

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.140>



南海西部双方位地震资料处理关键技术实践:以珠三凹陷为例

李 列, 盖永浩*, 欧阳敏, 李 林, 王大为, 吴 涛

中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要: 南海西部海域珠三凹陷地区地下断裂体系复杂, 不同的勘探阶段采集的地震资料, 方位角窄, 复杂断裂带成像困难, 而同一批次采集多方位三维地震采集难度大、成本高。为了更好地实现宽方位地震成像目的, 可将不同年度不同方位采集的三维地震资料结合先进的多次波去除技术和地震融合技术进行联合处理, 从而间接形成一个宽方位三维地震资料, 据此操作将极大地降低采集成本, 从实际处理效果对比分析, 该方法较好地改善了复杂断裂带的成像效果。

关键词: 珠三凹陷; 复杂断裂; 多次波去除; 双方位地震融合; 地球物理。

中图分类号: P631.4

文章编号: 1000-2383(2019)08-2590-07

收稿日期: 2019-01-19

Technologies with Two Azimuths in West Area of South China Sea: A Case Study of Zhusan Sag

Li Lie, Gai Yonghao*, Ouyang Min, Li Lin, Wang Dawei, Wu Tao

Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd., ZhanJiang 524057, China

Abstract: The fault system in the Zhusan Sag area of the western South China Sea is complex. The seismic data acquired at different exploration stages has a narrow azimuth, and it is difficult to image the complex fracture zones. The seismic data with different azimuths in the same batch need higher operation technology and higher cost. In order to achieve the purpose of wide-azimuth seismic imaging, 3D seismic data acquired in different orientations in different years can be combined with advanced multiple suppression technology and seismic fusion technology to indirectly form a wide-azimuth 3D seismic data. This operation will greatly reduce the acquisition cost. The comparison and analysis of the actual imaging effect indicate this method can better improve the imaging effect of the complex fracture zone.

Key words: Zhusan Sag; complex fault system; multiple suppression; fusion processing; geophysics.

南海西部浅水区多发育陆相断陷湖盆, 其经历了多期次的构造演化, 断裂体系非常复杂。对各凹陷的断裂体系认识是一个逐步深入的过程, 早期的勘探往往以落实区域大构造为主要目的, 因此采集方向以垂直于主要断裂方向和构造走向为主。到了

勘探后期, 发现控制构造圈闭的小断层与主断裂方向不一致, 而勘探早期的认识指导采集的地震资料难以满足勘探中后期的对小断层的精细描述, 因此需要采集新三维落实控圈小断层, 后期针对控圈小断层采集的新三维与早期垂直于主断裂采集的老

基金项目: “十三五”国家重大专项《莺琼盆地高温高压天然气富集规律与勘探开发关键技术(三期)》(No. 2016ZX05024-005)。

作者简介: 李列(1967-), 教授级高工, 主要从事海洋地震资料采集、处理及应用技术管理等相关工作。ORCID:0000-0003-2256-407X.E-mail: Lilie@cnooc.com.cn

* **通讯作者:** 盖永浩, ORCID:0000-0002-7489-5586.E-mail:gaiyh1@cnooc.com.cn

引用格式: 李列, 盖永浩*, 欧阳敏, 等, 2019. 南海西部双方位地震资料处理关键技术实践. 地球科学, 44(8):2590-2596.

三维存在较大的采集方位差异. 根据 Michell *et al.* (2007)、Mancini *et al.* (2010)、Xie *et al.* (2012)、王守君 (2016) 等人的研究认为, 宽方位的三维地震具有各向异性分析、提高地震资料的信噪比和空间分辨率等优势, 然而在南海西部海域, 受到各种采集条件及成本等因素的限制, 同一批次实施宽方位的三

维地震采集难度大、成本高(郭念民等, 2011; 李丽青等, 2011). 本文首次建议在南海西部海域将不同年度采集的不同方位的三维地震资料联合处理, 间接形成一个宽方位三维地震资料, 达到降低采集成本、改善地下成像效果的目的. 不论哪个方向采集的海洋地震资料, 都面临对多次波的压制衰减问题. 因此要通过将两个方位的地震资料联合处理达到改善成像的目的, 其多次波压制和双方位资料融合是核心的处理技术.

