

doi: 10.11720/wtyht.2020.1330

徐云霞,文鹏飞,张宝金,等.OBS 在琼东南海域水合物矿体识别中的应用[J].物探与化探,2020,44(6):1276-1282.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1330

Xu Y X,Wen P F,Zhang B J,et al.The application of OBS to the identification of hydrate in Qiongdongnan (southern Hainan) sea area[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2020,44(6):1276-1282.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1330

OBS 在琼东南海域水合物矿体识别中的应用

徐云霞^{1,2},文鹏飞²,张宝金²,刘斌²

(1.中国地质调查局 广州海洋地质调查局,广东 广州 510760;2.南方海洋科学与工程广东省实验室(广州),广东 广州 511458)

摘 要: OBS 获得纵波和转换横波信息能够丰富地下构造的信息,获得与岩性、流体特征相关信息,减少水合物解释中的非唯一性。本文针对 OBS 资料采集的特点,利用重定位、重定向、波场分离、镜像偏移、RT 旋转、转换横波偏移等技术获得纵波和转换横波的速度信息及共反射点成像结果;在此基础上进行纵波、转换横波联合反演,获得纵波阻抗、横波阻抗等结果,对此结果进行联合分析、解释,识别出真实、有利的游离气分布区域,提高了与水合物相关的流体特征的识别精度。

关键词: OBS;水合物;镜像偏移;转换横波偏移;纵横波联合反演

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)06-1276-07

0 引言

海底地震仪(OBS)是一种海面放炮、海底接收的观测方式,能同时接收四分量信息,相对常规拖缆地震数据而言具备长偏移距和宽方位信息、具有更丰富的低频信息、能同时接收纵波和转换横波等优势^[1],目前已广泛应用于地壳深部构造、油气与水合物调查中^[2-4]。

目前在琼东南海域开展了多次高分辨率多道地震调查,对该海域的构造、沉积环境进行分析和讨论,发现了天然气水合物的重要地球物理标志 BSR,对相关的地球物理特征如 BSR 极性反转、振幅空白带、速度异常等进行识别及判读,估算了该海域的天然气水合物资源量,推断了该海域的天然气水合物资源前景。为全面挖掘天然气水合物存在的信息及证据,在该海域开展 OBS 地震调查。

本文针对 OBS 海面放炮海底接收、接收点稀疏等特点,采用有别于常规海洋拖缆资料和 OBS 单节点处理的方式对调查区的 OBS 数据进行共反射点偏移成像处理,最终获得 PP 和 PS 的速度结构和偏

移成像成果。在此基础上进行纵横波联合反演,获得调查区纵波阻抗、横波阻抗剖面以及纵横波速度比,综合分析成像与反演结果,进一步确定了水合物储存在有利位置及游离气存在位置。

1 OBS 资料采集

调查区位于琼东南海域,布设 7 条测线,OBS 投放测线两侧各平行采集 3 条测线,测线间隔为 50 m,测线长度为 20 km,采用双震源放炮,放炮间隔为 25 m,激发震源为 GI 枪,容量为 10 160 cm³,工作压力为 13.79 MPa,采样率为 2 ms。共投放 30 个 OBS,OBS 节点间距为 400 m,采样率为 2 ms,记录长度为 8 s,回收 27 个,第 3、6、19 号节点在回收过程中丢失。调查区海底地形相对平坦,水深约为 1 400~1 500 m 之间。图 1 为 OBS 及采集测线布设图。

2 成像处理关键技术

OBS 成像处理,有别于常规的拖缆多道资料处理和单节点 OBS 处理方式,本文基于 geovation 软件

收稿日期:2019-10-23;修回日期:2020-10-07

基金项目:广东省自然资源厅项目(GDNRC[2020(45)]);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(2019-2021);中国地质调查局地质调查项目(DD20190224)

