户指定的波形外接输入(图 3)。系统主频率为 12.5~17.5 kHz,次级频率为 0.5~5.0 kHz,发射模式可以是单脉冲,也可以是多脉冲^[13]。每种发射信号波形都具有不同的特点,Ricker 波具有高分辨率的特点,Bursts 波具有高穿透率的特点,Chirp 波是介于 Ricker 波和 Bursts 波之间的一种波形,兼顾了一定的分辨率与穿透能力。由实际工作经验分析,高分辨率的 Ricker 波比较适合于对水深深度 < 1 000 m 的地层进行测量;当水深深度 > 2 500 m 时,使用 Bursts 波进行地层测量比较适合;水深在 1 000 m 和 2 500 m 之间时可以用 Chirp 波进行地层测量。3 种发射信号波形使 TOPAS 系统从理论上实现了全海洋的测量能力。根据地质条件和试验对比,本文使用 Chirp 波进行施工作业,工作频段选用 2~5 kHz,使用多 Ping 激发方式,具有最高的横向分辨率。

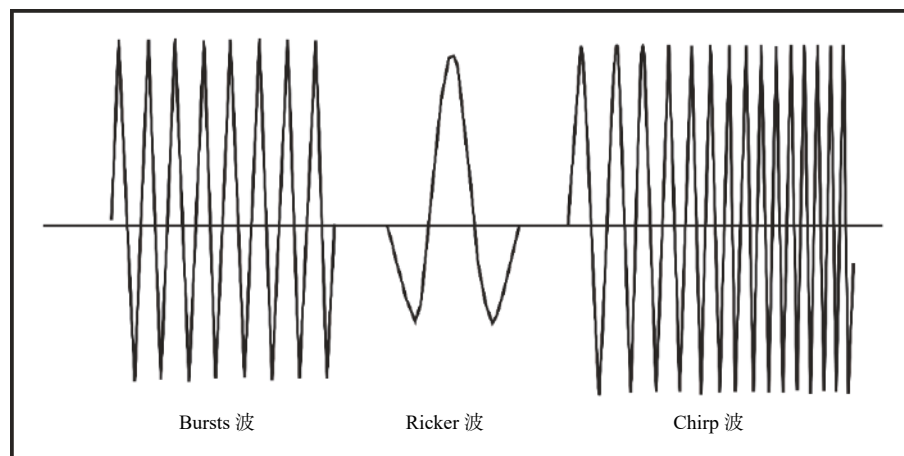


图 3 TOPAS 系统使用的 3 种波形(据文献 [13])

Fig.3 Three waveforms used in Topas system (after reference [13])

2.2 基于三维参量阵浅剖的浅表层天然气水合物识别与预测技术

基于三维参量阵浅剖数据的浅表层天然气水合物识别与预测包括 2 个方面的关键技术: ① 利用希尔伯特变换, 将参量阵采集的属性数据转换为包含包络信号和振幅信号的 SEG-Y 标准地震数据, 获得海底浅表层的反射阻抗信息, 然后运用多维插

值技术, 将密集采集(线间隔 25 m)的二维参量阵浅剖数据构建成为三维数据体, 并对三维数据体做进一步静校正、三维噪音压制等处理从而提高数据信噪比; ② 对海底之下 100 m 以内的数据进行层位划分, 沿层提取多种属性(图 4), 并选择敏感属性进行主成分分析, 实现基于多属性的三维数据体的地震相聚类分析, 刻画地震相平面展布(图 5), 为天然气水合物的预测提供有力证据。

