

张振波, 罗伟. 拖缆宽方位与双方位效果分析[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(3): 66-73.

# 拖缆宽方位与双方位效果分析

张振波, 罗伟\*

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518067)

**摘要:**为了改善珠江口盆地 PY4 注中深层地震成像,进行了双船拖缆宽方位地震采集试验,获得了满覆盖次数 1 680 次的地震数据。按照每  $15^\circ$  1 个方位宽度,划分了 24 个方位数据体对地震资料进行处理,并对不同方位宽度和正交双方位数据分别进行了叠加,得到了不同方位角宽度和不同覆盖次数的成果数据。分析后认为:①随着方位角宽度和覆盖次数的增加,地震成像效果得到显著改善;②在相同覆盖次数前提下,优势成像方位成像效果更好;③正交双方位成像效果介于 2 个方位之间,没有优势成像方位成像效果好。所以提高中深层地震成像效果最有效的方式是在目标优势成像方位增加覆盖次数。

**关键词:**观测系统;覆盖次数;宽方位;正交双方位

中图分类号:P631;P714 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2020.037

## 0 引言

我国海洋油气勘探正向深水、深层(双深)转移,同时主要地质目标也从常规中浅层构造圈闭转向岩性复合圈闭和中深层构造圈闭,对地震资料的成像要求大幅提高。同时,随着近年来电子技术的快速发展,海上定位技术和电缆控制技术得到改善,勘探成本开始降低<sup>[1]</sup>。目前,海上地震采集方式已经开始由原来的常规拖缆窄方位三维逐步转向宽方位采集和多方位三维采集。

常规海上拖缆三维地震采集一般采用单船、双源、多缆的观测系统(图 1)。这种观测系统的横向覆盖次数只有 1 次,即使拖缆数达到 16 条,在电缆长 6 000 m、间距 100 m 的情况下,纵横比也只有 0.125,是一种窄方位观测系统<sup>[2]</sup>。在有气云、盐岩、

侵入体或高陡断层等影响的复杂构造区,窄方位观测系统存在地震观测盲区,影响地震成像效果。

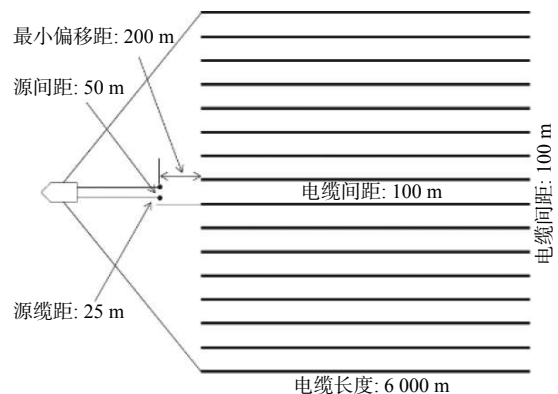


图 1 海上拖缆三维地震采集观测系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of offshore towing cable 3D seismic acquisition and observation system

海上拖缆宽方位地震采集采用多船、多源、多缆的观测系统(图 2),目的是获取观测方位、炮检距和覆盖次数分布尽可能均匀的三维数据体<sup>[3]</sup>。这种观测系统利用多船采集增大横向偏移距,减小地震观测盲区,提高地下复杂构造区照明度<sup>[4]</sup>。其优点是可以改善复杂地质体的成像<sup>[5]</sup>,可以通过分方位处理提高断层、裂缝的预测精度<sup>[6]</sup>。不足之处是需要使用多船,性价比相对较低。因此,宽方位地震采集设计时,在考虑满足地质要求的同时,也需要重点考虑观测系统的经济性。

海上拖缆多方位地震采集采用常规拖缆三维的采集方式,在 2 个或多个方位上进行观测。这种

收稿日期: 2020-04-16

资助项目:“十三五”国家重大专项“珠江口盆地陆缘深水区优质储层与流体识别地球物理关键技术”(2016ZX05026-003-007);中国海油重大科技专项课题“南海东部油田上产 2000 万吨关键技术研究”课题 1“珠江口盆地(东部)深水区大中型天然气田形成条件及勘探实践”(CNOOC-KJ135ZDXM37S201SHENHAI)

