

doi: 10.11720/wtyht.2018.1158

彭海龙, 赫建伟, 任婷, 等. 基于地质构造约束的 3D 速度建模方法在琼东南盆地深水复杂断块区域成像中的应用[J]. 物探与化探, 2018, 42(3): 537-544. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1158>

Peng H L, He J W, Ren T, et al. The application of 3D velocity modeling based on geological constraint in Qiongdongnan basin deep water complex fault block area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(3): 537-544. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1158>

# 基于地质构造约束的 3D 速度建模方法在琼东南盆地深水复杂断块区域成像中的应用

彭海龙, 赫建伟, 任婷, 邓盾, 江凡, 王瑞敏, 张文祥

(中海石油(中国)有限公司 湛江分公司, 广东 湛江 524057)

**摘要:** 南海琼东南盆地陵 A 油田由于中深层发育复杂断块以及纵横向地层速度变化剧烈, 导致该地区资料信噪比低, 难以建立精确的速度模型, 以致地震成像结果不可靠。解决该问题的关键是通过精细速度建模以提高叠前深度偏移成像精度。为此, 采用一种基于地质构造约束的高精度 3D 速度建模方法, 在层析成像速度基础上引入断层和层位解释数据, 对层析反演速度进行控制, 设计了新的速度模型更新策略。所形成的地质构造导向速度建模流程提高了断块区域 3D 速度场精度, 进而提高叠前深度偏移的剖面质量, 为精细层位解释和断块构造的落实提供了优势的基础资料。

**关键词:** 复杂断块; 地质构造约束; 三维速度建模; 层析反演; 叠前深度偏移

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2018)03-0537-08

## 0 引言

随着勘探开发进程的不断推进, 南海西部勘探领域向着琼东南盆地深水区以及北部湾乌石地区不断扩展。该区域复杂断块较为发育, 受崎岖海底等因素影响, 地震资料品质差, 中深层成像问题突出, 严重影响勘探进程。上述问题的存在, 使该地区的地震成像成果难以满足目标评价的需求。由于复杂断块发育, 致使速度建模困难、成像较差, 而时间偏移并不能解决复杂构造以及强横向变速问题<sup>[1-2]</sup>, 因此深度偏移成为解决该区域成像的主流技术。然而, 深度偏移对速度精度要求较高, 速度建模的精度制约着 PSDM 的成像精度<sup>[3-4]</sup>。常规处理方法是采用基于射线理论的层析建模方法进行叠前深度偏移。该速度建模方法充分考虑地震和地质信息, 联合地层倾角、同相轴连续性、信噪比等多种信息进行速度反演<sup>[5]</sup>, 对初始速度的精确度依赖性较低, 计

算效率较高, 速度反演的非线性问题较弱<sup>[6]</sup>, 在目前商业软件中应用较为广泛。但是受方法原理的限制, 其反演方程求解存在很大的不适定性<sup>[7-11]</sup>。而基于波动方程的层析建模方法由于计算量大, 反演目标函数和速度扰动之间存在很强的非线性关系, 对初始速度模型精度依赖性较强, 因此在实际生产中很少应用<sup>[12]</sup>。上述特点的存在, 导致层析反演速度建模很难得到与真实情况较为相符的速度模型。

针对以上问题, 国内外学者先后提出了胖射线层析、菲涅尔体层析、高斯束层析等方法<sup>[13-17]</sup>, 倪瑶等提出立体层析反演方法<sup>[18]</sup>, Ni 等对其作了进一步改进<sup>[19]</sup>。上述方法在一定程度上提高了速度的反演精度和分辨率, 但是在复杂断块区域, 上述方法对于断面左右速度强横向变化的情况刻画较差, 仍不能满足复杂断块速度建模和准确成像的要求。

针对层析反演对于断块区域速度较难准确描述的特点, 笔者采用一种基于地质构造约束的速度建模方法进行复杂断块区域的速度建模。该方法以层

收稿日期: 2017-04-25; 修回日期: 2018-02-08

基金项目: 国家科技重大专项“琼东南盆地深水区大中型气田形成条件与勘探关键技术”(2016ZX05026-002)

作者简介: 彭海龙(1988-), 男, 中国石油大学(华东)硕士, 工程师, 研究方向为地震资料处理。

万方数据

析速度为初始速度模型,利用 Petrel 建模工具建立工区构造模型,并以模型中的层位和断层作为控制条件,通过速度采样和插值进一步提高层析速度的精度。与常规层析速度建模方法相比,该方法在体现构造趋势的同时能够准确刻画断块面两侧速度的变化特征;最后用陵 A 油田实际数据进行叠前深度偏移成像,验证了该速度建模的有效性。

## 1 地质概况及速度建模难点分析

陵 A 油田位于南海大陆边缘深水区域,是在前新生代基底上发育起来的陆缘拉张型油气田,该油田以断块油藏为主,是南海西部油气的重要产区,其典型地震剖面如图 1 所示。地震资料经过多次处理和解释,其中最为突出的是复杂断层构造成像中的