业界已对海上多次波的压制研究了很多方法 (Verschuur, 2006; 李键和王修田, 2008; 贾连凯等, 2014; 宋家文等, 2014; 冯全雄等, 2015; 邢子浩等, 2016), 传统的压制多次波的方法多为预测反褶积和 SRME, 这两种方法均有其局限性 (李宏图等, 2009; 张军华等, 2009; 冯全雄等, 2015), SRME 技术需要近炮检距数据、海底数据, 预测反褶积法只可应用于零偏移距地震数据且假设条件较多. 由于浅水区多次波与有效波相互干涉及波场记录不全等原因, 叠加剖面及近道剖面上的海底不清晰有时甚至完全看不到海底信息, 常规的预测反褶积和 SRME 技术对浅水多次波的衰减效果不佳. 本文应用基于 τ - P 变换的快速算法来实现更好的多次波压制和衰减.

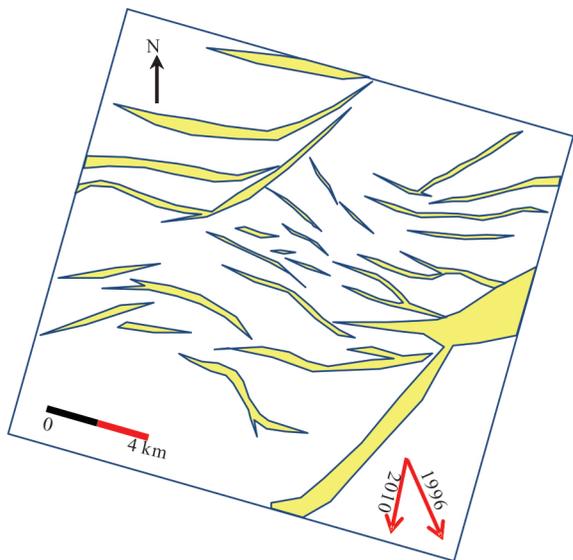


图 1 不同期采集的地震方位

Fig.1 The sketch map showing different azimuths on seismic acquisition