作者简介:张振波(1973—),男,正高级工程师,主要从事海洋地震采集处理解释及研究工作。E-mail: zhangzhib@cnooc.com.cn

\* 通讯作者:罗伟(1985—),男,高级工程师,主要从事海洋物探及地球物理技术方法的研究工作。E-mail: luowei8@cnooc.com.cn

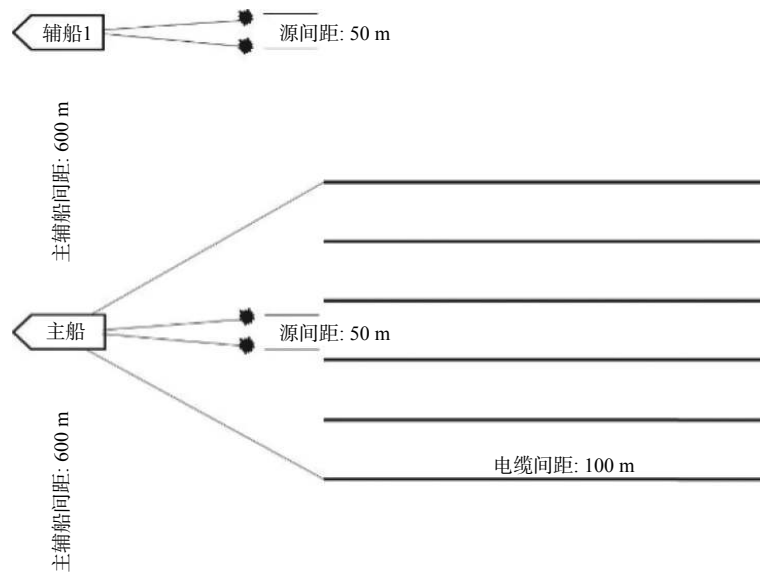


图 2 海上拖缆宽方位观测系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of wide azimuth observation system with towing cable at sea

观测系统在增加观测方位的同时,可以成倍增加覆盖次数,提高地下地质体的照明度。其优点是在地震资料处理中,可以利用高覆盖次数更有效地衰减多次波和随机噪声,提高资料信噪比,改善成像质量。其缺点是针对同一区块,需要进行 2 次以上采集,费用较窄方位采集会成倍增加;由于每次采集的方位不同,工区边界会存在大量不满覆盖区(图 3)。因此,多方位地震采集较适用于成熟勘探区的二次三维采集,将采集方向布置在有利于地质目标成像的优势方位。

### 1 试验采集方案

PY4 洼为珠江口盆地珠一坳陷西部的一个相对独立的小洼陷,其周围分别被恩平凹陷、西江凹陷及东沙隆起所包围,是一个东南断、西北超,呈 NE-SW 走向的箕状洼陷。该洼陷面积不大,烃源岩分布范围仅 450 km<sup>2</sup> 左右,但已经发现了多个油田和含油构造,从而证实了 PY4 洼为一个“小而肥”

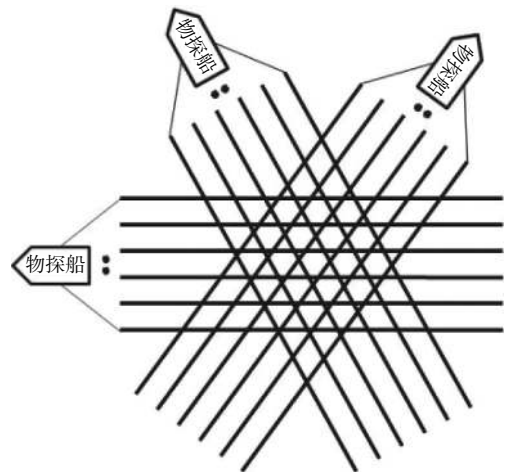


图 3 海上拖缆多方位观测系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of offshore towing cable multi-azimuth observation system

的富生烃洼陷。随着勘探进程向深层发展, PY4 洼中深层的潜力亟待挖掘。本次研究的工区内原有 2 个年度 3 批三维地震资料,采集参数都是针对中浅层地质目标设计(见表 1)。2 个年度地震资料的

表 1 PY4 洼老资料主要采集参数

Table 1 Main acquisition parameters of old data in PY4 Depression

采集年度/年	震源容量/in <sup>3</sup>	气枪压力/psi	震源深度/m	炮间距/m	缆数/条	缆长/m	缆距/m	缆深/m	道间距/m	记录长度/s	采样率/ms
1998	2 678	2 000	5	37.5	6	4 000	100	7	12.5	6	2
1998	2 678	2 000	5	37.5	8	3 000	100	7	12.5	6	2
2001	3 063	2 000	5	37.5	8	3 000	100	6	12.5	6	2

采集方向都是  $110^{\circ}/290^{\circ}$ , 枪深和缆深相差不大, 地震资料的频带范围相近。随着勘探程度的提高, 中浅层新近系构造目标越来越少, 勘探目的层转向中深层古近系, 原有地震资料已经不能满足勘探需求, 主要表现有: 洼陷内部文昌组信噪比低, 反射特征弱, 同相轴杂乱, 复杂断裂成像差, 基底反射不清楚(图4)。

