

张子鑫, 邢磊, 杨慧良, 等. 基于多次波逆时偏移的海洋垂直缆探测精度模拟[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(7): 80-86.

ZHANG Zixin, XING Lei, YANG Huiliang, et al. Simulation study on the accuracy of ocean vertical cable detection based on multiples reverse time migration[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(7): 80-86.

基于多次波逆时偏移的海洋垂直缆探测精度模拟

张子鑫¹, 邢磊^{1,2,3}, 杨慧良^{2,4}, 李倩倩^{1*}, 张洪茂¹, 尉佳⁴, 刘鸿^{2,4}

(1 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 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; 3 海洋油气勘探国家工程研究中心, 北京 100029; 4 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237)

摘要: 海洋垂直缆地震勘探是一种将水听器垂直布放到水中的探测新技术, 与传统的拖缆地震勘探相比, 具有高分辨率和高信噪比的优势。针对海洋垂直缆观测系统的不同造成的地震照明密度差异特点, 采用多次波逆时偏移成像方法, 对 Marmousi 模型进行基于声波方程的垂直缆地震采集正演模拟和成像处理, 分析了垂直缆地震勘探方法的探测精度。结果表明, 当垂直缆位于勘探区域的中部时, 对勘探目标层的成像更为有利, 对含有自由表面多次波的地震数据进行成像能有效增加地下的照明范围, 使得高陡构造区域的成像结果更为清晰。该研究对海洋垂直缆地震勘探观测系统设计和高精度成像处理意义重大。

关键词: 垂直缆; 逆时偏移; 多次波; 正演模拟; 精度分析

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.105

0 引言

海洋垂直缆地震勘探是一种新型的利用反射波进行海洋地震勘探的方法, 其采用将水听器阵列垂直布放在海水中的方式来记录来自地下地层的反射地震波, 并对其进行成像处理, 以达到地下地质结构清晰成像的目的(图 1)。垂直缆地震勘探能够适应由于海面和水下设施等因素造成的采集环境复杂, 拖缆地震勘探不能有效实施的海域, 且得到的地震数据具有频带宽、入射角大、方位角广和多次波易于识别等突出优点^[1], 常用于局部地区的构造详查和大倾角复杂构造的地震成像。相比于传统的拖缆地震勘探, 海洋垂直缆地震勘探的成像

结果具有更高的分辨率和信噪比, 是继拖缆、海底电缆(OBC)、海底节点(OBN)、海底地震仪(OBS)等海洋地震勘探技术之后发展起来的又一新兴海洋地震勘探技术。ANDERSON 等^[2]采用相同的技术流程对墨西哥湾的拖缆和垂直缆地震数据进行处理分析后认为, 垂直缆地震勘探对微小构造的成像具有更高的精度; LEACH 等^[3]采用垂直缆勘探技术在苏格兰北部海域进行了地震资料采集, 获得了比拖缆地震更高品质的地震数据; WANG 等^[4]将垂直缆地震数据进行波场分离之后认为得到的数据满足各向异性反演的要求, 并提出了一套有针对性的垂直缆数据的处理方法。2009 年, 日本 JGI 公司研发了用于热液矿床地震勘探的垂直缆系统和相应的数据处理技术, 在 Biwa 湖进行了垂直缆地震数据采集, 并获得了高分辨率三维成像成果^[5]。HONDORI 等^[6]使用镜像偏移对垂直缆地震数据进行成像, 实现了对天然气水合物稳定带和似海底反射层的高分辨率成像。

中国垂直缆地震勘探研究起步较晚, 20 世纪末, 黄必铭等翻译了 WARD^[7]关于垂直缆地震勘探的文章, 总结了垂直缆地震采集相关技术; 陈晓琦

收稿日期: 2023-04-21

资助项目: 中央高校基本科研业务费(202262008); 国家重点研发计划项目(2022YFC2803503); 国家自然科学基金(4227655); 中国海洋大学研究生自主科研项目