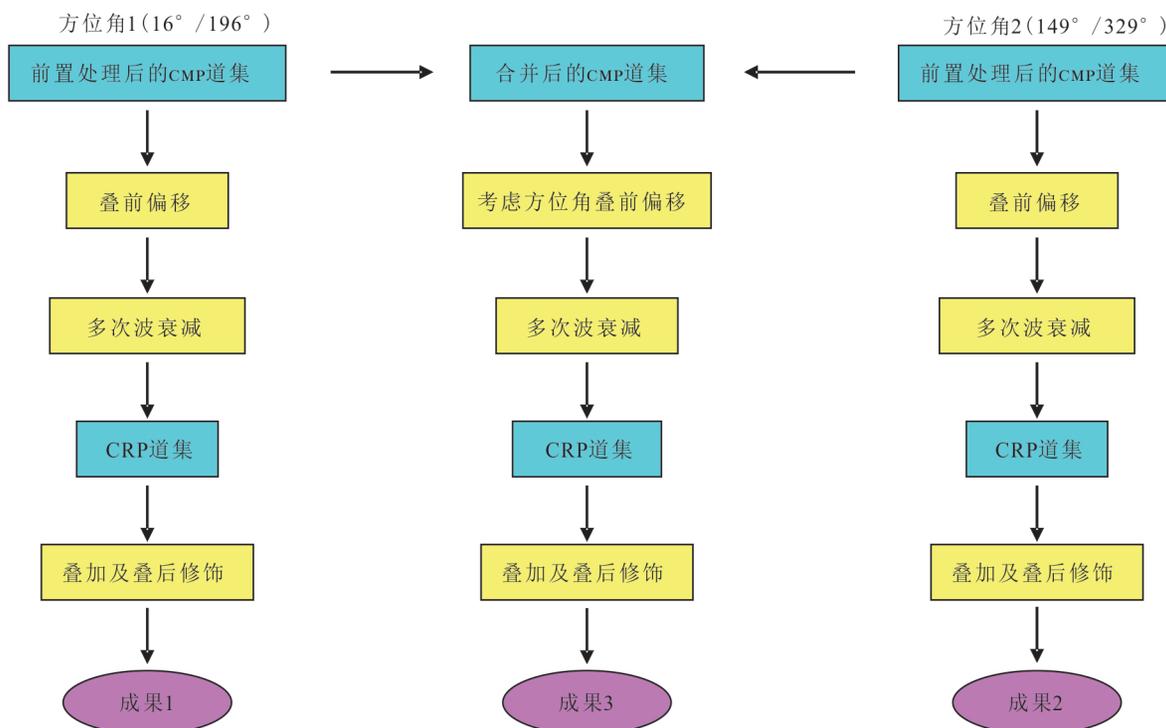


图 2 处理方案

Fig.2 Scheme of data processing

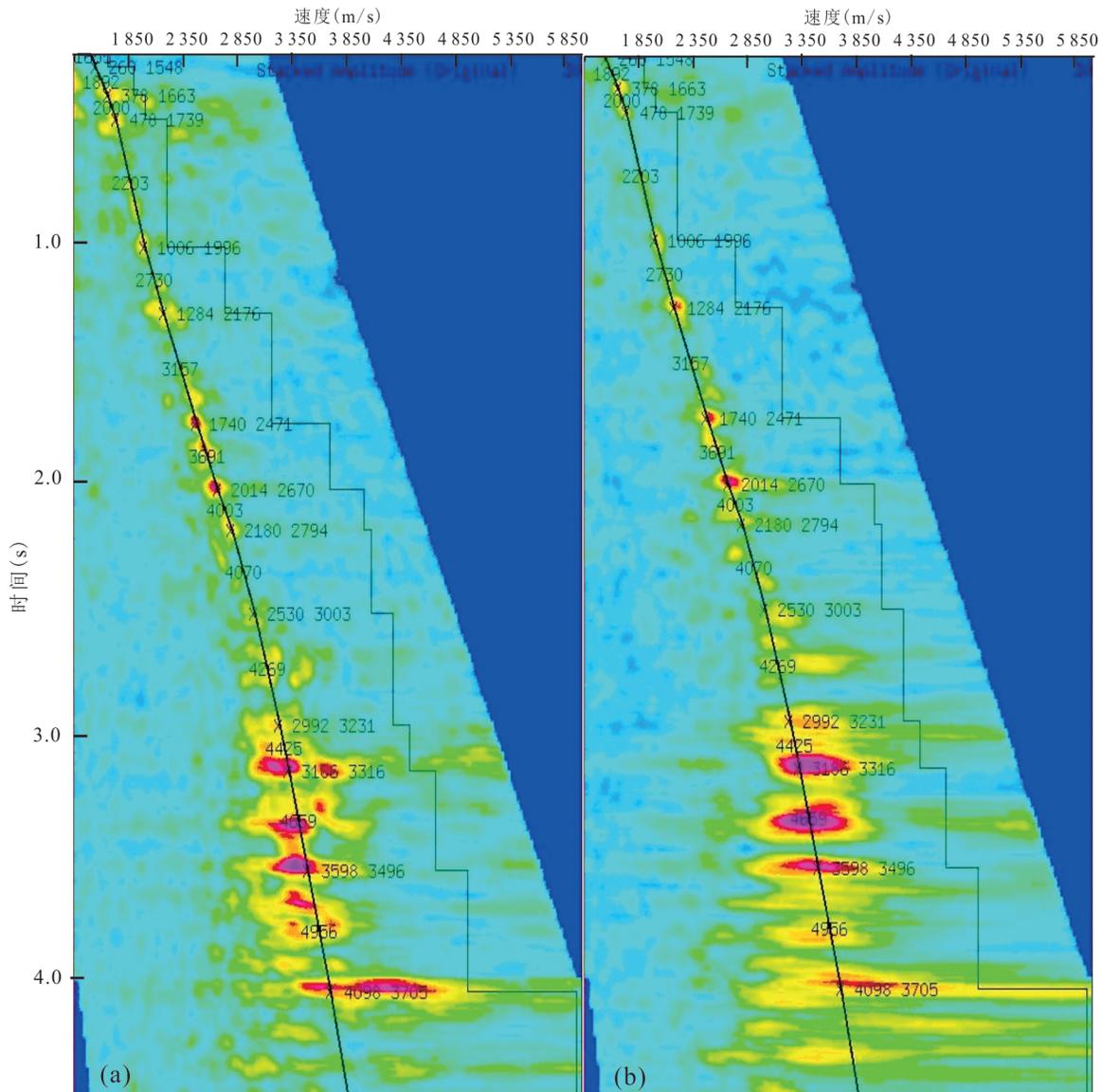


图3 同一位置不同方位速度谱对比

Fig.3 Velocity spectrum of the same survey area in different direction
a为2010年北东向速度资料;b为1996年北西向速度资料

根据勘探不同时期的勘探需求采集的单方位地震数据存在较大的局限性,单方位数据不能很好的解决地下介质各向异性的问题,导致地下高倾角的地层以及断层的成像效果差(Xie *et al.*, 2012).因此要低成本地获取宽方位的地震资料就需要将双方位的数据进行融合处理,实现宽方位照明的效果,融合后的宽方位数据能较好地考虑各向异性的影响提高成像精度(James and Lumly, 2001;郭念民等, 2011;朱江梅等, 2013).