作者简介:徐云霞(1985-),女,高级工程师,硕士,主要从事海洋地震资料及 OBS 资料处理工作。Email:xuyx2013@126.com

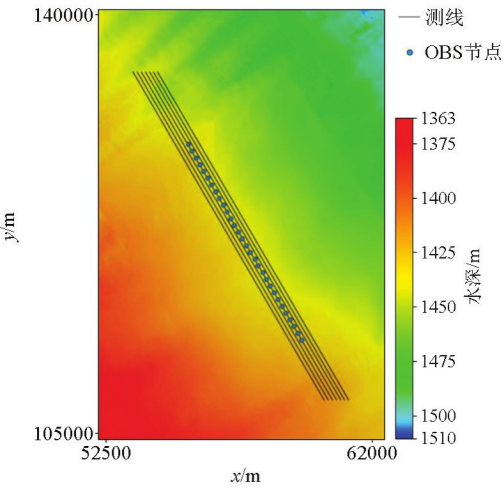


图 1 OBS 及采集测线布设示意

Fig.1 The figure of OBS and acquisition line

对 OBS 数据进行重定位、波场分离、镜像偏移、RT 旋转、转换波偏移等处理,图 2 为 OBS 成像处理关键技术流程。

2.1 节点重定位

OBS 的投放方式为利用钢缆将 OBS 投放到预设位置海面上,然后脱开钢缆让其自由下沉,在自由下沉过程中受水流、海底地形等的影响,在海底的位置与海面投放位置会存在一定偏差,而 OBS 不具备海底位置记录功能,需要运用实际数据对海底 OBS 位置进行重定位处理^[5]。

利用 OBS 直达波,以投放位置与多波束测深为约束,进行走时反演获得 OBS 的正确位置^[6],利用水速 1 500 m/s 对各站点 OBS 直达波进行线性动校正,质控定位结果是否准确。如果定位结果准确,则直达波线性动校正后直达波会被校正到同一水平位置,否则会起伏不平。图 3 展示了重定位前后位置差异,重定位前后位置差异最大约为 210 m,最小差

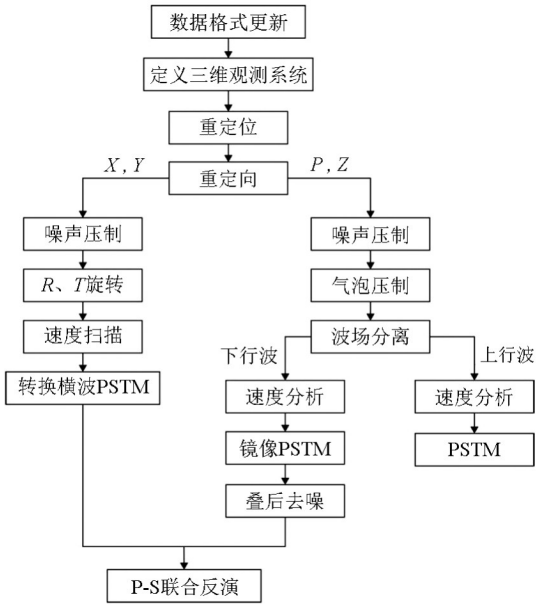


图 2 OBS 成像处理关键流程

Fig.2 The main technology of OBS imaging processing

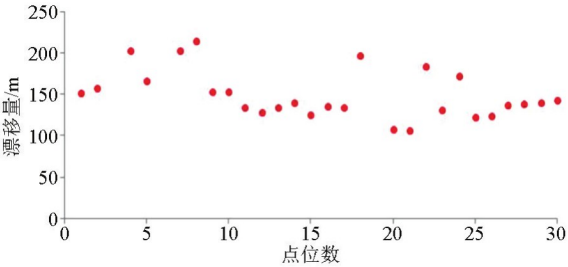


图 3 重定位前后位置差异

异约为 105 m,平均漂移量约为 150 m,对浅层水合物研究而言,该漂移量对成像的影响不可忽略。图 4 展示 OBS 投放测线重定位效果,将直达波用水速校正到 200 ms 位置,重定位后,所有炮点直达波被校正到同一水平位置,定位准确。