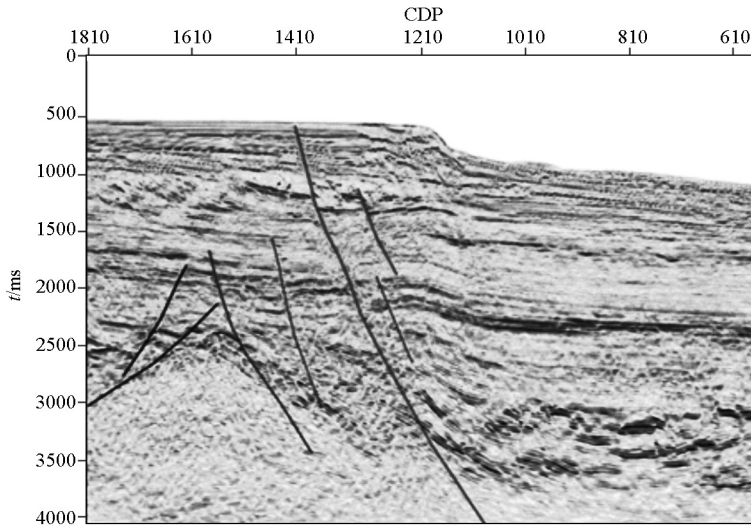


图 1 南海陵 A 油田地震剖面

## 2 方法技术

针对陵 A 油田复杂断块发育、速度强横向变化的特点,笔者通过基于地质构造约束的速度建模方法建立高精度的速度模型。

基于地质构造约束速度建模方法按照构造建模和速度优化两部分进行。首先对工区的速度进行分析,结合区域的地质认识,建立复杂断块三维构造模型;然后将层析反演速度数据采样地质构造模型进行速度反演,在断层和层位的约束下,反演过程将不能跨越断层进行,断层两侧的速度将更符合实际情况。因此,基于断层和层位约束的建模方式将更加有效,生成的速度模型也更准确,具体流程如图 2。与常规层析速度建模流程相比,该方法采用构造模

速度建模问题,具体表现为:

1) 在复杂海底地形和复杂中深层地质构造地质条件下,绕射多次波严重,中深层信噪比低。同时受底辟活动以及深水重力流等因素影响,使该区现有地震资料品质差,CMP 道集的常规速度谱聚焦性较差,分辨率低,难以获取准确的速度函数,使速度建模不能得到较为准确的初始速度。

2) 受中深层复杂构造活动,断层较为发育,形成一系列走向北西,以北倾为主的正断层和断层相关褶皱,大量的断块,断背斜和断鼻构造较为发育。速度纵横向变化剧烈,常规速度建模方法难以精确描述该区域的速度分布。

上述问题的存在,使该地区的速度建模结果难以满足偏移成像的需求,增加了精确落实断块圈闭和扇体边界的难度。

型约束建模速度,得到断块区域更为准确的速度。

### 2.1 建立初始速度场

实际地震处理中进行速度分析时,速度求取是非连续的,在断层所在位置,以一定的 CDP 间隔求取速度时,将会在断层两侧各获取一个速度,示意图如图 3 所示。生成最终连续的速度场时,断层的存在将会对速度插值结果产生很大的影响。

没有断层控制,断层左右连续插值,断面左侧的深层高速会插值到浅层,断面右侧的浅层低速会插值到深层。这种插值抹杀速度的真实性,使速度模型与真实速度间存在误差,造成偏移归位位置上的偏差,且进行速度解释时,由于速度变化的不确定性,以及人为解释误差,都会得到不准确的速度。上述原因的存在,使得复杂断块地区的深度预测存在巨大挑战,容易对含油气构造面积预测的形成误判。