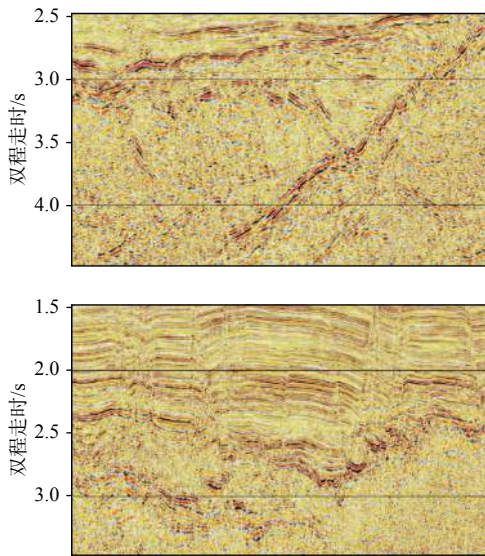


图4 PY4 注老资料剖面  
Fig.4 Old data profile of PY4 Depression

本次试验的主要目标为: 以古近系文昌组和恩平组为主要目的层, 中浅层兼顾古近系珠海组和新近系珠江组; 落实主要目的层圈闭形态、范围和幅度等构造要素, 查清各断层的位置、长度和空间展布, 分析发育史; 落实洼陷基底位置和形态, 结合区内钻井、测井、测试及地质研究成果, 深入研究文昌组生烃地震响应特征, 建立生烃地震响应模式, 圈定富烃范围, 划定有利勘探方向; 开展精细构造解释、相带划分、储层预测等工作, 刻画有力储层空间形态, 圈定含油砂体分布范围, 优选勘探目标和井位。主要目的是寻找经济高效且能得到高质量地震资料的采集方式。

进行宽方位采集设计时, 主要考虑了以下因素:

(1) 主要目的层埋藏深介于  $3\ 000 \sim 4\ 500\ \text{m}$ , 基底深度约  $5\ 000\ \text{m}$ 。要提高深层地震资料信噪比, 改善成像质量, 在设计观测系统时, 既要考虑古近系文昌组的有效覆盖次数, 也要考虑基底的成像效果。这就要求既要缩小炮间距, 也要增加电缆长度。基底时间深度在大约  $6\ \text{s}$  的位置, 要接收到入射角  $30^{\circ}$  内的地震波, 根据公式

$$T = T_0 / \cos(30^{\circ}) \quad (1)$$

式中:  $T$  为记录长度,  $\text{s}$ ;

$T_0$  为目标时间深度,  $\text{s}$ 。

考虑后期资料处理需要后, 将记录长度确定为  $8\ \text{s}$ 。最小炮间距应该满足公式。

$$SI = V \times (T + 1) \quad (2)$$

式中:  $SI$  为炮间距,  $\text{m}$ ;

$V$  为船速,  $\text{m/s}$ 。

式(1)中  $T$  是地震记录仪预留的准备时间。按照最低船速 4 节, 即  $2.06\ \text{m/s}$  计算, 炮间距应  $> 18.54\ \text{m}$ 。考虑面元均匀, 将炮间距确定为  $18.75\ \text{m}$ 。要保证能接收到入射角至少为  $30^{\circ}$  的目的层信息, 最大炮检距应满足公式

$$X_{\max} > 2 \times H \times \tan(30^{\circ}) \quad (3)$$

式中:  $X_{\max}$  为最大炮检距,  $\text{m}$ ;

$H$  为目的层深度,  $\text{m}$ 。

综合考虑动校拉伸和多次波压制后, 将电缆长度定位  $6\ 000\ \text{m}$ 。

(2) 主要目的层段断裂复杂、成像差, 次要目的层段断层存在断层阴影, 构造落实不准确。这就需要优化地震采集方向, 提高照明强度。选择  $20^{\circ}/200^{\circ}$  作为地震采集方向, 既与已有地震采集方向垂直, 有利于后期地震资料处理中充分利用现有资料, 又基本与主要断裂走向垂直, 有利于复杂断裂成像。同时利用宽方位地震采集增加横向覆盖次数, 提高照明强度。

(3) 非纵距的求取、辅助震源偏移距的确定, 在考虑满足地质需求的同时, 要满足海上作业安全要求。线束滚动方案和航次的制定, 要考虑经济性<sup>[7]</sup>。根据海上作业安全规定, 辅助震源船与主船最近电缆之间的距离不得  $< 500\ \text{m}$ 。确定使用 6 缆地震船进行作业后, 按照常规地震采集参数电缆间距  $100\ \text{m}$  计算, 为保证面元覆盖均匀性, 主船和辅船之间的距离应为  $300\ \text{m}$  的整数倍。因主要目的层在中深层, 最小非纵距可以适当加大, 确定主船与辅船之间的最小距离为  $1\ 200\ \text{m}$ , 得到最小非纵距  $925\ \text{m}$ 。考虑储层预测、烃类检测等研究工作的需要, 观测系统要使得主要目的层覆盖次数、炮检距、方位角分布均匀合理, 以满足地震反演、AVO 分析等物探技术应用的需要, 设计了 5 组横向采集, 得到最大非纵距  $3\ 875\ \text{m}$ 。