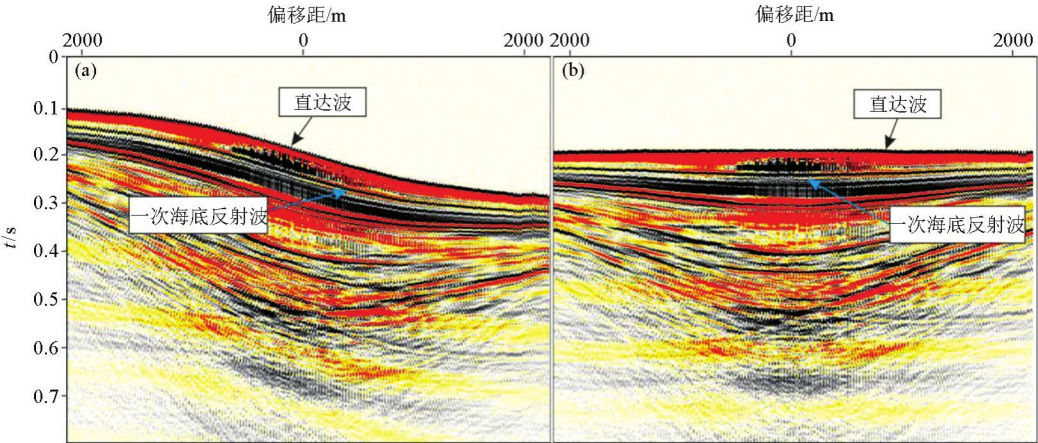


图 4 节点重定位前(a)后(b)效果

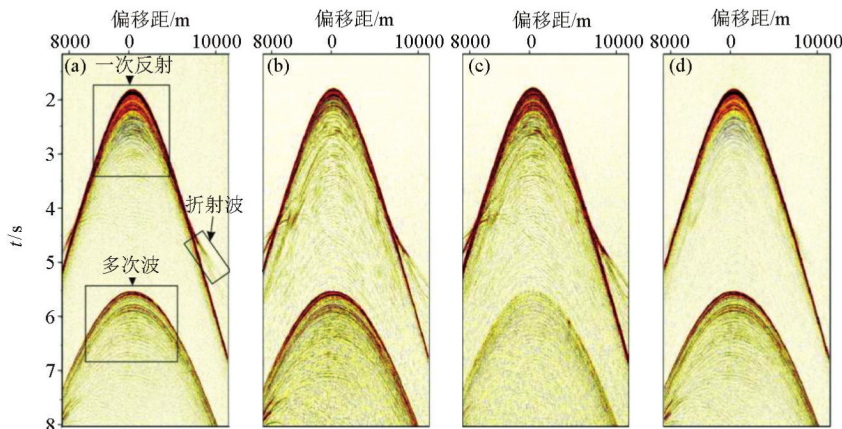
Fig.4 The result of reposition before(a) and after(b)

2.2 波场分离

地震波从地层传播到海底或者从海面传播到海底后即刻反射的信号称为上行波,包括一次波和微曲多次波;地震波从海面传播到海底,直接被检波器接收的称为下行波,主要指鬼波。OBS 检波器的水检分量 P 和陆检分量 Z 对上、下行波具有不同的响应特征:对上行波而言,二者极性相同;对下行波而言,二者极性相反^[7-8]。基于此,可以通过水陆检合并的方式将波场分为上行波场和下行波场,但两分量的仪器响应以及与介质的耦合性不同,导致在能量和频率上均存在差异。在实际处理过程中,以水

检分量为期望输出,基于自相关函数方差模最小原理求取标定因子并对陆检分量进行能量和相位匹配^[9-10],将匹配后的水检 P 分量与陆检 Z 分量求差获得下行波场;利用交叉鬼波化双检合并技术^[11]获得上行波场。

检验波场分离效果的途径主要有两种:①上行波场中一次能量加强,多次波能量减弱,而下行波场中特征反之;②折射波只存在于上行波场中。图 5 为波场分离效果图,分析图 5 的上行波场与下行波场中的一次反射、多次波以及折射波可知,本次获得了较好的波场分离结果。



a— P 分量;b—标定后 Z 分量;c—上行波;d—下行波
a— P component;b—calibrated Z component;c—up going field;d—down going field

图 5 波场分离效果

Fig.5 The result of the wave field separation

2.3 纵波镜像偏移成像

镜像偏移是利用鬼波进行成像的技术^[12-14]。OBS 采集投放的接收点稀疏,采用密点放炮、稀疏点接收的观测方式,稀疏的接收点导致成像照明范围受限,利用一次反射波成像时,在深度小于检波点间隔的区域,尤其是海底以下浅部反射层无法成像。经过水陆检合并处理可以将 OBS 数据分为上行波场和下行波场,下行的鬼波与一次反射信号具有相同的震源,仅有在介质中的反射路径这一差异,因此下行的鬼波相对一次波具有更宽的成像范围,能提供更多的关于地下介质的信息^[15]。因此,针对 OBS 反射叠加成像,提出利用下行波进行镜像偏移成像。