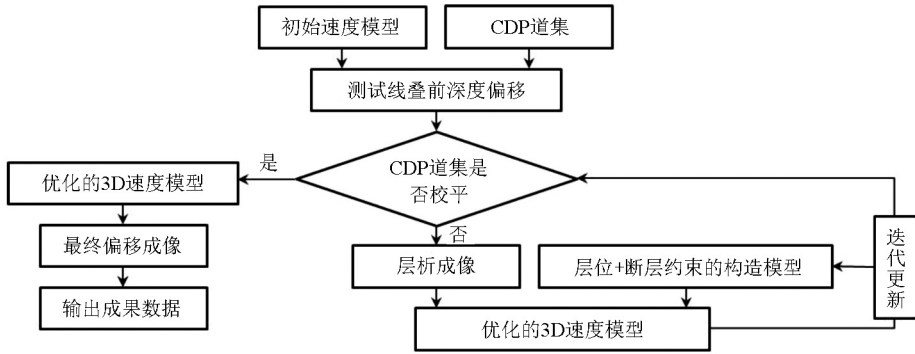


图 2 基于地质构造约束速度建模的偏移流程示意

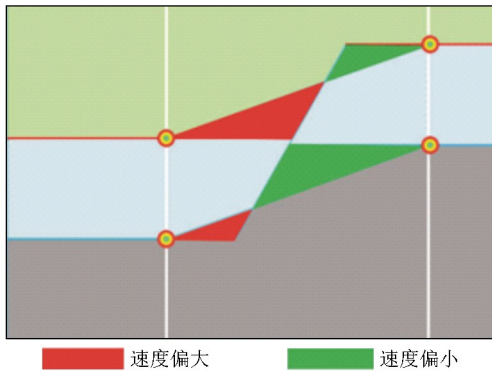


图 3 速度分析及插值示意

三维叠前深度偏移,其速度建模过程需要综合各种信息进行分析。为提高和改善断块区域的成像精度,必须提供或者建立接近于地下真实情况的速度模型。通常情况下,为减小速度误差,需要对建立的速度模型进行更新优化。速度模型更新包括速度谱分析法、层析成像法、共聚焦法和波动方程速度分析法<sup>[20]</sup>。在本文研究中,采用基于层位约束的网格层析成像构建初始速度模型。该方法采用粗网格非规则化拾取的叠加速度和均方根速度函数建立模型约束的瞬时速度场。

层析理论基础为 Radon 变换,将走时残差表示为慢度残差沿着射线路径的积分。通过沿着射线路径对走时残差进行反投影,目的在于求取速度场慢度的更新量。以下是深度偏移常规层析目标函数<sup>[21]</sup>:

$$L(s) = \| \mathbf{A}\Delta s - \Delta t \|^2 \quad (1)$$

式中: $L(s)$ 是层析目标泛函; $\mathbf{A}$ 是灵敏度矩阵,其元素表示射线在网格内的路径长度; $\Delta t$ 是慢度扰动前后的走时残差; $\Delta s$ 是慢度更新量。

为了增强层析方程组的稳定性,同时减少多解性,通常在式(1)的基础上加入正则化对求解过程进行约束,式(1)变为<sup>[22]</sup>:

$$L(s) = \| \mathbf{A}\Delta s - \Delta t \|^2 + \| \mu \mathbf{\Gamma}\Delta s \|^2, \quad (2)$$

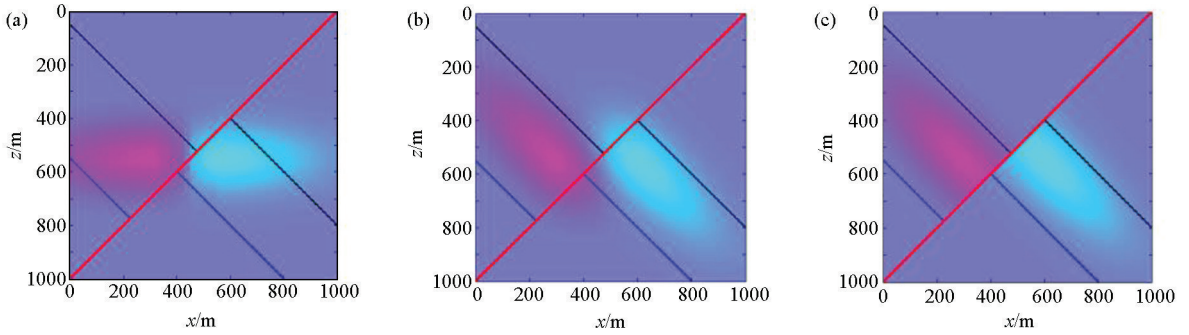
$\mu$ 是射线在网格里的覆盖次数, $\mathbf{\Gamma}$ 是一阶导数型正则化矩阵。加入约束条件后,在速度场更新时约束条件位置处的慢度值保持不变,更新优化后的速度场能够描述地层倾角等构造信息<sup>[23]</sup>,但是对于复杂断块区域速度场横向剧烈变化的特性较难精确描述。

## 2.2 地质构造约束下速度模型优化

网格层析成像利用旅行时优化速度误差,反映地层倾角的同时提高速度模型的精度。但实际应用中,该方法对断层两侧速度横向分布影响不能很好的控制,速度模型与实际情况有较大的偏差。针对层析反演中存在的这一问题,笔者在网格层析反演的基础上,采用基于地质构造约束(层位和断层控制)速度建模方法对模型速度进行优化。该方法对层析成像速度进行重采样,在构造模型(层位和断层解释数据)控制约束下完成速度插值,从而有效提高断块区域的速度精度。优化的速度模型结果能够很好地描述复杂断块区域速度横向剧烈变化的特点。图4是常规层析、层位约束网格层析反演和地质构造约束建模的效果示意图。