1 研究背景

研究工区位于中国南海西部海域珠三凹陷中

部,水深约 100 m 左右,区内已发现多个油气田,具备较大的勘探潜力.张迎朝等(2014)、李辉等(2014)、李俊良等(2015)等对珠三凹陷的构造演化过程已有比较清楚的认识,其在新生代凹陷经历了断陷期、断拗转换期和拗陷期 3 个构造演化阶段,受地幔热隆起引起的地壳伸展作用和区域构造应力场右旋引起的右旋走滑双重作用控制,凹陷内形成了多期复杂断裂体系,断裂对构造演化和圈闭成藏有重要的控制作用,因此利用宽方位高品质的三维地震资料提高断裂成像对该区域的油气勘探和开发有积极的推动作用.

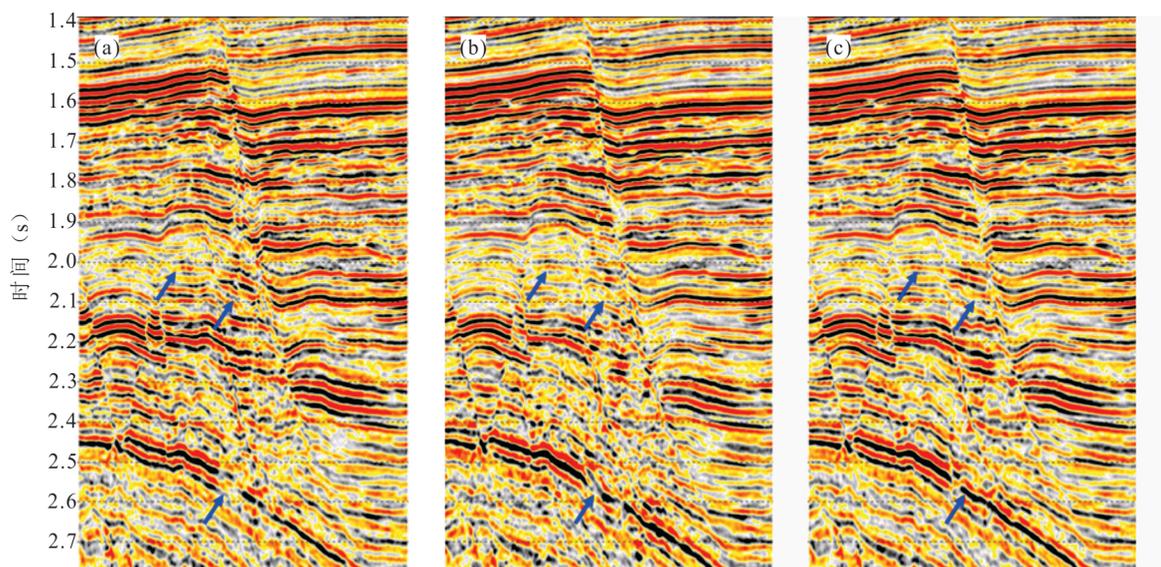


图 4 新老资料偏移成果对比

Fig.4 Migration of old and new seismic data

a.149/329°处理成果;b. 16/196°处理成果;c. 双方位融合后偏移成果

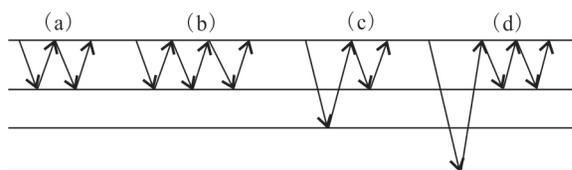


图 5 简单模型浅水多次波射线路径示意图

Fig.5 The sketch map of rays path about multiple in shallow water from simple model

在 1996 年勘探早期阶段,针对区域大构造曾采集过一批三维资料,采集方向垂直于主要的控注断裂,采集的方位角为 $149^{\circ}/329^{\circ}$ 。随着勘探的逐步深入,发现晚期在区域走滑作用影响下发育的次级小断裂对落实构造圈闭、分割油气藏有重要的控制作用,而这些小断层为北西向展布为主,早期的三维地震资料对小断层的成像效果很差,达不到精细勘探的要求,因此 2010 年在该地区重新采集了二次三维资料,本次采集垂直北西—南东向控圈断层,采集方位角为 $16^{\circ}/196^{\circ}$ (图 1)。