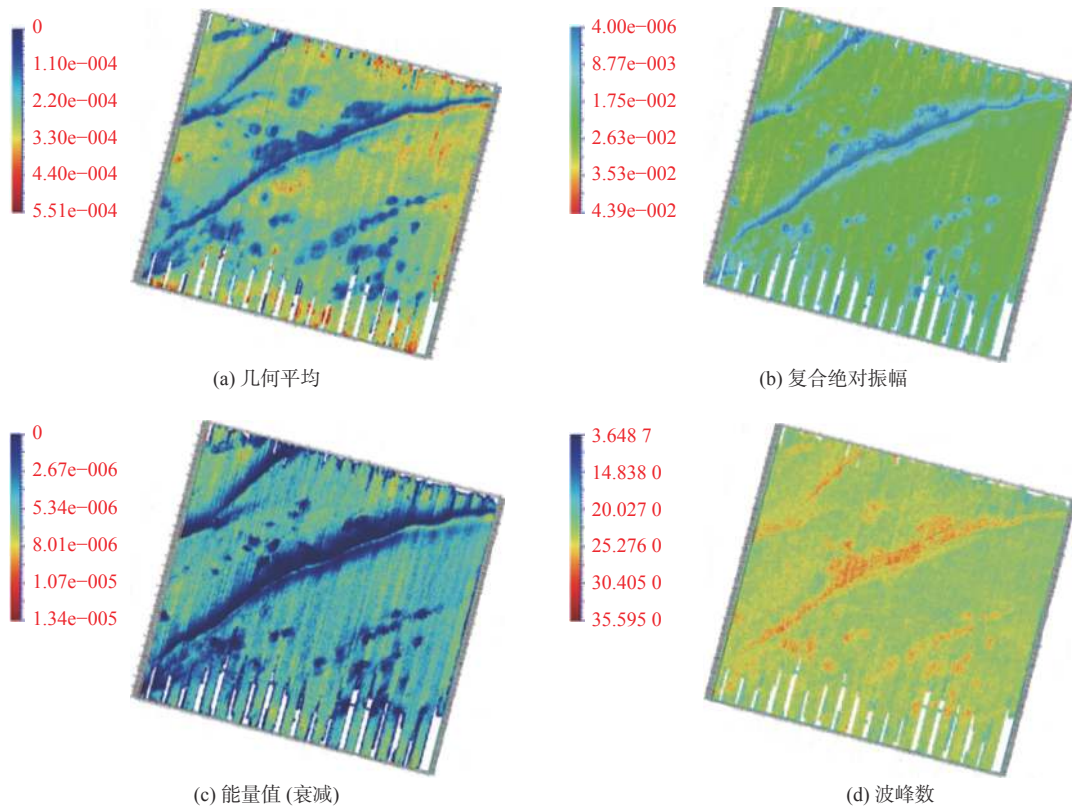


图 4 几何平均属性横切片图

Fig.4 Slices of geometric average attributions

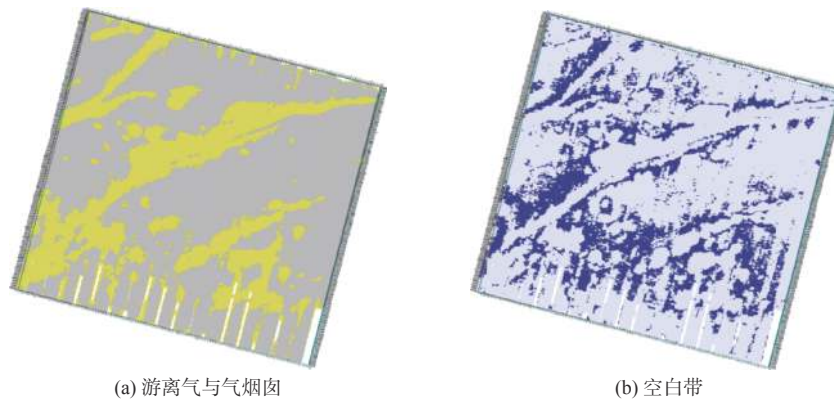


图 5 地震相图切片

Fig.5 Slices of seismic facies

3 天然气水合物精细识别

研究区发育2种类型天然气水合物,浅表层泥火山型天然气水合物和中深层扩散型天然气水合物,浅表层天然气水合物的识别主要依据浅地层剖面 and 高分辨率地震,通过地形地貌分析,寻找气体渗漏的证据,并结合地震剖面中的强振幅异常和速度异常综合分析。中深层扩散型天然气水合物主要依据高分辨率地震数据,利用地震反射特征、地震敏感属性、分频属性和衰减属性等,综合解释似海底反射BSR(图6)。