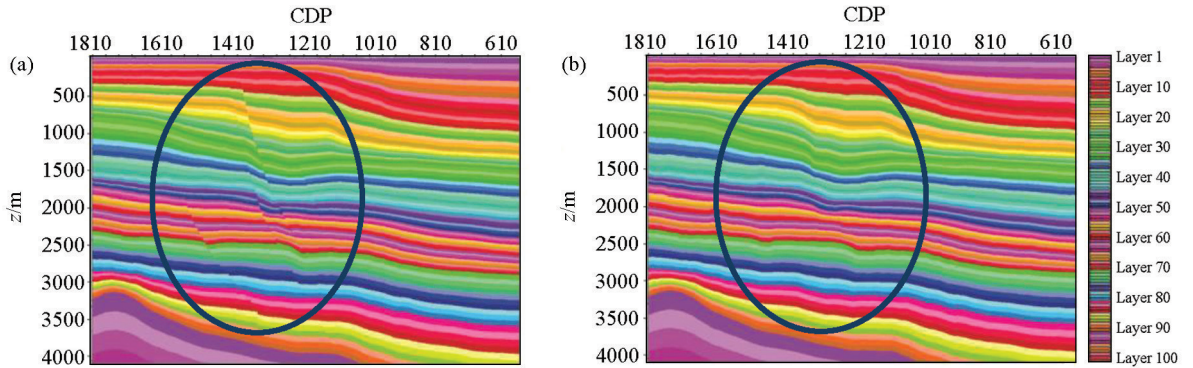
基于地质构造导向的速度建模流程步骤如下:

1) 建立 3D 构造模型。以解释的层位数据和断层数据为基础,在 Petrel 下建立与工区实际情况相符的构造模型,检查并修改模型中的断层和断层的交切关系、断层和层位的接触关系、层位与层位之间的接触关系,从而符合地震解释和地质认识。在构造模型中,层位在断层的控制下出现错断;没有断层的控制,层位在水平方向上是连续延展的,具体如图 5 所示。模型中的断层和层位将会控制后续的速度插值过程,构造模型正确与否将会对最终的速度模型产生较大的影响。因此,必须建立与实际情况相符的构造模型。



a—常规层析反演; b—网格层析反演; c—地质构造导向建模

图4 速度优化模型示意

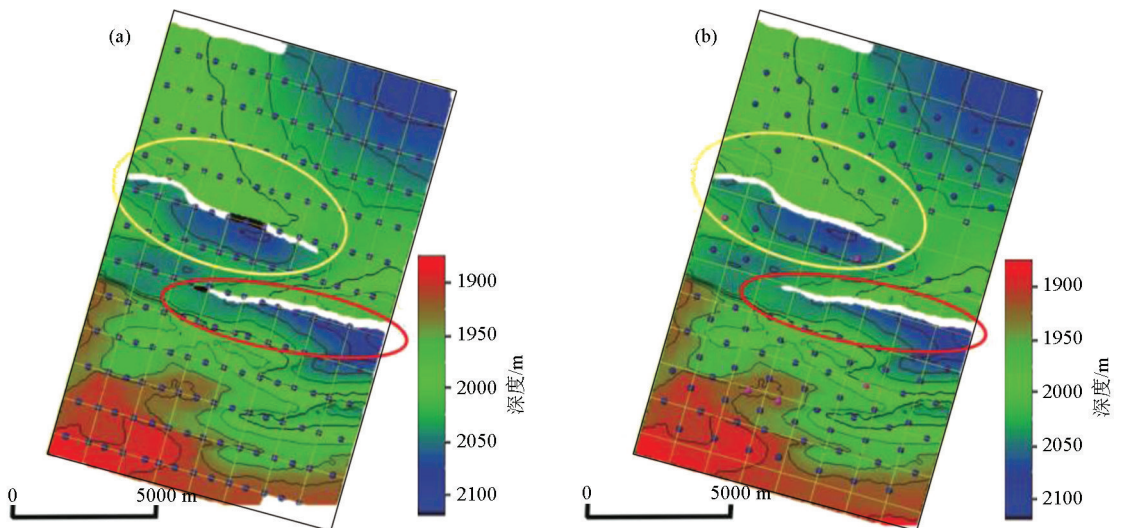


a—断控约束的构造模型; b—无断控约束的构造模型

图5 构造模型剖面示意

2) 速度采样。对初始速度进行重采样,将采样速度作为后续插值的种子点赋值给构造模型。为建立准确的速度场,本次研究建立非均匀网格进行速度采样。在成像准确的速度区域中,采样网格要加密;对于成像速度不准确的区域(断面所在的位置附近),采用稀疏网格,目的在于避开不准确的速度。根据速度分析过程中的 CDP 分布位置和目标层位所在的深度范围,要合理选择速度采样网格。