图 6 为上、下行波反射偏移成像结果对比,图 6a 为上行波偏移成像剖面,上行波因没经过海底反射不能进海底成像;且由于照明范围窄,在海底以下深度小于 OBS 节点间距的范围反射层成像不连续,信噪比与分辨率较低,节点丢失对成像影响较大。图 6b 的下行波镜像偏移成像,能很好地弥补上行波成像的不足,海底成像清晰,浅层反射层位连续性

好,纵向层位分辨率相对较高,成像模糊带等特征清晰。

2.4 重定向与极化旋转

重定向处理利用 P 波初至矢量轨迹图确定检波器的方向,分析 X 和 Y 水平分量记录到的压缩直达波的粒子运动方向。具体实现过程是,根据 OBS 直达波模拟一个简单的各向同性介质模型的初至进行计算,与实际 OBS 直达波在最小二乘准则下对描述检波点方向的检波器进行欧拉矩阵重构^[16],使得不确定方向的陆检 X 、 Y 、 Z 三分量数据分别指向直角坐标系的东、北以及垂直向下 3 个方向^[17],保证 X 、 Y 分量的能量主要为横波。极化旋转的目的是使得 X 、 Y 分量上接收到的横波转换为径向 R 分量和切向 T 分量,而转换横波的能量主要集中在 R 分量上。通过 X 和 Y 坐标算出的理论炮检点方向进行对比。

图 7 为极化旋转前后转换横波各分量能量分布对比图。旋转以前, X 、 Y 分量中均有较强的横波能量,旋转以后,横波能量主要集中在 R 分量中, T 分

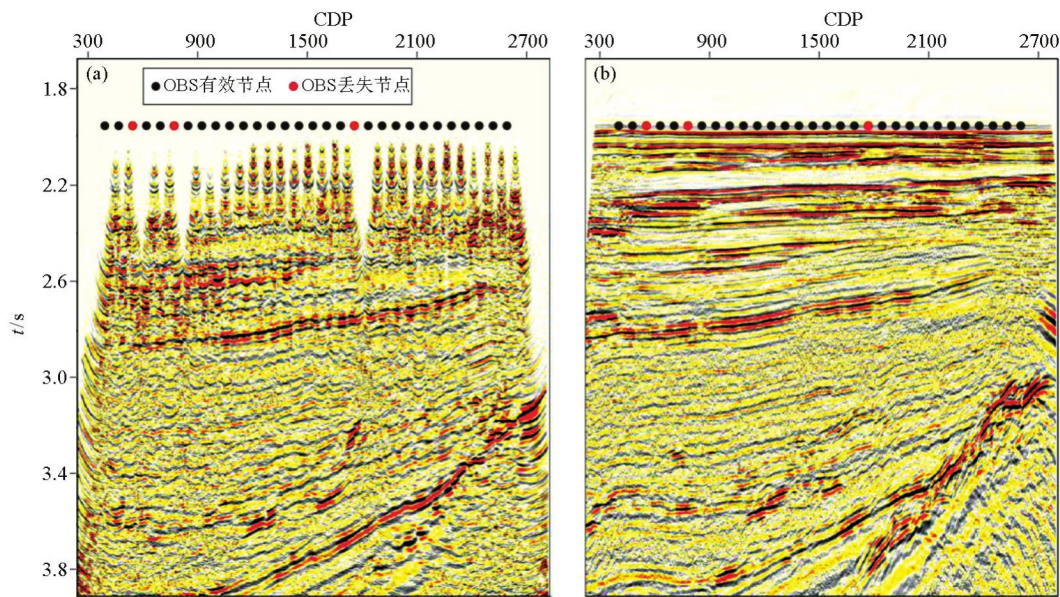


图 6 共反射点上 (a)、下行波 (b) 偏移成像
Fig.6 The result of CRP imaging with up going (a) and down going (b)