第一作者: 张子鑫(1998—), 男, 在读硕士, 主要从事垂直缆数据处理方面的研究工作。E-mail: 1315342304@qq.com

* 通讯作者: 李倩倩(1985—), 女, 在读博士, 主要从事高分辨率海洋地震勘探方面的研究工作。E-mail: lqqbqt@163.com

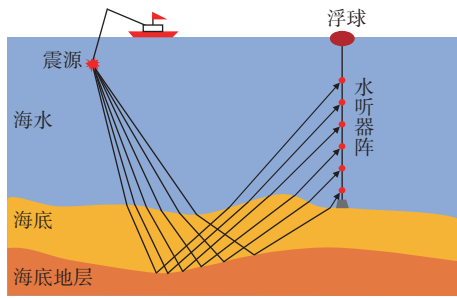


图 1 垂直缆地震采集方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of vertical cable seismic acquisition

等^[8]开展了垂直缆地震勘探不同类型观测系统的研究,总结了多种观测系统的设计方法;何勇等^[9]基于射线追踪理论,采用基于不规则单元的双线性走时插值和快速波前扩展的高精度和高效率方法,讨论了不同观测系统下垂直缆的照明精度;黄建宇等^[10]使用 OBS 作为接收设备,采用垂直缆勘探方式开展了地震数据的模拟采集实验,获得了天然气水合物的三维地震观测数据;2017 年,中国海洋大学刘怀山教授团队应用自主研发的海洋地震垂直缆采集设备,成功在南海神狐海域 2 250 m 水深处完成了地震数据采集工作,获得了天然气水合物的高清晰成像资料;安振芳等^[11]针对单条垂直缆和多条垂直缆的特点,设计了多样观测系统并分析了其对覆盖次数和照明范围的影响;尉佳等^[12-13]对垂直缆在海水中的姿态进行了分析研究,确定了垂直缆在海水中的姿态和倾斜角度范围,并通过正演模拟对海洋地震垂直缆在自由状态下的照明问题进行了研究。

海洋垂直缆采集观测系统的特殊性,使得其资料特点与拖缆地震等平面采集的地震数据存在较大的差异,海洋垂直缆地震数据成像精度分析是观测系统设计和成像处理方法选择的重要依据,对海洋垂直缆地震勘探方法研究至关重要。由于逆时偏移的思想更符合地震波的传播规律与成像机理^[14],使得逆时偏移被广泛应用到地震资料的成像处理中。王林飞等^[15]在对共散射点道集数据进行速度分析的基础上,实现了垂直缆数据的高精度逆时偏移成像,对天然气水合物的开发有重要的研究意义。因此,本文基于多次波逆时偏移成像方法,开展了海洋地震垂直缆数据和拖缆数据成像精度的对比,分析了垂直缆勘探不同观测系统对地下地质结构成像精度的影响,以探讨垂直缆地震勘探最佳观测系统设计和成像处理技术。

1 多次波逆时偏移

1.1 逆时偏移原理

逆时偏移(RTM)成像技术是以双程波动方程为基础,通过对地震波场沿着与时间相反的方向进行波场外推,而后根据不同的成像条件进行叠加成像从而得到最终偏移结果的成像技术。这种偏移方法与传统的单程波偏移方法相比,其成像精度受地层倾角的影响更小,在高陡构造成像甚至垂直断层成像方面具有显著的优势,并且可以对各种特殊波进行成像处理,包括棱柱波和散射波等^[16]。逆时偏移技术以双程波动方程为基础,与传统的单程波偏移方法相比,其运算量更大,计算速度更慢,且运算过程中需要开辟更大的数据存储空间。

逆时偏移成像处理主要包括以下 3 个方面(图 2):

(1)通过地震数据正演计算,得到沿着时间轴正向传播的地震波场,并对不同时刻的地震波场的值进行记录和保存;

(2)将地震记录作为最后时刻的波场,采用沿时间轴逆向延拓的方式,对之前各个时刻的波场进行重建,得到检波波场;