最终确定采取的试验方法如下:

采集方向  $20^{\circ}/200^{\circ}$ , 与老资料正交。采用共面元线 5 组 20 次横向覆盖采集方式(图 5)。主船(拖

缆船)和辅船(震源船)分别位于共面元线两侧,距离共面元线等距。5组横向采集距离分别为600、900、1200、1500和1800m,每组按照主船在左侧和右侧、施工方向20°和200°进行组合采集,最终每条共面元线需要采集20次。

主要采集参数见表2。电缆间距100m,道间距12.5m,采集面元6.25m×25m;电缆长度6000m,炮间距18.75m双源交替激发,纵向覆盖次数80次,总覆盖次数达1600次;最大纵距6173m,最大非纵距3875m,纵横比0.628,达到宽方位标准<sup>[8]</sup>(图6a)。

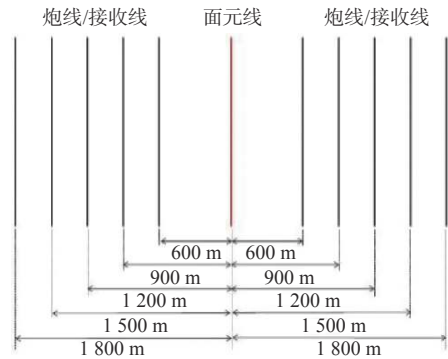


图5 PY4 注宽方位试验观测系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of wide azimuth test observation system in PY4 Depression

表2 PY4 注宽方位试验主要采集参数

Table 2 Main acquisition parameters of wide azimuth test in PY4 Depression

震源容量/in <sup>3</sup>	气枪压力/psi	震源深度/m	炮间距/m	缆数/条	缆长/m	缆距/m	缆深/m	道间距/m	记录长度/s	最大纵距/m	最大非纵距/m
4 130	2 000	7	18.75	6	6 000	100	7	12.5	8	6 173	3 875

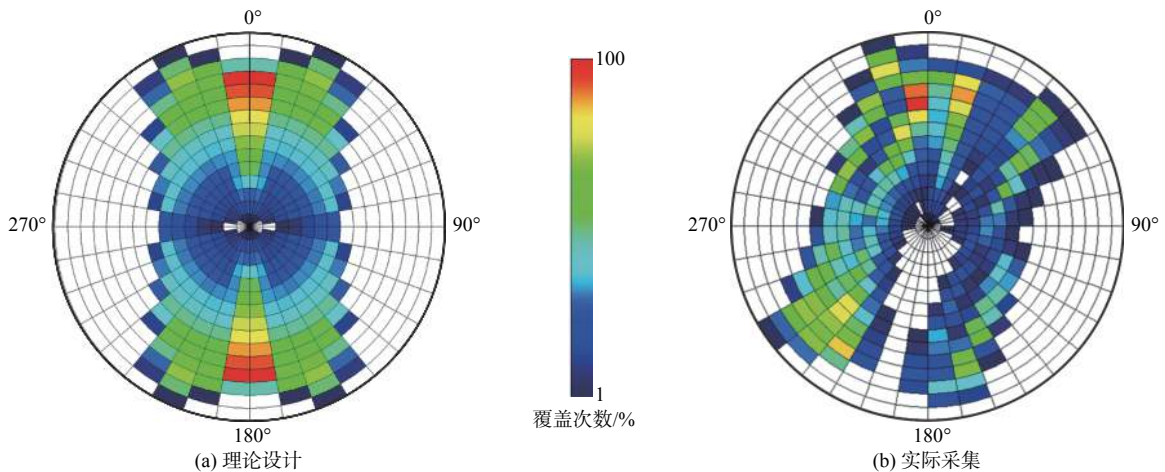


图6 PY4 注宽方位试验方位角玫瑰图

Fig.6 Rose diagram for wide azimuth test

## 2 效果分析

PY4 注宽方位试验作业期间受到了恶劣海况影响。浪高超过3m,物探船横摇超过5°,频繁的闪电,以及连续的暴雨,都对主船和辅船间的无线通讯造成较大干扰。实际采集结果,有少部分偏移距没有完全达到设计覆盖次数(图6b)。

本次拖缆宽方位地震数据处理流程(图7)中使用了4项特色技术<sup>[9]</sup>:①分方位数据体优化选取技术,优选与地质目标匹配的方位角划分方案,同时保证各方位角内地震数据可插值性;②分方位面元规则化技术,保证各方位角内数据分布均匀,为道集优化打好基础;③方位各向异性速度校正技术,消除方位各向异性影响,提高不同方位道集成像一