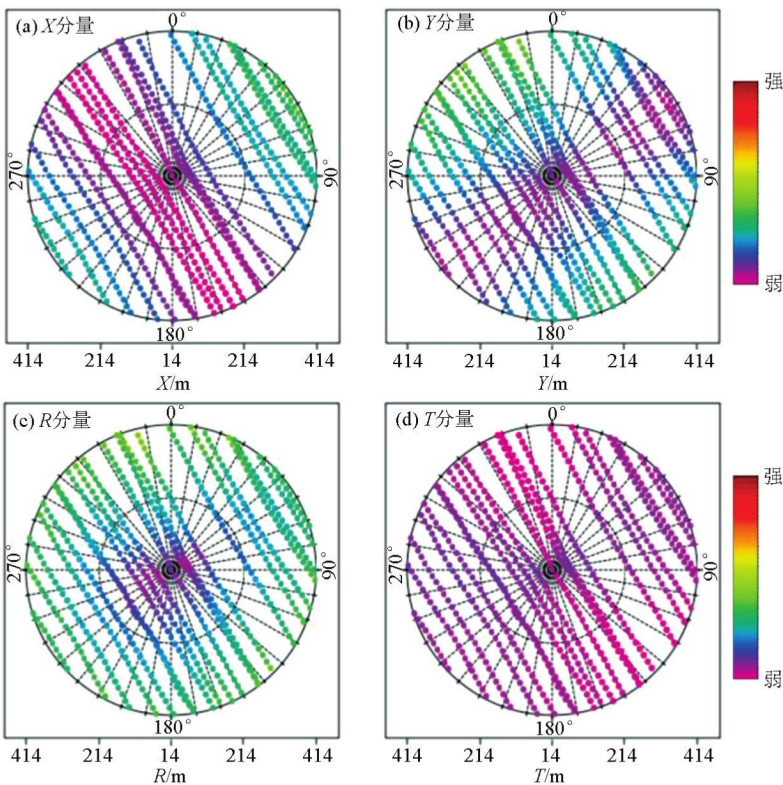


图 7 极化旋转效果
Fig.7 The result of polarization

量能量很小。不做各向异性分析时,对转换波的偏移成像主要针对 R 分量。

2.5 转换横波偏移成像

转换波偏移成像不同于纵波偏移成像^[18],本次成像基于 geovation 软件,除道集外还需有纵波速度、垂直 γ 、转换波速度参与计算,其中纵波速

度来自于前期的 PP 处理,垂直 γ 与转换波速度分别对应式(1)、式(2):

$$\gamma_0 = \left(2 \times \frac{t_{ps}}{t_p} - 1 \right) \times 1000, \tag{1}$$

$$v_{ps} = \sqrt{v_p / v_s}, \tag{2}$$

式中: γ_0 为垂直 γ , t_{ps} 为转换波旅行时, t_p 为纵

波旅行时, v_p 、 v_s 分别为纵波速度和横波速度。由式(1)、式(2)可知,垂直 γ 与转换波速度均与纵波速度与横波速度相关,已知纵波速度,本文通过时空变的横波速度扫描,获得对应的垂直 γ 和转换横波速度,其中时空变的控制点通过纵波镜像偏移成像剖面确定。

图 8a 与图 8b 分别对应最终的 γ 场与转

换横波速度场,时空变的扫描结果更接近实际地质构造特征,为转换横波偏移成像提供保证。图 9 为转换横波偏移成像结果,转换横波同样不能进行海底成像,且由于照明范围比纵波上行波小的原因,海底以下浅层同样不能进行良好成像,但总体构造趋势与纵波成像特征一致。可将纵波成像结果与转换横波成像结果进行联合解释。

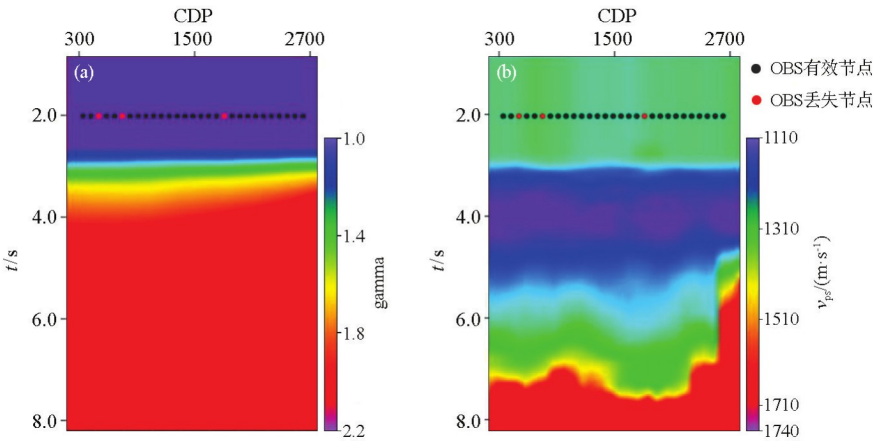


图 8 γ (a) 及 v_{ps} 场(b)
Fig.8 The section of γ (a) and v_{ps} (b)