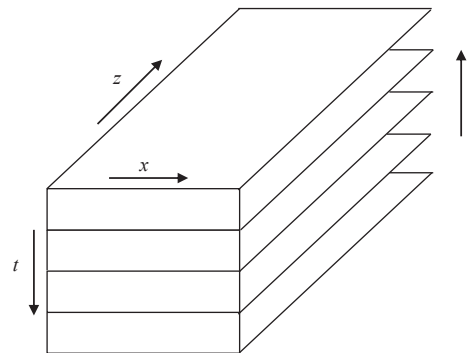
(3)应用前两步得到的震源波场和检波波场,对同一时刻的 2 种波场在合适的成像条件下进行互相关计算,叠加得到最后的成像结果。

二维声波方程为:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中: u 为地震波场;

t 为时间;



x 表示水平方向的偏移距; z 表示垂直方向的偏移距; t 表示时间

图 2 逆时偏移示意图

Fig.2 Schematic diagram of reverse time migration

v 为地震波的传播速度。

应用高阶有限差分波动方程正演模拟公式进行逆时外推,用公式可以表示为:

$$u_{i,j}^{k-1} = 2u_{i,j}^k - u_{i,j}^{k+1} A_x^2 \left[\sum_{l=1}^N a_l (u_{i+1,j}^k + u_{i-1,j}^k) + a_0 u_{i,j}^k \right] + A_z^2 \left[\sum_{l=1}^N a_l (u_{i,j+1}^k + u_{i,j-1}^k) + a_0 u_{i,j}^k \right] \quad (2)$$

式中: $A_x = \frac{v\Delta t}{\Delta x}$; $A_z = \frac{v\Delta t}{\Delta z}$; $u_{i,j}^k = u(i\Delta x, j\Delta z, k\Delta t)$; a_l 为差分系数。

在计算过程中,由于计算区域不能无限大,故震源波场和检波波场不能无限延拓,需要人为设置边界进行截断处理,否则会得出错误的结果。在逆时偏移过程中,还需对成像条件进行选择,包括互相关成像条件、激发时间成像条件和振幅比成像条件等。为了消除震源对成像结果产生的影响,应用震源一致性互相关成像条件可以得到:

$$I(x, z) = \frac{\int_0^{T_{\max}} S(x, z, t) R(x, z, t) dt}{\int_0^{T_{\max}} S^2(x, z, t) dt} \quad (3)$$

式中: $S(x, z, t)$ 和 $R(x, z, t)$ 分别为震源波场沿时间轴的正向延拓和检波波场在逆时检波方向上的反向外推。

然而,逆时偏移在进行波场外推的过程中,波场遇到反射界面会产生背向反射,从而产生一些低频噪声,所以成像过程中需要同时对低频噪声进行处理。

WHITMORE^[17] 最先提出了逆时偏移的基本思想:发生在空间里的事件必须依赖于时间这个要素才能存在,然而时间在物理学中是不可逆的,但是在数学中时间是可逆的。在垂直缆逆时偏移过程中,检波器规则排列于海面以下。图3为垂直缆时间一致性成像原理示意图。

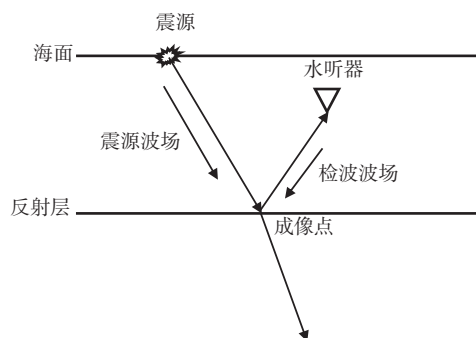


图3 时间一致性成像原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of time consistency imaging principle