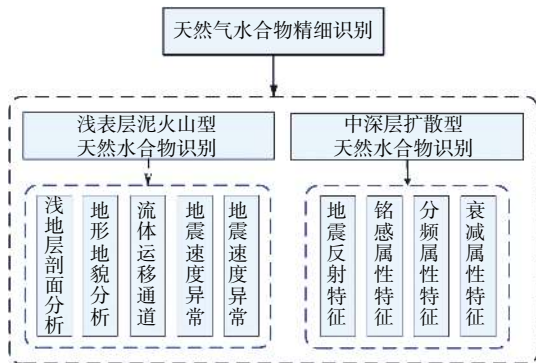


图6 天然气水合物地震识别流程图

Fig.6 Flow chart of seismic identification of gas hydrate

3.1 浅表层泥火山渗漏型天然气水合物识别

浅表层泥火山型天然气水合物通常围绕泥火山口呈环带状分布,发育海底以下60 m以内,呈块状,BSR特征不明显,空白带通常不发育。大量的海底调查和海洋天然气水合物勘探表明,近海底存在天然气水合物的区域通常会出麻坑、泥火山、碳酸盐岩礁等地形异常,局部发育与气体渗漏相关的速度异常和强振幅异常反射等特征。当深部存在明显的含气特征,浅部具有良好的运移通道,这种地貌特征可能与浅表层天然气水合物的聚集相关,因此海底气体渗漏相关的地貌特征、气体运移通道、速度异常和振幅异常等特征是浅表层泥火山型天然气水合物的重要识别标志。

图7是过浅表层天然气水合物赋存区的参量阵高频浅地层剖面 and 相应的多波束数据,该剖面发

育3处泥火山,天然气水合物赋存于泥火山两翼,泥火山内部有大量气体渗漏至海底,在泥火山顶部形成羽状流,在浅地层剖面中呈类似双曲线的反射特征,多波束数据也可见泥火山顶部羽状流发育,指示了大量气体的存在。

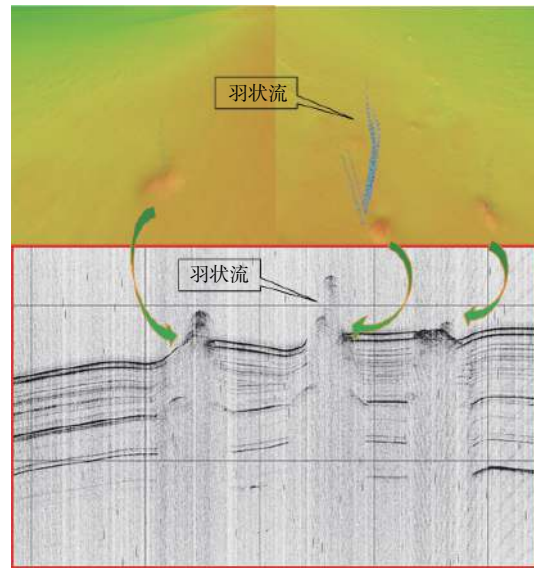


图7 浅表层天然气水合物赋存区参量阵高频浅地层剖面 and 多波束数据

Fig.7 Parametric array sub-bottom profile and multibeam data through near-seafloor gas hydrate province

3.2 中深层扩散型天然气水合物识别

地震反射剖面中似海底反射(BSR)是扩散型天然气水合物的识别标志,利用二维、三维多道地震反射特征,结合瞬时属性、衰减和分频属性等天然气水合物敏感属性,对BSR进行了精细解释,从而识别中深层扩散型天然气水合物。

图8为小道距高分辨率二维地震剖面,震源为大容量电火花震源SIG 5Mille,震源能量5000 J,道间距6.25 m,炮间距12.5 m,采样率0.5 ms,覆盖次数12次。该测线BSR位于海底以下约120 ms处,表现为强振幅,与海底平行,反极性,上部空白反射,下部强振幅反射指示游离气的存在。高频衰减属性(图9)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,反映水合物和游离气高频能量衰减特征,突出BSR的展布特征,同时BSR的高频衰减横向存在明显强弱变化。