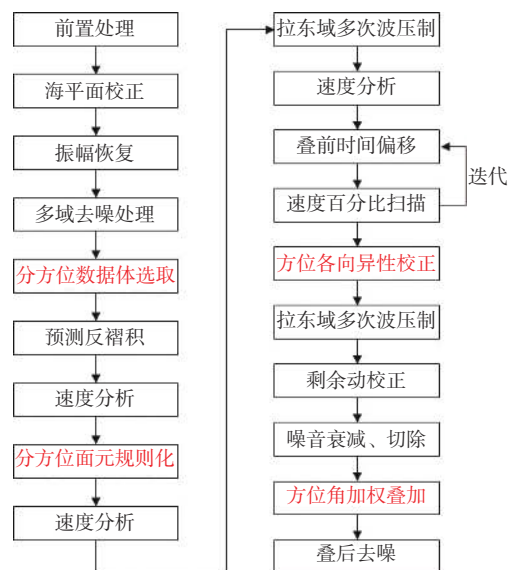


图7 PY4 注宽方位数据处理流程图

Fig.7 Wide azimuth data processing flow chart

致性;④分方位优化叠加技术,利用道集互相关选取各方位道集叠加加权系数,提高全方位地震成像质量。

考虑与地质目标匹配和地震数据可插值性原则,以-2.5°为起点,按照每15°一个方位,将地震数据分成了24个方位体。分方位数据体优化选取和面元规则化处理,确保了部分偏移距缺失少量数据不影响地震数据的最终成像和不同方位的成像效果对比。

为了对比不同方位角宽度的地震成像效果,首先以12.5°为中心,方位角每增加30°对地震数据进行一次叠加(图8)。剖面显示,随着方位角的加宽,绿色框标出的断层阴影逐渐消失,断面也越来越清晰。尤其是图8a右侧绿色框中断层阴影造成的假断层和同相轴下拉现象,在方位角宽度达到180°时已经完全消失。蓝色框内的洼陷内幕,随着方位角宽度增加成像变差。

