

王维红, 林春华, 陈志德等. 古龙断陷深层火山岩地震资料成像方法及应用研究. 地球物理学报, 2011, 54(2): 310~319, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.006

Wang W H, Lin C H, Chen Z D, et al. Seismic data imaging techniques and their application for igneous rock formation in Gulong fault depression. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2): 310~319, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.006

# 古龙断陷深层火山岩地震资料成像方法及应用研究

王维红, 林春华, 陈志德, 陈 斌, 宋玉琢, 王 成

大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆 163712

**摘 要** 松辽盆地北部古龙断陷的地震地质条件复杂, 三维地震资料品质较差, 所以提高地震资料的信噪比和断陷期地层的成像精度是当前地震资料处理的研究重点. 在提高地震资料信噪比方面, 本文进行了十字交叉排列面波压制技术、压制规则干扰的减去法多次波压制技术和基于菲涅耳带原理的超面元技术的研究, 这些技术的有效应用, 对保护深层有效波的低频信号、消除深层构造假象、提高道集的覆盖次数和提高信噪比具有重要的理论和实际意义. 在提高地震资料信噪比的基础上, 进行了 Kirchhoff 积分叠前深度偏移研究, 结果表明在速度变化较为剧烈的地区, 叠前深度偏移的成像精度要高于叠前时间偏移. 速度模型是深度域成像的关键, 在初始速度模型建立上, 研究并应用了二维速度模型约束下的三维速度分析技术, 在此基础上, 依据测井资料和区域地质研究的成果进行速度模型的优化分析, 给出叠前深度偏移的速度体. 上述提高信噪比和成像精度的方法在古龙地区深层断陷期地层取得了良好的应用效果, 为古龙断陷结构的地质认识奠定了坚实基础.

**关键词** 古龙断陷, 叠前深度偏移, Kirchhoff 积分, 速度分析, 超面元叠加, 面波压制

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.006

中图分类号 P631

收稿日期 2010-04-06, 2010-05-28 收修定稿

## Seismic data imaging techniques and their application for igneous rock formation in Gulong fault depression

WANG Wei-Hong, LIN Chun-Hua, CHEN Zhi-De, CHEN Bin, SONG Yu-Zhuo, WANG Cheng  
*Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163712, China*

**Abstract** The geological condition is complex and the seismic data is poor in Gulong depression in north of Songliao basin, therefore improving seismic data S/N ratio and seismic imaging are the research focus for hydrocarbon exploration. The seismic data imaging algorithm is given in this paper for improving the imaging precision, the approach to improve S/N ratio includes cross-spread surface wave suppress, subtract method for internal multiples and supper surface stack technique. The above approaches are useful for improving S/N ratio, protecting the low frequency reflection primary, removing structure error and improving the fold number in CMP gather. The prestack depth migration (PSDM) imaging is finished via application of Kirchhoff integration solution of wave equation, comparison with the PSTM, PSDM is applied effectively for media in which velocity variation along the radial and vertical direction is strong, i. e. PSDM is a better migration algorithm for imaging complex geological structure. The high precision

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2009CB219307)资助.

**作者简介** 王维红, 男, 1975 年生, 工程师, 博士, 从事地震资料数字处理与储层叠前反演方法研究.

E-mail: wangweihongdpri@petrochina.com.cn

velocity model is necessary in PSDM, the initial velocity model is constrained by two-dimensional long offset seismic data, during the course of velocity iteration and optimizing, the well logs and geological knowledge is introduced, and the final velocity body is proposed for PSDM. All imaging techniques are applied in seismic data imaging in Gulong downfaulted basin, the better imaging result was acquired and the proposed technologies are useful for determination of geological structure in Gulong fault depression area.

**Keywords** Gulong fault depression, Prestack depth migration, Kirchhoff integration, Velocity analysis, Supper surface stack, Surface wave suppress

## 1 引言

松辽盆地北部大庆探区深层的古龙断陷是重要的天然气勘探准备区<sup>[1,2]</sup>。相比于徐家围子断陷和双城断陷,古龙断陷的地震地质条件较差,所有的满覆盖约 5000 km<sup>2</sup> 三维资料都是以中浅层为目标采集的。地震资料的先天不足在很大程度上制约了对古龙断陷的深入认识。首先针对中浅层采集地震资料在深层反射能量弱、信噪比低,采集排列的最大偏移距较小,造成深层地震资料成像困难,不能有效识别基底结构和地层分布特征;针对深层勘探目标的二维地震资料受二维资料固有缺陷的制约,难以准确描述深层断裂位置和储层特征。上述因素不利于对古龙断陷的构造和火山岩储层情况的整体认识。

以深层为目标的 seismic 资料成像,国内外诸多地球物理学者都对其进行了研究<sup>[3~7]</sup>。所得出的结论基本是重点进行提高地震资料信噪比的研究,也就是说保护低频有效信号是深层资料成像的一个重要研究课题。另外针对深层复杂构造的研究,主要应用叠前时间和叠前深度偏移等成像方法,重点进行速度分析的研究,以提高地震成像的精度。

地震资料处理中,叠后时间偏移方法的基本假设是地下为水平层状均匀介质,速度函数是简单的时间函数。当地层倾斜时,成像精度受到很大限制,叠前时间偏移处理克服了叠后时间偏移的不足,能适应纵横向速度变化的情况,是复杂地区地震资料成像的较为理想的方法<sup>[3,8~12]</sup>。但是在深层陡倾角地层的成像中,由于速度变化较为剧烈,需要应用基于高精度速度建模的叠前深度偏移方法,以提高地震资料的成像精度。目前,叠前深度偏移技术在深层盐下成像、复杂构造和低信噪比地区的地震资料成像中得到有效应用<sup>[5~7]</sup>。需要指出的是,针对横向速度变化剧烈研究区,一些学者研究了非对称走时的叠前时间偏移算法<sup>[13~15]</sup>,并结合 GPU 并行计算的