将两批不同时期采集到地震资料进行联合处理,其处理思路如图 2 所示,其中关键的处理技术是多次波衰减和双方位资料的融合。通过这样处理流程还可以将融合处理后的成果 3 与单方位的成果 1 和 2 进行对比分析。

2 海上不同批次双方位地震资料关键处理技术

2.1 双方位融合处理技术

从研究区的实际资料看,研究区内的各向异性特征明显。如图 3 所示,同一位置不同方位的速度谱特征存在较大差异,北东方位采集的资料拾取的速度并不适用于北西向的速度场,说明双方位融合很有必要。

将两个方位的资料进行联合成像,需要考虑两个方位的各向异性的情况, Tsvankin (1997) 和 Grechka and Tsvankin (2011) 等对各个方位的速度差异和各向异性参数进行了分析,朱江梅等(2013)等运用正交速度成像的理论和算法得出了较理想的成像效果。

双方位资料融合处理技术的主要思路为:利用各向同性速度模型进行 PSDM 偏移,获得两个方位的方位角道集,沿层提取两个方位自的剩余时差曲线,求取双方位资料的剩余时差,进行方位速度联合层析反演,同时考虑两个方位的剩余时差进行联合求解,获得适用于两方位资料速度模型,并用测井信息标定模型,检查井位处层位分层和道集。通过井位标定,最终形成双方位各向异性速度场。