然后以102.5°为中心,方位角每增加30°对地

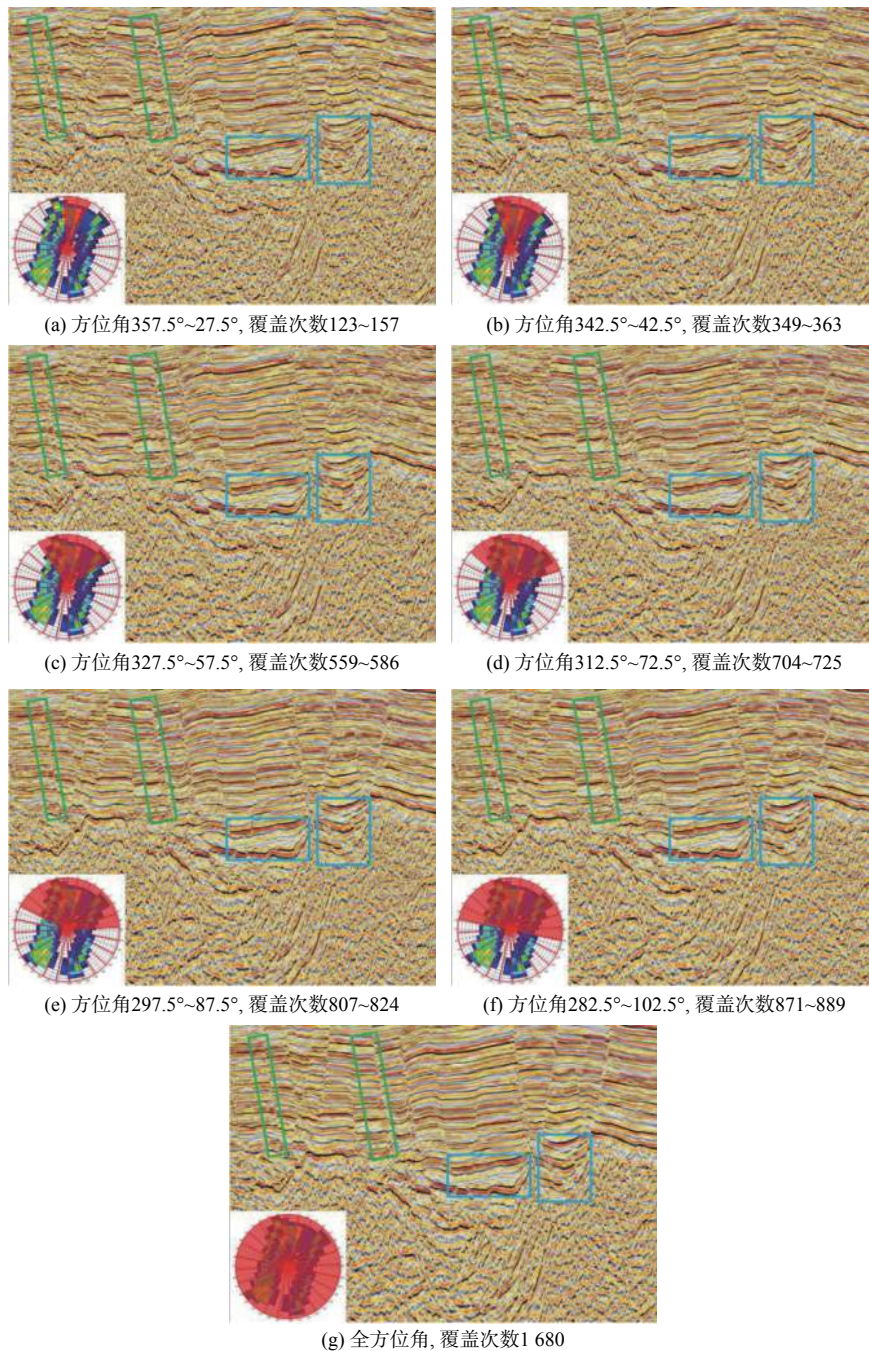


图8 PY4洼平行采集方向不同宽度方位角叠加剖面

Fig.8 Superimposed profiles with different width and azimuth in parallel acquisition direction of PY4 Depression

震数据进行一次叠加(图 9)。剖面显示,方位角宽度  $30^\circ$  时,绿色框内的断层阴影已经不明显,方位角宽度增加对断层阴影区成像改善不大,但断面随着

方位角加宽越来越清晰。蓝色框内的洼陷内幕,随着方位角宽度增加成像变好。

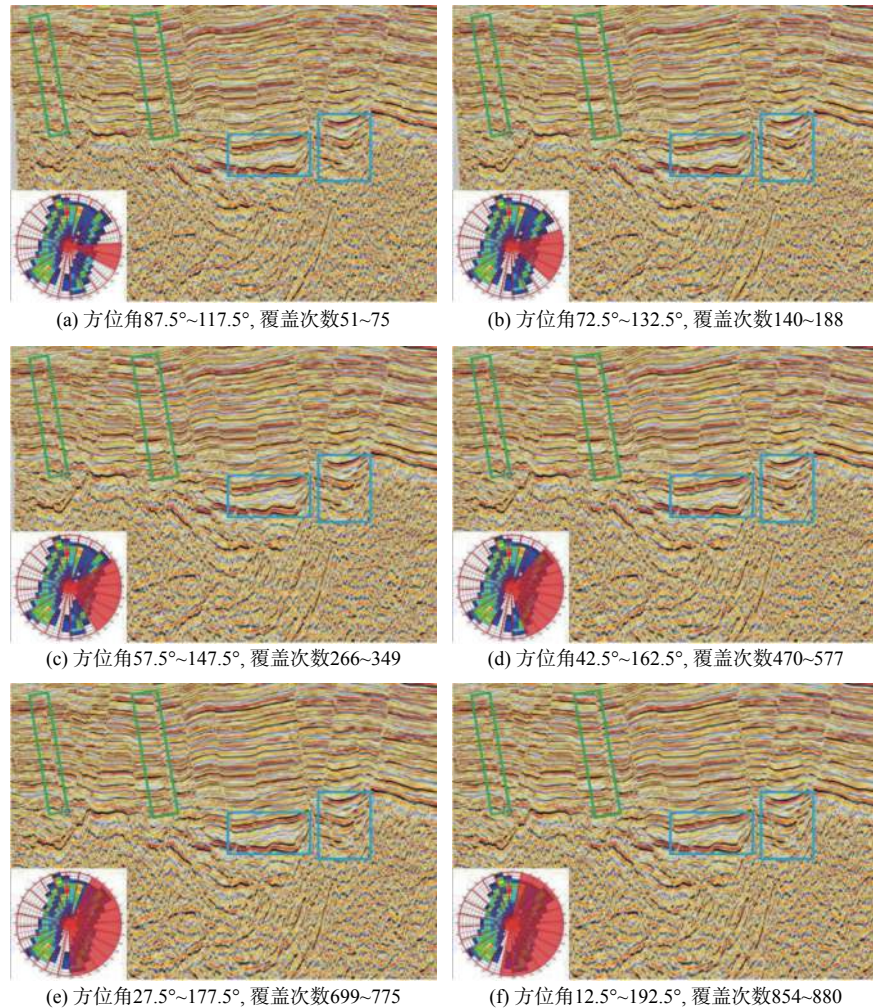


图 9 PY4 洼垂直采集方向不同宽度方位角叠加剖面

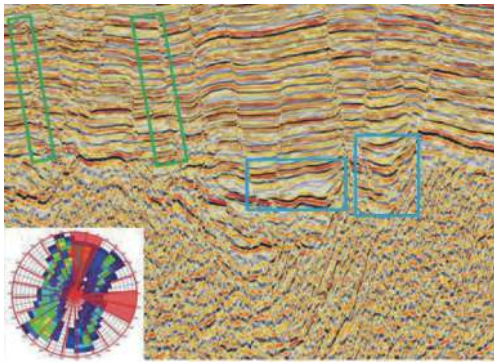
Fig.9 Superimposed profiles with different width and azimuth in vertical acquisition direction of PY4 Depression