1.2 垂直缆地震多次波逆时偏移

在使用海洋垂直缆进行海上地震数据采集时,由于海水-空气界面是良好的反射界面,采集得到的地震数据中含有大量的多次波,而多次波长期以来被人们当作是干扰波来进行压制。然而,与一次反射波相比,多次波具有照明范围广、反射角度小等优点,因此,将多次波应用于逆时偏移中,可以有效地增加地下照明范围,并进一步提高成像质量。而在垂直缆地震数据中,自由表面相关多次波发育,在成像过程中使用的多次波为自由表面相关多次波。

图4为垂直缆数据多次波逆时偏移成像示意图。对于其中一个远偏移距炮点 S_1 , 当使用一次反射波进行逆时偏移成像时,通过对 S_1 处产生的正传波场与接收点 R 处的逆时外推波场进行互相关,即可得到 f_1 处的成像结果。同理,对于一个近偏移距炮点 S_2 , 同样可以得到 f_2 处的成像结果。当 S_1 处产生的地震波经过海面多次反射传播到 R 处时,其路径可以表示为 $S_1 f' S_2 f_2 R$ 。而多次波传播时间大于一次波,对在 R 处接收到的地震记录进行逆时延拓得到的波场与将 S_1 处的正传波场进行互相关,就可以得到 f' 处和 f_2 处的成像结果,相较于一次波增加了地下的照明范围。

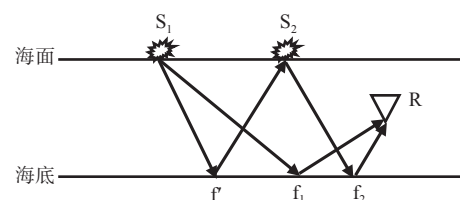


图4 多次波逆时偏移成像示意图

Fig.4 Schematic diagram of multiples reverse time migration imaging

垂直缆地震勘探的优势主要体现在以下几个方面:

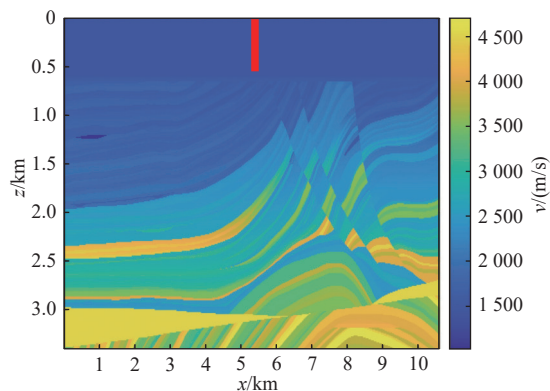
(1) 由于水听器距离勘探目标较近,深水区域的背景噪声较常规方法低,可以实现勘探工区边界处的高分辨率三维地震成像。

(2) 垂直缆地震勘探的反射点呈几何分布,降低了垂直缆地震数据上下行波分离的难度,对近海底地层具有很好的成像效果。

(3) 垂直缆采集时,其底部使用水泥块等重物固定在海底,水听器悬浮在海水中,可以有效避免传感器与海底耦合不好的问题。

2 海洋垂直缆地震正演模拟

应用 Marmousi 速度模型进行垂直缆地震正演模拟与成像处理,进而研究分析垂直缆地震勘探对复杂构造的成像精度。Marmousi 模型速度结构如图 5 所示,模型左侧距离海底深度为 700 m 处的位置有一个速度为 1 028 m/s 的低速异常体。该模型的实际大小为 3 440 m×10 600 m,海水深度为 600 m,使用的计算网格间距为 10 m,一共有 344×1 060 个网格。其中检波点的位置位于 $x=5\ 300$ m 处,从上到下依次排列,深度从 0~600 m 逐渐递增,每 20 m 设置 1 个检波点,一共设置了 31 个检波点,如图 5 红色线条所示。炮点的位置位于海水表面即模型顶部边界,横向排列,从 10~10 600 m 每隔 10 m 放置 1 个炮点,一共 1 060 炮。正演模拟时使用的雷克子波主频为 25 Hz,采样间隔为 1 ms。基于有限差分法对声波方程进行计算,对左边界和右边界以及底部边界采用吸收边界进行计算,对顶部边界分别使用吸收边界和自由边界进行计算,从而得到不含自由表面多次波的地震记录和含自由表面多次波的地震记录。