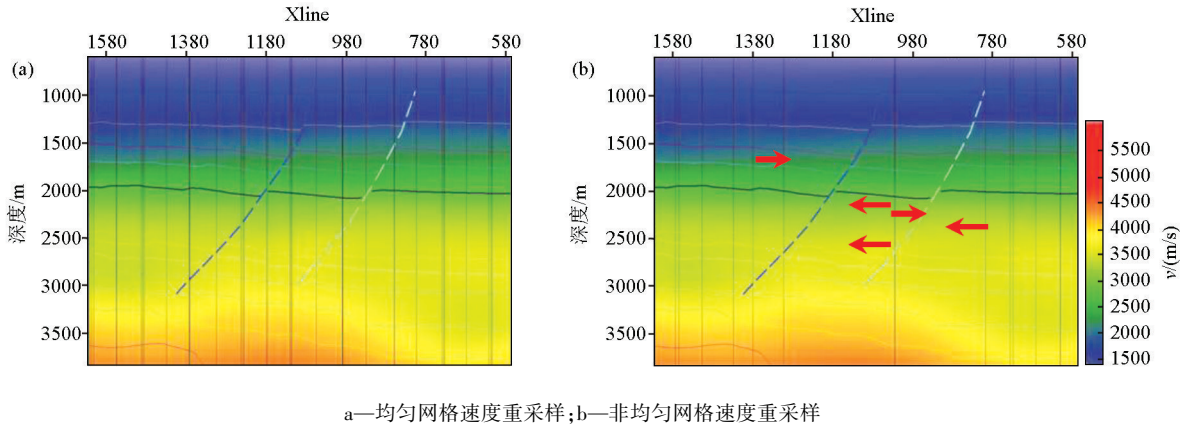
在本次研究中,断面附近的网格间距通常为速度分析的 CDP 间距的多倍,且分布在断面两侧;成像准确区域的网格间距等于速度分析 CDP 间距。示意图如图 6 和图 7 所示。图 6a 和图 7a 中的均匀网格采样,会得到断面及断面附近不准确的速度,而图 6b 和图 7b 会避开速度不准确的断面区域。速度提取完成后,将速度种子点赋给构造模型的网格点。



a—均匀网格速度重采样; b—非均匀网格速度重采样

万方数据

图6 速度种子点采样示意图(平面)



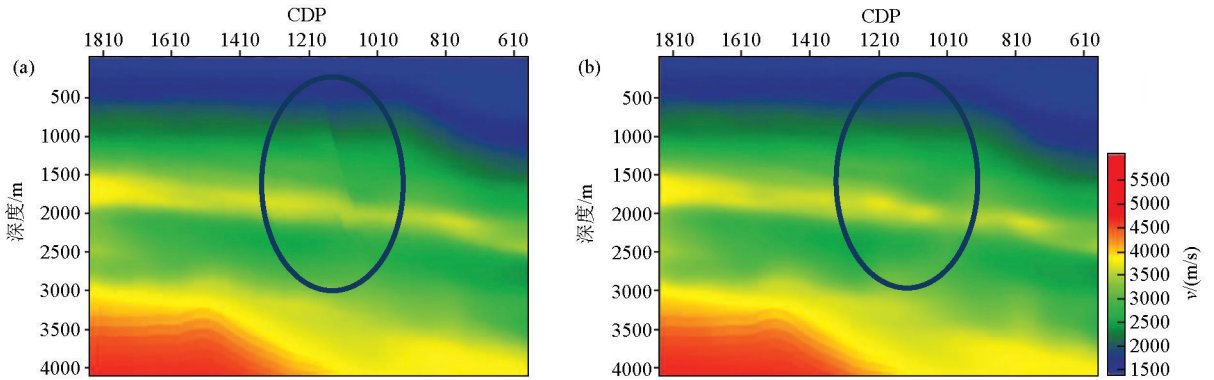
a—均匀网格速度重采样;b—非均匀网格速度重采样

图7 速度重采样示意图(剖面)

3) 3D 速度空间插值。以构造模型中的速度种子点为基础,应用合适的插值算法进行速度插值。速度插值时,由远离断面的种子点位置处按照图 7b 中箭头方向朝靠近断面位置处插值。在断层的控制下,速度插值将不能跨越断层进行插值,减少速度插值的任意性,断层两侧的速度分布将更符合实际情

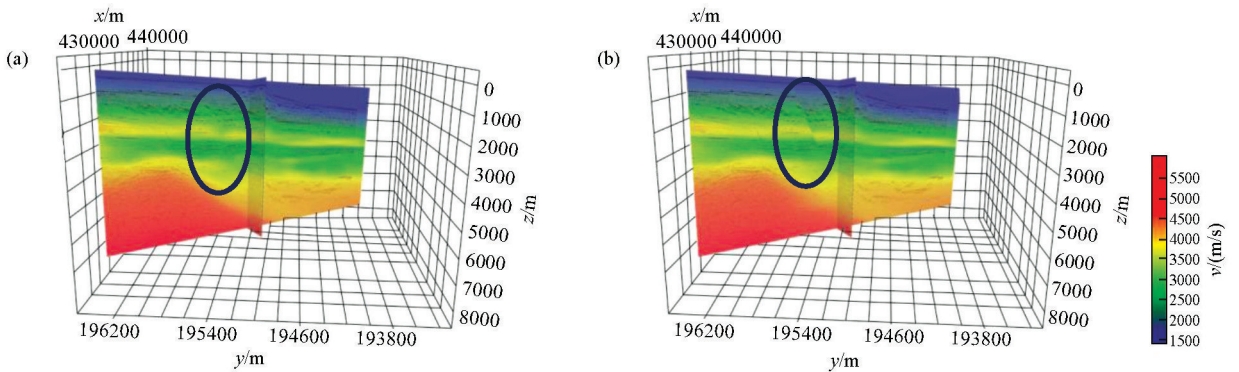
况。没有断层控制,速度插值将会穿过断面,使断层两侧的速度差异性消失。有断层控制和没有断层控制的速度模型如图 8 所示。