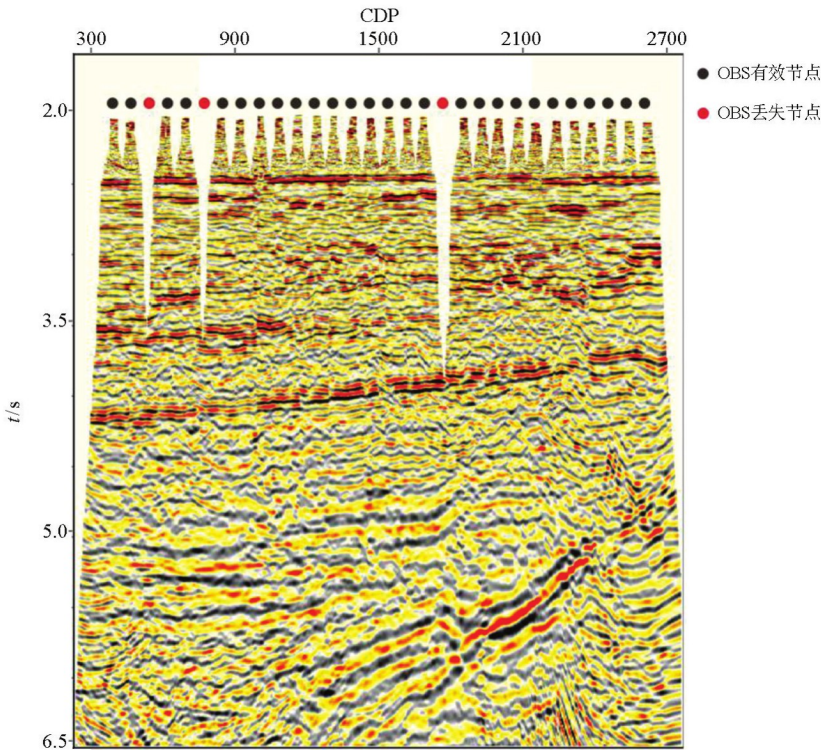


图 9 转换横波偏移成像
Fig.9 The imaging result of PS

3 应用

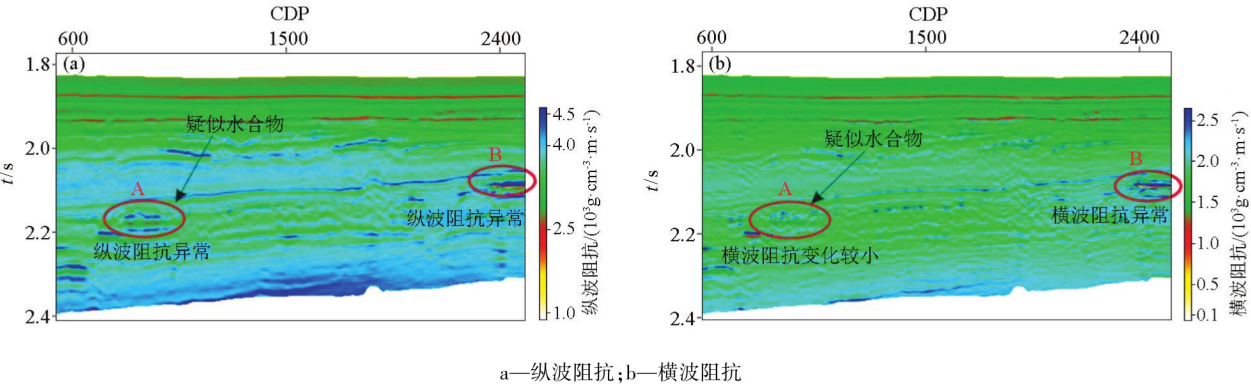
BSR 为高速与低速的分界面,利用波阻抗反演

能很直观地获得高阻抗与低阻抗异常区域,能直观地对水合物的分布区域进行刻画^[19-20],但仅利用纵波进行反演存在一定的多解性。转换横波信息是相对于常规海洋多道地震勘探而言最大的优势,能够