全方位(图 8g)与  $180^\circ$ 方位(图 8f、9f)相比,除了信噪比略有提高外,断面、断层阴影区和洼陷内幕,成像效果改善都不明显。根据炮检互换原理,在野外地震采集不均匀时, $180^\circ$ 对称的数据可在对称方位数据统计和处理中使用。

在相同方位角宽度情况下,南北方向(图 8)采集的覆盖次数大约是东西方向(图 9)的 2 倍。但是在绿色框标出的断面和断层阴影区,东西方向成像更好。比如在图 8d 的断面和断层阴影区成像不如图 9d。说明  $12.5^\circ$ 是该区断层成像的优势方位,选择有利采集方向比增加覆盖次数更有利于改善断面和断层阴影区成像。

对于蓝色框标出的洼陷内幕,即使东西方向(图 9e)覆盖次数远高于南北方向(图 8a),仍旧是南北方向成像更好。说明  $102.5^\circ$ 是该区洼陷内幕成像的优势方位,只有在优势方位上增加覆盖次数,才有利于洼陷内幕成像。

为了展示双方位地震资料的成像效果,选取了  $357.5^\circ$ 至  $27.5^\circ$ 和  $87.5^\circ$ 至  $117.5^\circ$  2 组方位角宽度  $30^\circ$  的地震数据进行正交双方位叠加(图 10),分别与方位角宽度  $30^\circ$ (图 8a、9a)和  $60^\circ$ (图 8b、9b)叠加剖面进行对比。剖面显示,无论是断层阴影还是洼陷内幕,双方位融合成像效果介于 2 个方位之间,没有优势成像方位数据成像好。



方位角 $357.5^{\circ}\sim 27.5^{\circ}$ 和方位角 $87.5^{\circ}\sim 117.5^{\circ}$ ,覆盖次数176~231

图 10 PY4 洼正交双方位叠加剖面

Fig.10 Orthogonal double azimuth stack section of PY4 Depression

### 3 讨论

海上常用的拖缆宽方位采集方式,至少需要 2 条船才能实现,而且每增加一次横向覆盖需要增加一条震源船,或改变主船和辅船之间的距离对同一区域重复采集,采集成本非常高。而且不足之处在于横向覆盖次数低、炮间距分布不均匀、最大非纵距小。环形采集方式可以降低采集成本,同时得到相对均匀的炮间距分布<sup>[10-11]</sup>,是海上拖缆宽方位采集的发展方向之一。

海上拖缆多方位的缺点是除近道外,中远道的方位角分布不均匀,且工区边界存在较大不满覆盖区域。增加中远道方位角的均匀度需要增加采集方位,成本会成倍提高。而且多方位融合处理的资料成像不比优势方位成像好。因此,不建议实施多方位采集。在已经有三维地震资料的勘探区,可以充分利用老资料,选择优势成像方位进行二次三维地震采集。

提高深层复杂构造的成像质量,增加横向覆盖次数比增加方位角宽度有效<sup>[12]</sup>,尤其是增加优势成像方位的地震采集覆盖次数,更加有效。目前已经成熟的随机激发<sup>[13]</sup>、连续记录<sup>[14-18]</sup>等技术是提高地震采集覆盖次数的经济有效手段。

### 4 结论

(1)采集方向是影响地震成像的主要因素,采集设计时应全面考虑目标区地质体和断层走向,选择优势成像方位作为主采集方向。

(2)地震成像效果随着方位角宽度和覆盖次数

的增加而变好,尤其是在目标优势成像方位上增加覆盖次数,效果更明显。

(3)全方位数据较  $180^{\circ}$ 方位数据成像效果改善不大,而全方位的采集成本大约是  $180^{\circ}$ 方位的 2 倍,性价比较低,要慎重选择。

(4) $180^{\circ}$ 对称的数据可在对称方位数据统计和处理中使用。

致谢:感谢王征、程耀、唐进等同仁在本文编写过程中的指导和帮助!