在各向异性速度场的偏移道集中,两个方位的数据都能够拉平,速度谱能量更聚焦,资料信噪比更高,同相轴更可靠。从图 4 可见,各单方位资料

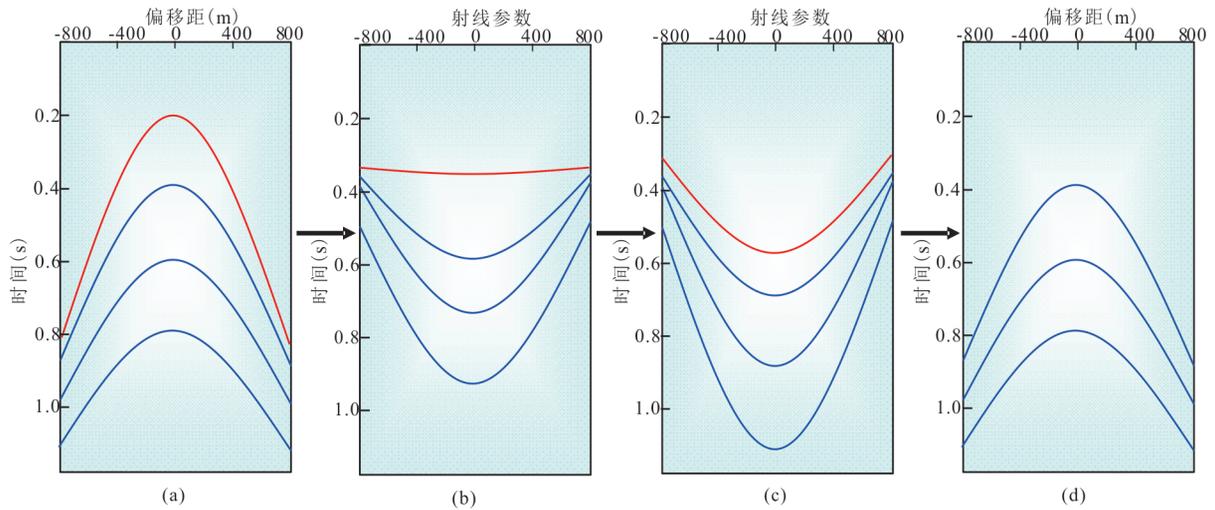


图 6 浅水多次波压制原理

Fig.6 The sketch map shows suppressing multiple in shallow water

a, b 为海底一次反射形成的多次波; c, d 为地下地层的反射在海底形成的多次波

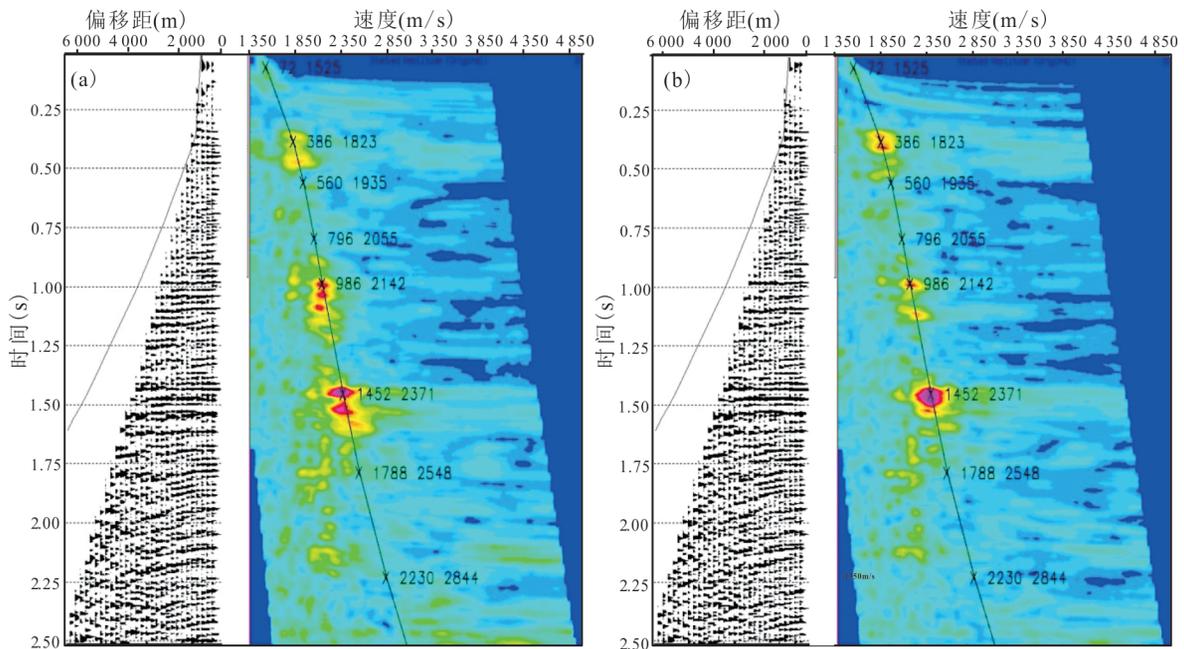


图 7 多次波压制效果对比(左为压制前,右为压制后)

Fig.7 Multiple suppression in shallow water

在受断层影响的区域照明并不充分,在断层阴影带部分区域会出现无法成像或成像不准确的情况.得益于多方位各向异性速度场,双方位资料能够更好地反映地下真实地质情况,在受断层影响的区域有较好的照明补充.图 4 为新老资料分别处理及合并处理的成果对比,从图中可以看出,在相同的处理流程下,新方位(16°/196°)采集的资料与老资料(149°/329°)相比,信噪比更高,深层更连续,断层更清晰,断层阴影区成像更好;将两批资料进行合并

处理后,合并的资料结合了两批资料的优势,反映了更多的地下波场信息,成像质量优于两批资料分别进行处理的成果.

2.2 多次波衰减技术

在南海西部的珠三凹陷进行海上地震勘探过程中,由于水深较浅,来自地下界面的地震反射会在自由水面和临近的地层界面间形成二次及多次反射(图 5),这类多次波能量强、分布范围广,严重影响了地震资料的真实性与可靠性,消除此类多次

波是海洋地震勘探中最重要的任务之一。

研究区水深 100 m, 海面和海底之间的多次波非常发育, 本文应用基于 τ - P 变换的快速算法来实现多次波压制和衰减。简述原理如下: 经 τ - P 变换后, 李键和王修田(2008)认为地震数据可以看做平面波, 在相同的传播方向参数 P 相同的情况下, 有效波与海面多次波之间沿着 τ 轴的时间延迟是呈周期性的, 据此在 τ - P 域进行波场延拓, 能较好的预测出数据的水层多次波。

假设地震记录表示为:

$$f(t, x) = s(t, x) + r(t + dt, x), \quad (1)$$

其中: $s(t, x)$ 为海底的一次有效反射记录, t 为地震反射时间, x 为偏移距, γ 为海面的反射系数, dt 为海底多次波与一次有效波的延迟时间。

对上式进行 τ - p 变换为:

$$f(\tau, P) = s(\tau, P) + r(\tau + d\tau, P). \quad (2)$$

对(2)式进行时间变量的付氏变换得:

$$F(\omega, P) = (1 + re^{-i\omega d\tau})S(\omega, P). \quad (3)$$

则多次波可以表示为:

$$M(\omega, P) = re^{-i\omega d\tau}S(\omega, P). \quad (4)$$

因此可以根据工区已知水深和速度信息建立水体模型, 利用上述算法计算出海面多次波, 其中 $re^{-i\omega d\tau}$ 为延拓因子。然后多次波模型与实际地震记录中的多次波进行匹配, 并在原始数据中减除, 就可以达到多次波衰减的目的。如图 6 各图所示, 图 6a 表示多次波压制前的地震记录, 红色线表示一次有效波, 蓝色为多次波, 图 6a 经过 τ - P 变换后为图 6b, 图 6b 经过一次延拓后变为图 6c, 再经过一次 τ - P 反变换即为预测的多次波图 6d。