4) 速度更新优化。在构造模型的控制下,使最终的 3D 速度模型和地下速度场实际情况相符,最后的速度模型如图 9b 所示。



a—地质构造约束建立的速度模型;b—无断层控制的速度模型

图8 建立的速度模型剖面示意



a—层析速度模型;b—地质构造约束的速度模型

图9 3D速度模型与地震数据叠合示意

### 3 偏移成像效果分析

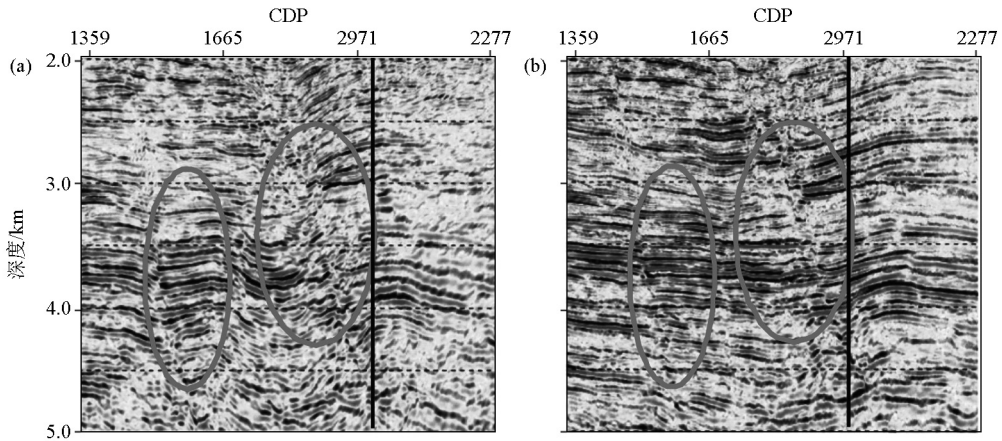
目前叠前深度偏移算法主要包括 Kirchhoff 积

分法和波动方程法。Kirchhoff 积分法对于横向变速适应能力一般,但是计算效率高、适应性强,能满足大部分地质条件下的成像要求,是目前大规模工业生产中最为常用的叠前深度偏移算法。波动方程法能

够较好解决 Kirchhoff 积分法的缺陷,但计算效率相对较低,对速度场的依赖性较高,且计算量大,需要提高信噪比的地震资料,目前生产中应用范围不广<sup>[24-25]</sup>。由于陵 A 油田地震数据量和低信噪比的限制,故采用 Kirchhoff 叠前深度偏移。

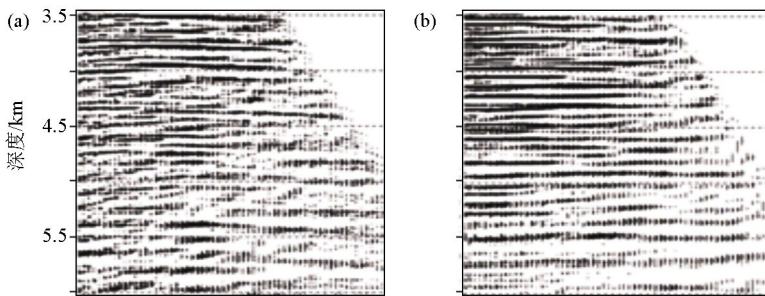
在对该区块资料速度建模过程中,结合该区的速度结构特征,应用本文基于地质构造约束的速度建模方法,得到一个相对准确的深度域层速度模型,使深度偏移道集从浅层到中深层的反射同相轴均得

到了拉平,其偏移结果和网格层析叠前深度偏移结果相比具有较大的提高。一方面小断层刻画得到提升,大断层归位有较大的改善,断面成像更清楚;另一方面地层的成像也有明显进步,同相轴连续性更好,走向更清楚。成像剖面的横向分辨率得到了提高,更加有利于断块圈闭构造的精细解释。具体如图 10 和图 12 所示。图 11 道集位置在图 10 的成像剖面中的黑线位置。