#### 参考文献:

- [1] VERMEER G. Wide-azimuth towed-streamer data acquisition and simultaneous sources[J]. *The Leading Edge*, 2009, 28(8): 950-958.
- [2] 李欣,尹成,葛子建,等.海上地震采集观测系统研究现状与展望[J].西南石油大学学报(自然科学版),2014,36(5):67-80.
- [3] 刘依谋,印兴耀,张三元,等.宽方位地震勘探技术新进展[J].石油地球物理勘探,2014,49(3):596-610.
- [4] DIAGON F L, MOLDOVEANU N, EL-TOUKHY M, et al. Comparison between multi-azimuth, wide-azimuth, and full-azimuth towed-streamer acquisition: a full 3D finite-difference study in the Santos Basin[C]//Expanded Abstracts of 87th Annual International SEG Meeting, 2017: 269-273.
- [5] ZDRAVEVA O, YONG S L, MEDINA E, et al. Ultra-large-scale wide-azimuth acquisition and broadband imaging in the Campeche Basin[C]//Expanded Abstracts of 88nd Annual International SEG Meeting, 2018: 61-65.
- [6] 张慕刚,骆飞,汪长辉.“两宽一高”地震采集技术工业化应用的进展[J].*天然气工业*,2017,37(3):1-8.
- [7] 李艳青.几种双船地震施工方法[J].*物探装备*,2014,24(5):298-301.
- [8] 凌云研究小组.宽方位角地震勘探应用研究[J].*应用地球物理勘探*,2003,38(4):350-357.
- [9] 张保庆,周辉,左黄金,等.宽方位地震资料处理技术及应用效果[J].石油地球物理勘探,2011,46(03):396-400,406.
- [10] CHANDOLA S K, VELAYATHAM T, FOOL L C, et al. Imaging black pond: first broadband circular shooting survey in Malaysia with simultaneous deployment of two advanced acquisition techniques[C]//Expanded Abstracts of 83rd Annual International SEG Meeting, 2013: 211-215.
- [11] MOLDOVEANU N, KAPOOR J. Quad coil towed streamer marine acquisition[C]//Expanded Abstracts of 85th Annual International SEG Meeting, 2015: 81-85.
- [12] 李庆忠.对宽方位角三维采集不要盲从[J].*石油地球物理勘探*,2001,36(1):122-124.
- [13] ZHENG Z B, LUO W, ZENG T, et al. The first marine seismic survey of dual-source random shooting offshore China[C]//Expanded Abstracts of 89th Annual International SEG Meeting, 2019: 288-292.
- [14] ZHAN C, MALIK R, SPECHT J, et al. Deblending of continu-

- ously recorded OBN data by subtraction integrated with a median filter[C]//Expanded Abstracts of 85th Annual International SEG Meeting, 2015: 4673-4677.
- [15] CAI J, CHANG Z, PENG C, et al. Deblending of continuous recording conventional NAZ data set to reveal deep structures: a Trinidad case study[C]//Expanded Abstracts of 87th Annual International SEG Meeting, 2017: 4925-4929.
- [16] MASOOMZADEH H, BALDOCK S, LIU Z J. Deblending continuous records by sparse inversion of energetic and coherent surfaces[C]//Expanded Abstracts of 88th Annual International SEG Meeting, 2018: 4065-4069.
- [17] DEN BOER L, SAYERS C M, GOFER E, et al. Characterization of fluid flow anisotropy in a carbonate reservoir using AVAz inversion of wide-azimuth seismic data[C]//Expanded Abstracts of 87th Annual International SEG Meeting, 2017: 3012-3016.
- [18] DHELIE P E, DANIELSEN V, SHEN H L, et al. Hexasource: wide tow dithered six source marine acquisition in the Barents Sea[C]//Expanded Abstracts of 88th Annual International SEG Meeting, 2018: 46-50.

## ANALYSIS OF THE EFFECTS OF WIDE-AZIMUTH AND DOUBLE-AZIMUTH FOR MARINE STREAMER

ZHANG Zhenbo, LUO Wei\*

(Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd., Shenzhen 518067, China)

**Abstract:** In order to improve the middle and deep seismic imaging in the Panyu 4 Depression of the Pearl River Mouth Basin, the wide azimuth seismic exploration test by twin-boat towline was carried out, and 1 680 folds of full coverage seismic data acquired. According to an azimuth width of 15 degrees, 24 azimuth volumes are created and processed, and the data of different azimuth widths and orthogonal dual azimuth data are superimposed respectively. The results of different azimuth widths and different folds are collected and analyzed. It is concluded that the seismic imaging effect is significantly improved with the increase in azimuth width and folds; under the same folds, the dominant imaging azimuth imaging effect is better; and the imaging effect of orthogonal dual azimuth is between the two directions, which has no advantage with the imaging effect of dominant imaging azimuth. Therefore, the most effective way to improve the effect of middle and deep seismic imaging is to increase the number of folds in target dominant imaging azimuth.

**Key words:** seismic geometry; fold; wide-azimuth; orthogonal dual azimuth