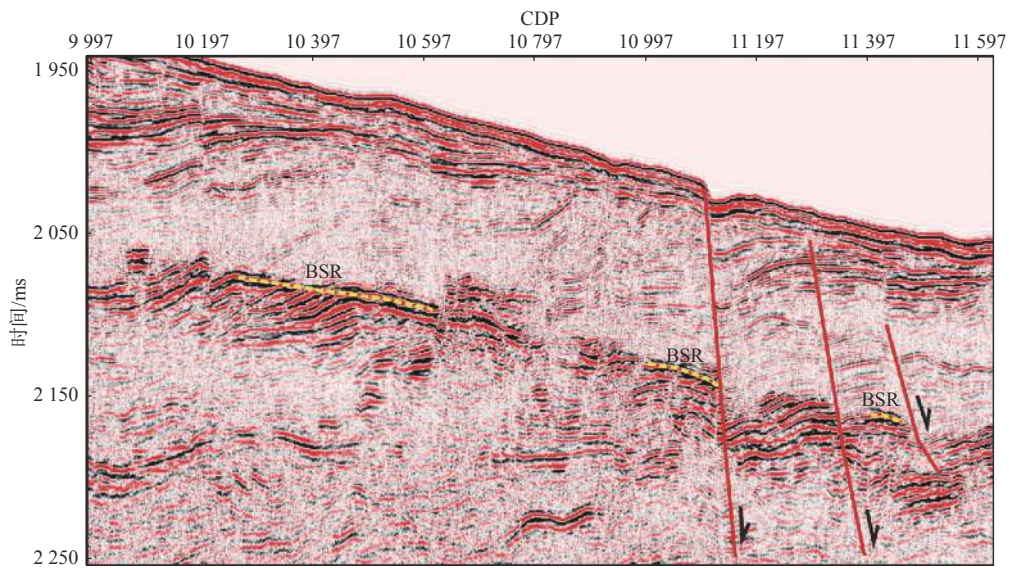


图 8 扩散型天然气水合物地震剖面

Fig.8 Seismic profile of diffusion gas hydrate

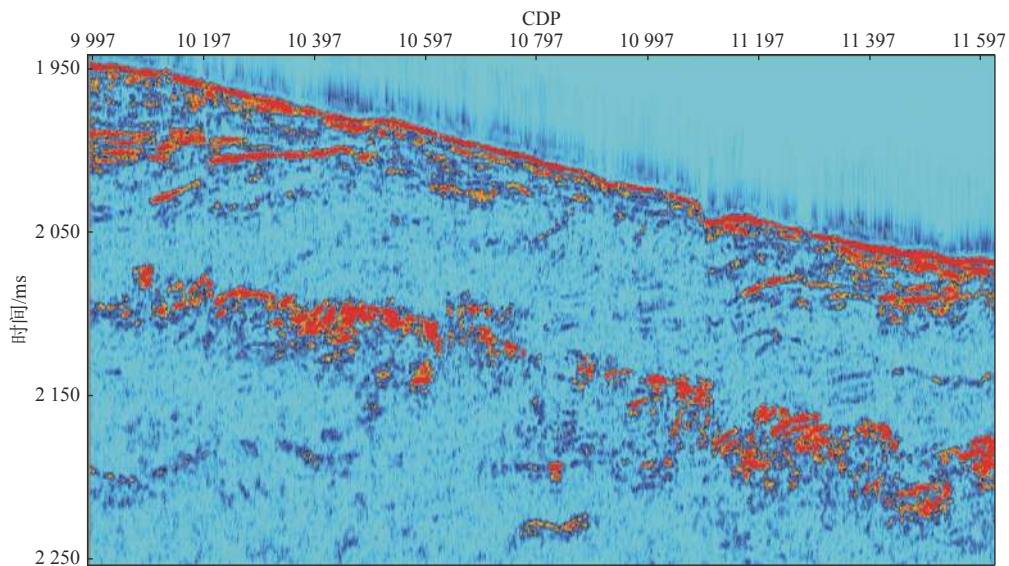


图 9 扩散型天然气水合物高频衰减属性剖面

Fig.9 High frequency attenuation attribution profile of diffusion gas hydrate

4 结论

(1)使用大能量电火花震源的小道距高分辨率二维地震探测技术具有主频高、频带宽的特点,在具有较大的地层穿透能力的同时保证了勘探分辨率,能够在海水深度 $>1000\text{ m}$ 的海域穿透超过 1000 m 厚度的地层,且垂向分辨率达到 $1\sim 3\text{ m}$,可以满足浅表层天然气水合物勘探的需要。