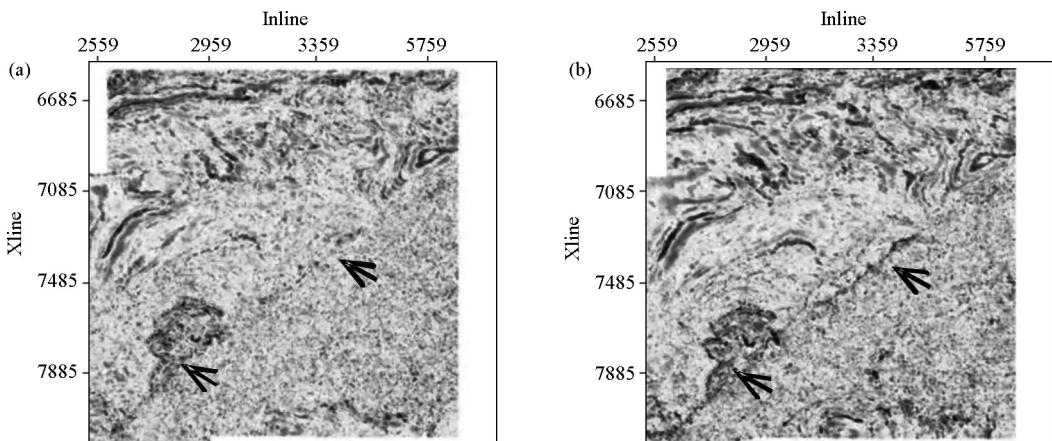
a—层析成像速度建模 PSDM 结果;b—地质导向约束速度建模 PSDM 结果

图 10 叠前深度偏移剖面



a—层析成像速度建模 PSDM 结果;b—地质导向约束速度建模 PSDM 结果

图 11 深度域道集校正对比



a—层析成像速度建模 PSDM 结果;b—地质导向约束速度建模 PSDM 结果

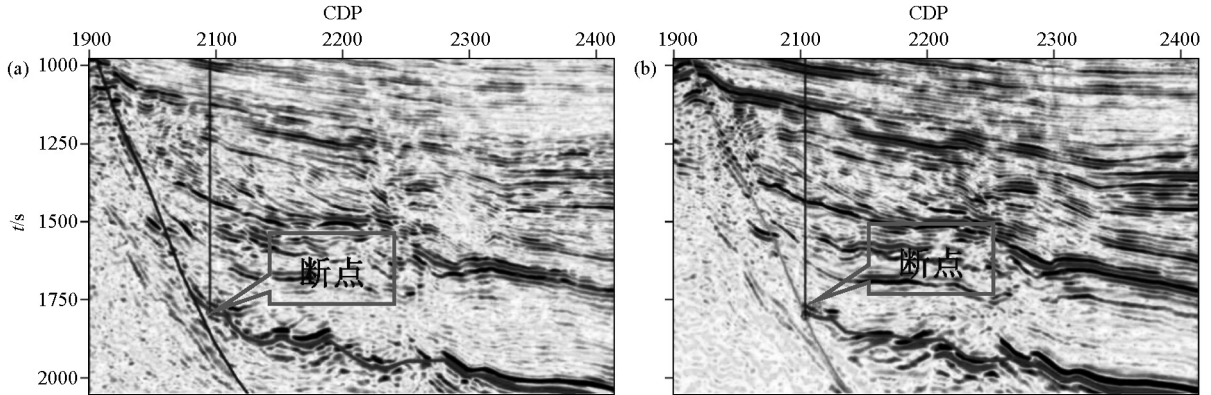
图 12 叠前深度偏移切片

经钻井资料证实,新方法的成像结果更准确,断层归位更好。在层析成像速度的解释剖面上,钻井资料应钻遇至目的层 T90,然而实际钻遇至断层位置;在新的成果解释剖面上,解释成果和实际钻井情况相符。具体如图 13 所示。

选取该工区内的一口已钻井,对已钻井的实测资料与两种深度偏移结果进行对比,对比误差结果

如表 1 所示。

其中,PSDM1 为地质导向约束速度偏移结果,PSDM2 为层析速度偏移结果。误差 1 表示实钻数据和 PSDM1 的深度误差,误差 2 表示实钻数据和 PSDM2 的深度误差。从表 1 中可以得出:基于地质构造约束的速度建模方法,其深度偏移结果与实际地层情况更加符合,深度预测更加准确。



a—层析速度建模成像结果的解释资料;b—地质构造约束速度建模成像结果的解释资料

图 13 实际钻井资料对比分析

表 1 陵 c 井钻前钻后地层对比数据

地震反射界面	PSDM1/m	PSDM2/m	实钻/m	误差 1/m	误差 2/m
T28	2343	2363	2344.7	1.7	18.3
T29	2477	2494	2479.7	2.7	14.3
T29A 顶	2704	2720	2708.9	4.9	11.1
T29B 底	2711	2736	2718.4	7.4	17.6
T30	2764	2788	2774.3	10.3	13.7
T40	2884	2896	2872.3	-11.7	23.7

## 4 结论

基于断层加层位控制的地质构造约束建模方法,将地震资料解释和数据处理工作紧密结合起来。以层析成像速度为基础,采用层位和断层解释数据作为控制条件,改善了速度建模的构建方式,能精确刻画和描述断块区域的速度场分布情况,建立的速度模型与真实速度较为相符。叠前深度偏移应用地质构造约束的速度建模流程,提高断块区域的 3D 速度场精度,消除断块区域的速度假象,从而恢复真实的构造形态,为目标评价提高了可靠的基础数据,经实际钻井数据验证后,取得较好的效果。

## 参考文献:

[1] 陈新荣.叠前时间偏移成像质量影响因素探讨[J].油气地球物理,2007,5(3):40-44.  
 [2] 屈智华,叶秋焱,刘旺.中国西部复杂地区地震资料处理[J].物探与化探,2000,24(1):43-50.