红色短线表示垂直缆位置

图 5 Marmousi 速度模型示意图

Fig.5 Schematic diagram of Marmousi velocity model

当模型的顶部边界为吸收衰减边界时,地震波经过海底反射传播到模型顶部,能量基本被吸收,地震波不再经过反射之后向下传播;当模型顶部的边界为自由边界时,地震波经过海底反射传播到海水表面,地震波经过海面反射后继续向下反射形成多次波。图 6a 和图 6b 分别展示了不包含多次波和含多次波的垂直缆数据共检波点道集记录,当顶部边界为自由边界时,会有大量的表面相关多次波产生,它们也包含着地层的很多信息,这些多次波会使得地震记录更为复杂。

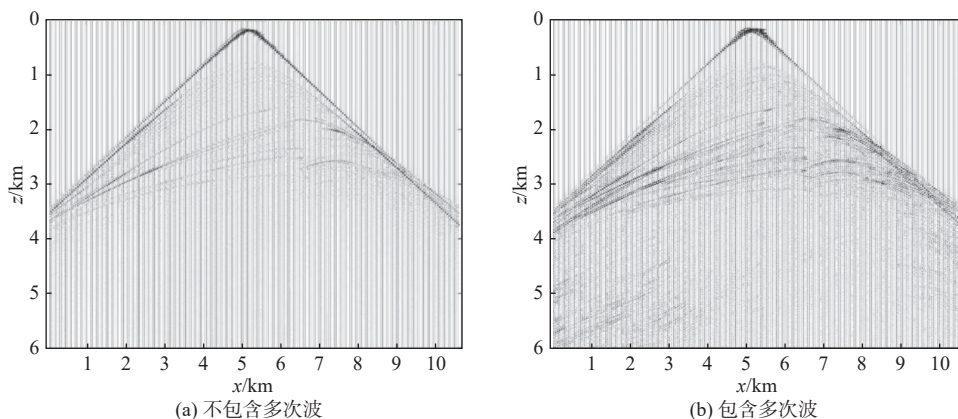


图 6 垂直缆共检波点道集记录

Fig.6 Record from the track set of vertical cable common detection point

3 成像精度分析

前文已经对 Marmousi 模型进行了正演模拟,接下来使用包含多次波和不包含多次波的地震数据进行分析,并对拖缆数据和垂直缆数据的成像结果进行对比。可以明显看出,垂直缆地震数据可以得到地层的更加有效清晰成像结果。

(1) 不含多次波成像结果对比

图 7 和图 8a 分别展示了不使用多次波的拖缆数据的逆时偏移成像结果和垂直缆数据逆时偏移成像结果,两图垂直缆数据的逆时偏移成像结果对比表明,在靠近垂直缆的区域成像结果优于拖缆数据的成像结果。垂直缆地震对 Marmousi 模型中异常体的成像较为清晰,图 8a 中显示的异常体的同相轴能量更强(红色箭头)。

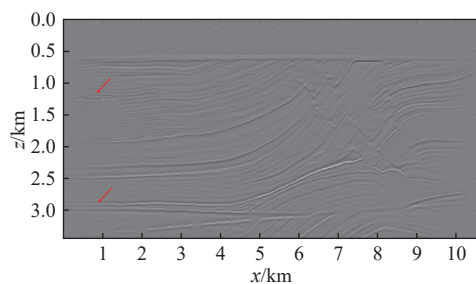


图7 不包含多次波的拖缆数据成像结果

Fig.7 Imaging results of towing cable data without multiples

对比图 8a 和图 7 中深部的成像结果,垂直缆地震对深部成像更为清晰,同相轴能量更强(图 8a 中红色箭头所指的同相轴)。然而,远离垂直缆区域的成像结果会逐渐变差,尤其是当目标体与垂直缆的水平距离 >6 km 的区域,能够有效成像的同相轴明显变少,在水平距离 >8 km 的区域甚至没有清晰同相轴,在这一部分区域,拖缆地震的成像效果优于垂直缆地震。出现此现象的原因是,当水平距离逐渐增大时,炮点距离水听器的位置越来越远,由于垂直缆的接收点在水中垂直分布,从震源激发的地震波经过海底地层的反射之后到达垂直缆接收点的地震射线较少,致使在远离垂直缆位置区域的地层成像结果较差。