提供横波速度,获得横波剖面,从而对纵横波信息进行联合反演,减少反演的多解性,提高对含水合物区域解释的精度。

地层含天然气水合物后会引引起纵横波速度的增加,与周围地层形成较大的波阻抗差^[21]。当 BSR 下方含有游离气时,纵波阻抗会减小;由于含气对横波速度影响较小,因此,含气对横波阻抗影响较小。在 OBS 纵波镜像叠加剖面利用统计法提取地震子波,并结合纵波速度对纵波数据进行叠后波阻抗反演,获得如图 10a 所示的纵波阻抗反演结果,在海底以下 350 ms 左右有两处低阻抗异常区域 A、B,在水

合物解释中,低阻抗异常通常对应游离气特征,高阻抗异常对应 BSR。同样利用统计法在转换横波阻抗剖面中提取地震子波,结合转换横波速度对叠加剖面进行波阻抗反演,获得如图 10b 所示的横波波阻抗反演结果。横波阻抗异常与纵波阻抗异常不存在一一对应关系,A 区域横波具有与纵波阻抗相同的高阻抗值,但下方低阻抗异常不明显,B 区域仍有较明显的低阻抗异常。水合物通常具有高阻抗特征,而通常由于气源的因素,水合物下方会含有游离气,而通过联合分析发现,A 区域含游离气的可能性更大。因此,经过联合分析提高了解释的精度。



a—the sonic wave impedance;b—the shear wave impedance

图 10 联合反演结果

Fig.10 The joint inversion result

4 结论和认识

通过对 OBS 数据进行成像处理、反演解释等工作,获得以下几点认识:

- 1) OBS 采用 400 m 间距稀疏接收,导致照明范围窄,尤其海底以下深度小于接收间距的范围内,分辨率低,成像连续性差,通过水陆检合并、镜像偏移等方法,成功获得 OBS 纵波成像结果,成像信噪比高、连续性好;
- 2) 基于纵波速度、利用 R 分量数据,结合纵波镜像偏移成像结果,分层进行时空变扫描,获得垂直 gamma 和转换横波速度,基于此进行转换横波偏移,最终成果构造形态与纵波成像一致,可进行联合分析;
- 3) 综合分析纵波阻抗、横波阻抗、纵横波速度比等结果能提高对水合物相关的含游离气特征解释的精度,达到 OBS 调查的目的;
- 4) OBS 资料具有长偏移距、转换横波等优势,目前虽然已获得成像及反演结果,但资料中仍有很多待挖掘的地方,需后续进一步加强,提高 OBS 资

料的实际利用程度。

参考文献 (References) :

[1] Emin E P. Seismic imaging with ocean-bottom nodes: new acquisition designs and the atlantis 4C OBN survey [D]. Houston: University of Houston, 2012.

[2] 王彦林, 阎贫. 深地震探测的分辨率分析——以南海北部 OBS 数据为例[J]. 地球物理学报, 2009, 52(9): 2282–2290.

Wang Y L, Yan P. Lateral resolution analysis of deep crustal sounding: A case study on the data from ocean bottom seismometers in the northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(9): 2282–2290.

[3] Ruan A, Wei X. Crustal structure and fracture zone in the central sea basin of the South China Sea from wide angle seismic experiments using OBS [J]. Tectonophysics, 2016: 1–10.

[4] Stopin A, Hatchell P J, Beal E, et al. Results from the first OBS to OBS time-lapse survey in the Mars Basin [C]//SEG Annual Meeting, 2011.

[5] 徐云霞, 文鹏飞, 张宝金, 等. 琼东南海域水合物 OBS 资料成像处理关键技术[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(1): 418–425.

Xu Y X, Wen P F, Zhang B J, et al. Key technid of hydrate OBS imaging processing in Qiongdongnan area[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(1): 418–425.

[6] 杨正华, 常军. 海底电缆地震中二次定位法的探讨[J]. 石油物探, 2002, 41(3): 330–333.

Yang Z H, Chang J. Discussion on secondary position in OBC survey[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2002, 41(3): 330 – 333.

[7] Barr F J, Sanders J I. Attenuation of water-column reverberations using pressure and velocity detectors in a water-bottom cable[J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1989, 8(1): 1375.

[8] 薛维忠, 王淑荣, 杨晓艳, 等. 基于 Echos 处理系统的 OBC 双检资料处理技术[J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(s1): 23 – 26.

Xue W Z, Wang S R, Yang X Y, et al. OBC dual-sensor data processing on the Echos processing system[J]. *OGP*, 2013, 48(s1): 23 – 26.

[9] 高少武, 赵波, 高轩, 等. OBC 水陆检数据匹配技术[J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 50(1): 29 – 32.