在南海西部研究区的实际应用效果很明显, 从多次波压制前后的速度谱资料来看(图 7), 多次波压制前在地震反射界面处存在明显的多次波能量团, 压制后地震反射能量团集中, 多次波被消除。

3 认识与结论

本文通过在南海西部海域不同年度不同方位资料的合并处理实践, 得到以下几点认识:

(1) 该区域断裂复杂, 针对不同的勘探目的采集的不同方位的地震进行合并处理, 可以降低勘探成本, 形成宽方位地震资料, 大大改善断裂复杂区域成像效果。合并处理的关键是多次波压制和双方位资料融合技术。

(2) 不同时期的单方位的地震资料照明窄, 成像效果差。通过对两个方位资料的融合处理, 极大的改善了断层阴影区的成像效果, 有利于推进在断裂复杂区开展精细勘探。

(3) 研究区多次波发育, 通过基于 τ - P 变换的快速算法来实现多次波压制和衰减, 效果比较理想。

Reference

- Feng, Q.X., Wang, Y.C., Li, S.F., et al., 2015. Model-Driving Shallow-Water-Layer Multiple Attenuation in τ - P Domain. *Oil Geophysical Prospecting*, 50(1): 41-47, 14 (in Chinese with English abstract).
- Grechka, V., Tsvankin, L., 2011. Seismology of Azimuthally Anisotropic Media and Seismic Fracture Characterization. *The Leading Edge*, 10(3): 154-155.
- Guo, N.M., Shang, X.M., Liu, X.X., et al., 2011. Key Techniques for Non-Repeated Time-Lapse Seismic Data Processing Technology. *Oil Geophysical Prospecting*, 46(4): 581-592, 667, 495-496 (in Chinese with English abstract).
- James, R., Lumley, D. E., 2001. Cross-Equalization Data Processing for Time-Lapse Seismic Reservoir Monitoring: A Case Study from the Gulf of Mexico. *Geophysics*, 66(4): 1015-1025. <https://doi.org/10.1190/1.1487049>
- Jia, L.K., Wu, S.G., Zhao, C.L., et al., 2014. Application of Multiple Elimination Techniques in the Deepwater Continental Margin of Northern South China Sea. *Progress in Geophysics*, 29(2): 920-930 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., Chen, S.H., Zhang, Y.Z., et al., 2014. Faults in the Zhu-3 Depression of Pearl River Mouth Basin and Their Control over Hydrocarbon Accumulation. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(3): 115-124 (in Chinese with English abstract).
- Li, H.T., Huang, Z., Li, Z.Y., et al., 2009. 3D SRME (Surface-Related Multiple Elimination) Technique and Its Application in Deep Sea Seismic Data Processing. *Oil Geophysical Prospecting*, 44(S1): 60-62, 167, 5 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Wang, X.T., 2008. Suppression Multiple on Shot Domain Using Transformation Method. *Periodical of Ocean University of China*, 38(1): 121-124 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.L., Lei, B.H., Zheng, Q.G., et al., 2015. Stress Field Evolution and Its Controls on Oil Accumulation in the Wenchang Sag. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(4):