图 9a 展示了当垂直缆位于模型中间位置时的没有多次波的逆时偏移成像结果,对比图 8a 可

以发现,该情况下的照明范围有了很大程度的改善,尤其是对于图 9a 中红色箭头所示区域,其成像结果的同相轴更加明显。与图 7 没有多次波拖缆数据成像结果相比,图 9a 的成像结果在红色箭头所示区域的成像结果也优于拖缆数据的成像结果。尤其是图 9a 中红色箭头所指示的浅层区域,垂直缆成像结果更好,同相轴更细。在距离垂直缆较远的区域,如 3 km 之前和 8 km 之后,由于垂直缆所能接收到的一次反射波变少,所以这两部分区域拖缆数据的成像结果优于垂直缆数据的成像结果。

图 10a 展示了位于垂直缆水平距离 10 400 m 区域的地下地层成像结果,该图所展示的成像结果与图 8a 所展示的成像结果类似,均是在距离垂直缆较近的区域成像结果优于拖缆数据的成像结果,尤其是对于一些浅部构造的成像结果,垂直缆数据的成像结果更好,同相轴更细,如图 10a 中红色箭头所示。对于深部的区域(2 km 以下)靠近模型边界的地方,垂直缆的成像结果也优于拖缆的成像结果,这是因为在模型的边界处,拖缆所能接收到的反射波较少。同理,在水平距离 <7 km 的区域,由于垂直缆独特的布设方式,使得其能接收到的地震射线有限,从而使得这些区域的成像变差,甚至不能有效成像。