Gao S W, Zhao B, Gao X, et al. A method for OBC dual-sensor data matching[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2015, 50(1): 29 – 32.

[10] 高轩, 弓小平, 高少武, 等. OBC 水陆检数据标定因子估算方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(1): 49 – 53.

Gao X, Gong X P, Gao S W, et al. Scale factor estimation for OBC dual-sensor data[J]. *OGP*, 2016, 51(1): 49 – 53.

[11] 周滨, 龚旭东, 高梦晗, 等. 海底电缆交叉鬼波化双检合并技术改进及应用[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(1): 49 – 52.

Zhou B, Gong X D, Gao M H, et al. An improvement of the dual-sensor summation technique for cross-ghosting from OBC and its application[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(1): 49 – 52.

[12] Grion S, Exley R, Manin M, et al. Mirror imaging of OBS data[J]. *First Break*, 2007, 25(11): 37 – 42.

[13] Hanafy S M, Huang Y, Schuster G T. Benefits and limitations of imaging multiples; Mirror migration[J]. *Leading Edge*, 2015, 34(7): 796 – 800.

[14] Shiraishi K, Gou F, Sato T, et al. Interferometric OBS imaging for wide-angle seismic data[J]. *Geophysics*, 2017, 82(5): 39 – 51.

[15] Dash R, Spence G, Hyndman R, et al. Wide-area imaging from OBS multiples[J]. *Leading Edge*, 2009, 74(6): 41 – 47.

[16] 朱明, 颜承志, 张卫卫, 等. OBS 技术在南海北部白云深水区储层含气性识别中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(4): 815 – 825.

Zhu M, Yan C Z, Zhang W W, et al. Gas bearing reservoir identification on OBS data in the Baiyun deep-water area, northern South China Sea[J]. *OGP*, 2017, 52(4): 815 – 825.

[17] 朱雷鸣, 吴晓平, 李建伟, 等. 直角坐标系的欧拉旋转变换及动力学方程[J]. *海洋测绘*, 2010, 30(3): 20 – 22.

Zhu L M, Wu X P, Li J W, et al. The rulers rotation and dynamic equation of rectangular coordinate system[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2010, 30(3): 20 – 22.

[18] 黄绪德, 杨文霞. 转换波地震勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.

Huang X D, Yang W X. The seismic exploration of converted wave [M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 2008.

[19] 杨睿, 吴能友, 雷新华, 等. 波阻抗反演在南海北部神狐海域天然气水合物勘探中的应用[J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 495 – 500.

Yang R, Wu N Y, Lei X H, et al. Impedance inversion and its application in gas hydrate exploration shenhu area, Northern South China Sea[J]. *Geoscience*, 2010, 24(3): 495 – 500.

[20] 沙志彬, 郑涛, 杨木壮, 等. 基于波阻抗反演的天然气水合物地震检测技术[J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 481 – 488.

Sha Z B, Zheng T, Yang M Z, et al. The seismic detecting technique on gas hydrate based on wave impedance inversion [J]. *Geoscience*, 2010, 24(3): 481 – 488.

[21] 孟大江, 文鹏飞, 张旭东. AVO 反演在琼东南海域天然气水合物识别中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(7): 46 – 55.

Meng D J, Wen P F, Zhang X D. Application of AVO inversion to gas hydrate identification to the qiongdongnan area, northern South China Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2018, 34(7): 46 – 55.

The application of OBS to the identification of hydrate in Qiongdongnan (southern Hainan) sea area

XU Yun-Xia^{1,2}, WEN Peng-Fei², ZHANG Bao-Jin², LIU Bin²

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou 510760, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

Abstract: OBS can enrich the information of the underground structure by obtaining the information of the P-wave and the PS wave, and can obtain the information related to the characteristics of the lithology and the fluid, and reduce the non-uniqueness in the interpretation of the hydrate. In this paper, according to the feature of OBS data, the authors obtained the PP and PS velocity information and common reflection point imaging by repositioning, redirection, wave field separation, mirror image migration, RT rotation, transversal wave migration and other techniques. On such a basis, the authors conducted the P-S wave joint inversion, obtained P-wave impedance as well as S-wave impedance. Through joint interpretation, the authors identified the true distribution area of free gas, and improved the recognition accuracy of fluid characteristics related to hydrates.

Key words: OBS; hydrate; mirror migration; PS migration; P-S wave joint inversion