- 601—609(in Chinese with English abstract).
- Li, L.Q., Chen, H.J., Peng, X.C., et al., 2011. The Main Processing Methods of High-Resolution Single-Channel Seismic Data in Marine Regional Geological Survey. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 35(1): 86—92, 102(in Chinese with English abstract).
- Mancini, F., Fairhead, S., King, A., 2010. Data Quality Uplift from a Dual-Azimuth Acquisition Offshore Libya. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 29: 11—15.
- Michell, S., Sharp, J., Chergotis, D., 2007. Dual-Azimuth Versus Wide-Azimuth Technology as Applied in Subsalt Imaging of Mad Dog Field—A Case Study. *The Leading Edge*, 26(4): 470—478. <https://doi.org/10.1190/1.2723211>
- Song, J.W., Verschuur, D.J., Chen, X.H., 2014. Research Status and Progress in Multiple Elimination. *Progress in Geophysics*, 29(1): 240—247(in Chinese with English abstract).
- Tsvankin, I., 1997. Anisotropic Parameters and P-Wave Velocity for Orthorhombic Media. *Geophysics*, 62(4): 1292—1309. <https://doi.org/10.1190/1.1444231>
- Verschuur, D. J., 2006. Seismic Multiple Removal Techniques—Past, Present and Future. EAGE Publications, BV, 1—10.
- Wang, S. J., Yang, K., Tang, J., 2016. New Technology and Application in Marine Seismic Survey. Petroleum Industry Press, Beijing, 58—164(in Chinese).
- Xie, Y., Birdus, S., Sun, J., et al., 2012. Prestack Depth Imaging of Multi-Azimuth Seismic Data in the Presence of Orthorhombic Anisotropy. *ASEG Extended Abstracts*, 2012(1): 1—4. <https://doi.org/10.1071/aseg2012ab045>
- Xing, Z.H., Pan, J., Zhao, L.H., et al., 2016. Application of SRME to Multiple Attenuation in Shallow Profile Seismic Data. *Progress in Geophysics*, 31(3): 1207—1215(in Chinese with English abstract)
- Zhang, J.H., Miao, Y.S., Zheng, X.G., et al., 2009. Discussion of Several Theoretical Questions to Remove Seismic Multiples Using Predictive Deconvolution. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 31(1): 6—10, 5(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Z., Zhang, K.K., Yuan, B., et al., 2014. Fault System and Structural Style of Cenozoic and Their Controlling Effects on Hydrocarbon-Forming in Wenchang Sag. *Science Technology and Engineering*, 14(23): 26—31(in Chinese with English abstract).
- Zhu, J.M., Li, L., Yang, W., et al., 2013. Multi-Azimuth Seismic Data Applied Analysis on the Exploration and Development of Wenchang Sag. *Progress in Geophysics*, 28(5): 2587—2596(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 冯全雄, 王彦春, 李三福, 等, 2015. τ - p 域水体模型驱动压制浅水区水层多次波. 石油地球物理勘探, 50(1): 41—47, 14.
- 郭念民, 尚新民, 刘欣欣, 等, 2011. 非重复性时移地震数据关键处理技术应用研究. 石油地球物理勘探, 46(4): 581—592, 667, 495—496.
- 贾连凯, 吴时国, 赵昌垒, 等, 2014. 多次波压制技术在南海北部陆缘深水区的应用. 地球物理学进展, 29(2): 920—930.
- 李宏图, 黄志, 李振勇, 等, 2009. 三维 SRME 技术及其在深海资料处理中的应用. 石油地球物理勘探, 44(S1): 60—62, 167, 5.
- 李辉, 陈胜红, 张迎朝, 等, 2014. 珠江口盆地珠三坳陷断裂特征与油气成藏. 海洋地质与第四纪地质, 34(3): 115—124.
- 李键, 王修田, 2008. 炮集域压制海水鸣震的 τ - p 变换法. 中国海洋大学学报, 38(1): 121—124.
- 李俊良, 雷宝华, 郑求根, 等, 2015. 珠江口盆地文昌凹陷应力场演化及其对成藏要素的控制作用. 大地构造与成矿学, 39(4): 601—609.
- 李丽青, 陈泓君, 彭学超, 等, 2011. 海洋区域地质调查中的高分辨率单道地震资料关键处理技术. 物探与化探, 35(1): 86—92, 102.
- 宋家文, Verschuur, D.J., 陈小宏, 等, 2014. 多次波压制的研究现状与进展. 地球物理学进展, 29(1): 240—247.
- 王守君, 杨凯, 唐进, 2016. 海洋地震勘探新技术与应用. 北京: 石油工业出版社, 58—164.
- 邢子浩, 潘军, 赵俐红, 等, 2016. SRME 技术在浅剖资料多次波压制中的应用. 地球物理学进展, 31(3): 1207—1215.
- 张军华, 缪彦舒, 郑旭刚, 等, 2009. 预测反褶积去多次波几个理论问题探讨. 物探化探计算技术, 31(1): 6—10, 5.
- 张迎朝, 张坤坤, 袁冰, 等, 2014. 文昌凹陷新生界断裂体系与构造样式及对油气成藏的控制作用. 科学技术与工程, 14(23): 26—31.
- 朱江梅, 李列, 杨薇, 等, 2013. 多方位角地震资料在文昌凹陷勘探开发中的应用分析. 地球物理学进展, 28(5): 2587—2596.