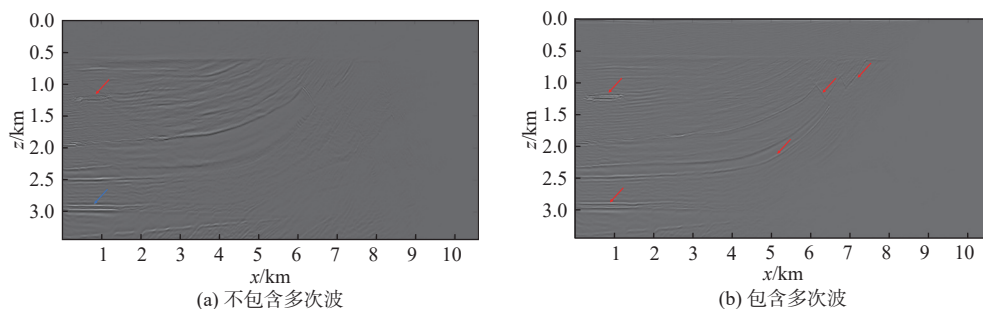


图8 垂直缆位于左侧的成像结果

Fig.8 Imaging results with vertical cable on the left

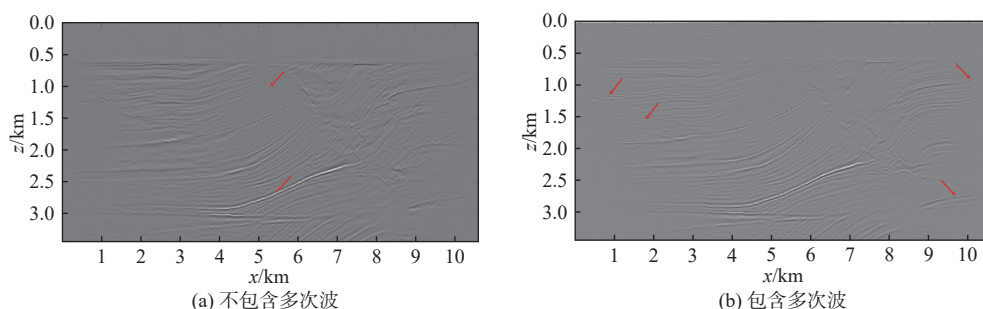


图9 垂直缆位于 5 300 m 处成像结果

Fig.9 Imaging results of vertical cable at 5 300 m

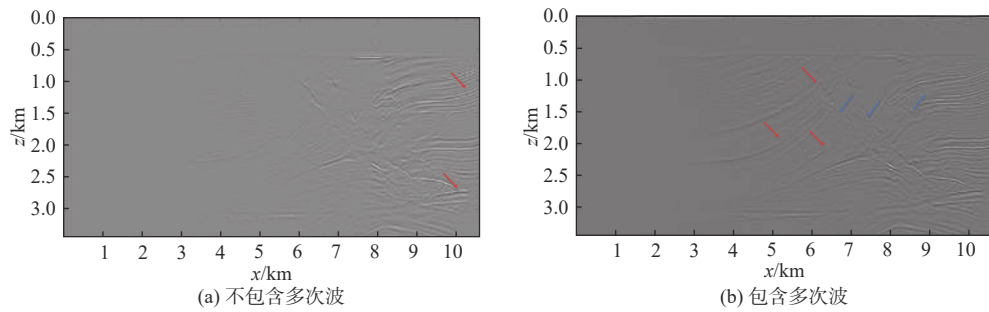


图 10 垂直缆位于 10 400 m 处成像结果

Fig.10 Imaging results of vertical cable at 10 400 m

(2) 含多次波成像结果对比

图 8b 表示含有多次波时且垂直缆位于模型最左侧的逆时偏移成像结果。与图 8a 进行对比,图 8b 的照明范围更大,如图 8b 中红色箭头所指示的同相轴和一些小的断层在只使用一次反射波成像的图 8a 的结果中并没有体现。在观测系统一样的情况下,由于多次波的传播路径更长,所以使用多次波进行逆时偏移成像时拥有更广的照明范围,可以更多地反映地下地质构造情况。故在进行垂直缆地震勘探时,对于一次波照明不足的区域,可以使用多次波进行成像,能对一次波的成像结果进行很好地补充。

图 9b 和图 10b 展示的是含有多次波的垂直缆逆时偏移的成像结果。与图 9a 对比,在图 9b 中红色箭头所示区域的成像结果更好,拥有了更广的照明范围,而且对于一些薄的地层能进行更高精度地成像。与图 10a 对比,图 10b 的结果同样有更广的照明范围,其中,蓝色箭头所示区域展示了使用包含多次波的数据对断层的成像结果更好,同相轴更清晰。

4 结论

应用 Marmousi 模型,采用垂直缆观测方式进行地震波正演模拟,得到包含多次波和不包含多次波的垂直缆模拟地震数据,并将垂直缆数据和拖缆数据的逆时成像结果对比,得到以下结论:

(1) 多次波成像能有效增加地下的照明范围,使得复杂构造区域的成像结果更为清晰。

(2) 对于近偏移距区域,垂直缆数据成像结果更好,而对于远偏移距区域,由于垂直缆不能接收到远偏移距的反射波,导致成像结果较差。

(3) 当垂直缆位于工区的中部时,可以同时垂直缆两侧近偏移距区域进行高精度成像;而垂直

缆位于工区边界处时,只能对其某一侧的近偏移距区域成像。垂直缆地震数据可以得到更加清晰准确的成像结果,可以对传统海洋拖缆地震勘探成像结果进行有效补充。

参考文献:

- [1] 王祥春,赵庆献,伍忠良.海洋垂直缆地震勘探技术[N].中国矿业报,2018-09-28(008).
- [2] ANDERSON J, SUKUP D, BOYD S, et al. 3-D vertical cable processing to obtain a pre-stack depth migrated image[J]. Seg Technical Program Expanded Abstracts, 1997, 16(1): 200-206.
- [3] LEACH P E. Strathspey vertical-cable seismic survey: a North Sea first [C]//Petroleum Geology of Northwest Europe. Proceedings of the 5th Conference, 1999, 82: 1235-1242.
- [4] WANG H. Seismic imaging and anisotropic inversion using vertical cable data[D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 2003: 1-249.
- [5] ASAKAWA E, MURAKAMI F, SEKINO Y, et al. Development of vertical cable seismic system[C]//74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012. European Association of Geoscientists and Engineers, 2012: 1-7.
- [6] HONDORI E J, KATOU M, TARA K, et al. Mirror reverse time migration using vertical cable seismic data for methane hydrate exploration[J]. *Geophysics*, 2019, 84(6): 1-58.
- [7] WARD J A. 黄必铭,译.垂直缆地震的价值[J].石油物探译丛,1998(5): 81-85.
- [8] 陈晓琦,张进,邢磊,等.浅谈海上垂直缆地震勘探[C]//中国地球物理学会.国家安全地球物理丛书(十):地球物理环境与国家安全.第十届国家安全地球物理学术讨论会论文集,2014: 220-225.
- [9] 何勇,张建中.海洋地震垂直缆观测系统的射线照明分析[J].CT理论与应用研究,2015,24(5): 689-700.
- [10] 陈晨,黄建宇,伍忠良,等.天然气水合物垂直缆地震系统设计与试验[J].电子技术,2018,47(2): 34-37.
- [11] 安振芳,张进,张建中.海洋三维 VC 观测系统优化设计[J].吉林大学学报(地球科学版),2018,48(1): 271-284.
- [12] 尉佳,康宇璇,冯京,等.利用海水平均声速进行海洋分布式垂直缆姿态校正[J].海洋地质前沿,2019,35(6): 57-63.
- [13] 尉佳,冯京,杨睿,等.海洋地震垂直缆在自由状态下的照明

- 情况[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(5): 33-40.
- [14] 陈可洋. 地震波逆时偏移方法研究综述[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(3): 153-159.
- [15] WANG L F, LIU H S, WANG Z, et al. Reverse time migration of vertical cable seismic data to image hydrate-bearing sediments with high resolution[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 751202.
- [16] 李振春. 地震叠前成像理论与方法[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2011.
- [17] WHITMORE N D. Iterative depth imaging by back ward time propagation[C]//53th Annual International SEG Meeting, 1983: 827-830.

Simulation study on the accuracy of ocean vertical cable detection based on multiples reverse time migration

ZHANG Zixin¹, XING Lei^{1,2,3}, YANG Huiliang^{2,4}, LI Qianqian^{1*}, ZHANG Hongmao¹, WEI Jia⁴, LIU Hong^{2,4}

(1 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China;

3 National Engineering Research Center of Offshore Oil and Gas Exploration, Beijing 100029, China;

4 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China)

Abstract: Marine vertical cable seismic survey is a new exploration technology that deploys hydrophones vertically into the water. Compared with traditional streamer seismic survey, it has the advantages of high resolution and high signal-to-noise ratio. In view of the different characteristics of seismic illumination density due to different marine vertical cable observation systems, the multiple reverse time migration imaging was used to conduct forward simulation and imaging process for vertical cable seismic acquisition based on acoustic wave equations for the Marmousi model, and the detection precision of vertical cable seismic exploration method was analyzed. Results show that when the vertical cable was located in the center of the exploration area, the imaging of the exploration target layer was most beneficial. Imaging seismic data that contain free surface multiples could effectively increase the underground illumination range, making imaging results clearer in high and steep structural areas. This research is of great significance to the design of marine vertical cable seismic exploration observation systems and high-precision imaging process.

Key words: vertical cable; reverse time migration; multiples; forward simulation; precision analysis