(2)小道距高分辨率三维地震探测技术具有超高的空间分辨率和时间分辨率,同时具有高效快速的特

点,在确保地震资料高质量的同时可有效提高工作效率,在浅表层天然气水合物勘探中起到了重要的作用。

(3)参量阵高频浅地层剖面探测是一种非线性调频浅地层剖面探测技术,分辨率高,相比线性调频浅剖技术可以探测更深的地层。利用希尔伯特变换,将参量阵采集的属性数据转换为包含包络信号和振幅信号的SEG-Y标准地震数据,获得海底浅表层的反射阻抗信息,然后运用多维插值技术,将密集采集(线间隔 25 m)的二维参量阵浅剖数据构建成为三维数据体,在此基础上对海底之下 100 m 的数据实现基于多属性的三维数据体的地震相聚

类分析,刻画地震相平面展布,为天然气水合物的预测提供有力证据。

(4)浅表层泥火山型天然气水合物通常围绕泥火山口呈环带状分布,BSR特征不明显,空白带通常不发育,与海底气体渗漏相关的地貌特征、气体运移通道、速度异常和振幅异常等特征是浅表层泥火山型天然气水合物该重要识别标志。

参考文献:

- [1] Ryo M, Yoshitaka K, Glen S, et al. Occurrence and origin of thick deposits of massive gas hydrate, eastern margin of the Sea of Japan[C]. America: 9th International Conference on Gas Hydrates, 2017.
- [2] 刘斌,李柯良,杨力,等.浅表层水合物多频率数据成像特征[J].海洋地质前沿,2019,35(7):54-61.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Le A N, Huuse M, Redfern J, et al. Seismic characterization of a Bottom Simulating Reflection (BSR) and plumbing system of the Cameroon margin, offshore West Africa[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 67: 1-19.
- [6] 沙志彬,杨木壮,梁金强,等. BSR的反射波特征及其对天然气水合物识别的应用[J].南海地质研究,2003(1):55-61.
- [7] 闫桂京.小道距高分辨率三维地震探测新技术助力海域天然气水合物勘查[J].海洋地质前沿,2017,33(1):70.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 单晨晨,邓希光,温明明,等.参量阵浅地层剖面仪在海底羽状流探测中的应用——以ATLAS P70在马克兰海域调查为例[J].地球物理学进展,2020,35(3):1183-1190.
- [12] 祝鸿浩.参量阵浅地层剖面技术研究[D].北京:中国舰船研究院,2015.
- [13] 吴水根,周建平,顾春华,等.全海洋浅地层剖面仪及其应用[J].海洋学研究,2007,25(2):91-96.

HIGH RESOLUTION SEISMIC METHOD FOR SHALLOW GAS HYDRATES EXPLORATION

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

(1 Key Laboratory of Gas Hydrate of Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: The shallow gas hydrate is a very important exploration target of gas hydrate resources. It is also very important for prediction and evaluation of deep-water geo-disasters and their climatic consequences. Seismic exploration is a basic mean for gas hydrate exploration. However, the shallow gas hydrate occurs in the sediments near the seafloor, of which the buried depth is generally less than 60 m, and dominated by high frequency signals. Therefore, it requires a high shallow seismic resolution. Conventional seismic exploration methods are not able to meet the needs in the shallow gas hydrate exploration. According to the characteristics of shallow gas hydrates, we proposed in this paper a high-resolution seismic exploration method, which fully uses the advantages of small-scale high-resolution multichannel seismic technology, combined with the parametric array sub-bottom profile. This method has much improved the seismic resolution for the shallow deposits, and good enough to meet the requirements of data resolution for the shallow gas hydrate exploration. The bottom simulating reflector (BSR) of the shallow gas hydrate is usually not so obvious, and closely related to methane leakage. Therefore, the geomorphic features related to gas leakage in the seafloor, gas migration pathways, velocity anomalies and amplitude anomalies are important indicators for recognition of shallow gas hydrates.

Key words: shallow gas hydrate; small-scale high resolution seismic; parametric array sub-bottom profile; mud volcanoes