[3] Birdus S. Removing fault shadow distortions by fault constrained tomography[J]. Expanded Abstracts of the 77<sup>th</sup> Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 2007:3039-3043.  
 [4] 李燕.盐丘构造成像速度建模及逆时偏移关键参数优选[J].物探与化探,2015,39(3):537-544.  
 [5] 司卫,万城程,马锐,等.网格层析成像技术在桂中坳陷的应用研究[J].石油天然气学报,2014,36(2):94-97.  
 [6] 白雪,李振春,张凯,等.基于井数据约束的高精度层析速度反演[J].物探与化探,2015,39(4):805-811.  
 [7] Luo Y, Schuster G T. Wave-equation traveltime inversion[J]. Geophysics, 1991, 56(5):645-653.  
 [8] Woodward M J. Wave-equation tomography[J]. Geophysics, 1992, 57(1):15-26.  
 [9] Zhang K, Yin Z, Li Z C, et al. Wave equation tomographic velocity inversion method based on the Born/Rytov approximation[J]. Applied Geophysics, 2013(3):314-322.  
 [10] 陈飞旭,李振春,张凯,等.基于波动方程偏移的宽方位三维角道集提取[J].物探与化探,2015,39(4):797-804.  
 [11] 叶景艳,姚亚琳,王燕群,等.偏移深度分析与偏移成像[J].物探与化探,2009,33(6):674-677.  
 [12] 邵荣峰,方伍宝,蔡杰雄,等.高斯束层析偏移速度建模方法及

- 应用[J].石油物探,2016,55(1):91-99.
- [13] Michelen R J, Harris J M. Tomographic traveltime inversion using natural pixels[J]. Geophysics, 1991, 56(5): 635-644.
- [14] Vasco D W, Peterson J E, Majer E L. Beyond ray tomography: wavepaths and Fresnel volumes[J]. Geophysics, 1995, 60(6): 1790-1804.
- [15] Popov M M, Semtchenok N M, Verdel A R, et al. Reverse time migration with Gaussian beams and velocity analysis applications[J]. Expanded Abstracts of 70<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition, 2008: F048.
- [16] Semtchenok N M, Popov M M, Verdel A R. Gaussian beam tomography [J]. Expanded Abstracts of 71<sup>st</sup> EAGE Conference & Exhibition, 2009: U032.
- [17] 倪瑶, 杨锴, 陈宝书. 立体层析反演方法理论分析与应用测试 [J]. 石油物探, 2013, 52(2): 430-436.
- [18] Ni Y, Yang K. Slope tomography assisted by finite-frequency sensitivity kernel [J]. Expanded Abstracts of the 82<sup>nd</sup> Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 2012, 314-322.
- [19] 李振伟, 杨锴, 倪瑶, 等. 基于立体层析反演的偏移速度建模应用研究[J]. 石油物探, 2014, 53(4): 444-452.
- [20] 陈新荣. 叠前时间偏移成像质量影响因素探讨[J]. 油气地球物理, 2007, 5(3): 40-44.
- [21] 李振春, 姚云霞, 马在田. 波动方程法共成像点道集偏移速度建模[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 86-93.
- [22] 胡小波, 司卫, 赵薇, 等. 深度域速度建模技术在南阳凹陷的应用研究[J]. 石油地质与工程, 2015, 29(2): 77-79.
- [23] 李慧, 成德安, 金婧. 网格层析成像速度建模方法与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(s1): 12-16.
- [24] 王锡文, 秦广胜, 刘向东, 等. 叠前偏移技术在中原复杂断块区的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 1092-1098.
- [25] 王华忠, 冯波, 刘少勇, 等. 叠前地震数据特征波场分解、偏移成像与层析反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(6): 2024-2034.
- [26] 黄元溢, 罗仁泽, 王进海, 等. 几种叠前深度偏移技术效果的对比[J]. 物探与化探, 2011, 35(5): 798-803.

## The application of 3D velocity modeling based on geological constraint in Qiongdongnan basin deep water complex fault block area

PENG Hai-Long, HE Jian-Wei, REN Ting, DENG Dun, JIANG Fan, WANG Rui-Ming, ZHANG Wen-Xiang  
(CNOOC China Limited Zhanjiang Branch, Zhanjiang 524057, China)

**Abstract:** The Qiongdongnan basin LING A in the South China Sea is a complex fault block oil and gas field, which is characterized by complicated fault block in deep strata and great changes in vertical and horizontal velocity as well as low S/R. All of these factors lead to an unreliable imaging results. This situation seriously restrict the residual oil exploration. The key to solve this problem is to improve the accuracy of PSDM imaging with high precision velocity modeling. This paper presents a high precision 3D velocity modeling method based on geological constraint. On the basis of tomographic velocity modeling, the horizon and fault interpretation are used to constrain tomography inversion. This method designs a new strategy to update the velocity model, and improves the construction of initial model. The 3D velocity field is improved by new workflow, and the quality of profile of PSDM imaging is also enhanced. The results obtained by the authors confirm that the new velocity modeling method can provide the basic data for the interpretation of fine horizon and implementation of fault block.

**Key words:** complex fault block; fault and horizon constraint; 3D velocity modeling; tomographic inversion; pre-stack depth migration

( 本文编辑: 叶佩)