优势,在地震资料叠前时间偏移的成像精度和计算效率上都有较大的提高。

大庆油田深层断陷期地层是天然气勘探的重要领域,天然气储层主要为火山岩。断陷结构的复杂性增加了深层探井部署的难度,在地震资料成像中,应用了叠前深度偏移技术,大庆油田的勘探实践证明,该技术可提高深度复杂构造地区的成像精度,进而大大降低勘探风险<sup>[16]</sup>。

古龙断陷现有的三维叠后地震资料,在前期的成像处理过程中,尚未形成针对深层成像的技术措施,所以古龙断陷的深层资料成像效果不能满足有利储层特征描述的需要。为进一步明确古龙断陷的勘探方向和有利勘探区带,就要进行三维地震资料的成像方法研究,以得到成像精度较高的地震数据体,利于进行构造解释和断陷结构的识别。

古龙断陷区的地表条件复杂,地震地质条件较差,噪音类型复杂多样,地震资料信噪比很低。针对古龙断陷的三维地震资料特点,本文进行了地震资料信噪比增强技术的研究,包括十字交叉排列面波压制方法、减去法多次波压制方法和超面元叠加方法的研究。在叠前深度偏移中,速度模型建立是成像效果保证,本文进行了二维速度模型约束下三维速度分析技术和井资料约束下的速度模型优化技术的研究和应用。在完成前述的资料预处理后,进行叠前深度偏移的计算。古龙断陷成像效果分析显示本文研究并应用的成像技术对深层断陷期地层成像具有重要的研究意义。

## 2 深层地震资料信噪比增强技术

对深层地震资料成像处理而言,叠前预处理中的干扰波压制是最基础而重要的工作<sup>[17,18]</sup>。结合古龙断陷的噪音类型和发育特点,为有效提高深层地震资料的信噪比,本文重点进行了面波压制、规则的多次波压制、叠前随机噪音压制和超面元技术的研

究,这些技术的有效应用,使得深层有效反射信号得到加强,为后续的地震资料速度分析和偏移成像提供良好的预处理数据体。

### 2.1 十字交叉排列面波压制技术

地震资料处理中,根据干扰波的特性,采取有效的压制方法,最大限度地压制干扰,而使有效波不损伤或损伤极小,是叠前去噪的关键。由于地震信号的衰减和频散效应,深层的有效信号的频率很低,而低频信号在复杂构造成像中具有重要意义<sup>[19,20]</sup>,本文在压制低频面波时,所应用的滤波法是将有效波和面波有效地分离,进而实现面波压制的十字交叉排列法。

十字交叉排列法是在三维空间进行叠前面波压制的方法。将观测系统进行变换,也就是说进行炮点线和检波点线的重排列,对一般的正交的观测系统,可形成十字排列的数据体。该方法的理论基础是时间空间域的三维 Fourier 变换,设地震记录为  $s(x, y, t)$ , 则其 Fourier 变换可表示为

$$S(k_x, k_y, \omega) = \iiint s(x, y, t) e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)} dx dy dt, \quad (1)$$

式中,  $k_x$  和  $k_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的视波数,  $\omega$  为频率。

将三维地震数据按公式(1)进行三维的 Fourier 变换,即将时间空间域的数据体变为频率域的锥形,如图 1 所示,再根据面波的特点来设计滤波函数即可进行低频面波的压制。

为更好地保护低频有效信号,本次研究应用了十字交叉面波压制技术,图 2 为十字交叉排列压制

面波前后单炮对比图,由图可知,炮记录中的面波干扰基本被消除,从图 2c 所减去的噪音中可以明显看到,有效波的低频信号得到很好的保持。分析可知,十字交叉排列面波压制技术,既可以有效地压制强能量低频面波干扰,又可以保护低频有效信号,是适于深层地震成像的重要的地震资料预处理技术之一。

### 2.2 减去法多次波压制技术

多次波在地震资料中普遍存在,压制多次波的方法可分为两类:基于波动方程法和滤波法。就目前大多数多次波的压制方法而言,可将计算过程分为两部分:多次波预测(识别)和多次波减去<sup>[21,22]</sup>。一般来说,基于波动方程的多次波压制方法,大都依据多次波的物理传播规律进行多次波预测<sup>[23,24]</sup>,而对于滤波法而言,一般要根据多次波的几何运动学特点进行多次波的识别。将多次波进行预测或识别后,从原始地震资料中将多次波减去,就实现了多次波压制运算。对陆地采集的地震资料而言,层间多次波发育,一般采取滤波法进行多次波压制<sup>[25~27]</sup>。

根据古龙断陷地震资料偏移距相对较小和研究区多次波的特点,研究并应用了减去法多次波压制技术。该技术根据有效波和多次波的叠加速度特点进行多次波识别,由于该部分计算相对简单,重点进行多次波的减去运算,所以称为减去法。该技术的实现过程是:对研究区的地震资料进行多次波速度分析,应用多次波的叠加速度对 CMP 道集进行动校正处理,动校正后,多次波同相轴被拉平,而有效波同相轴表现为校正过量的特征,对动校正后的 CMP

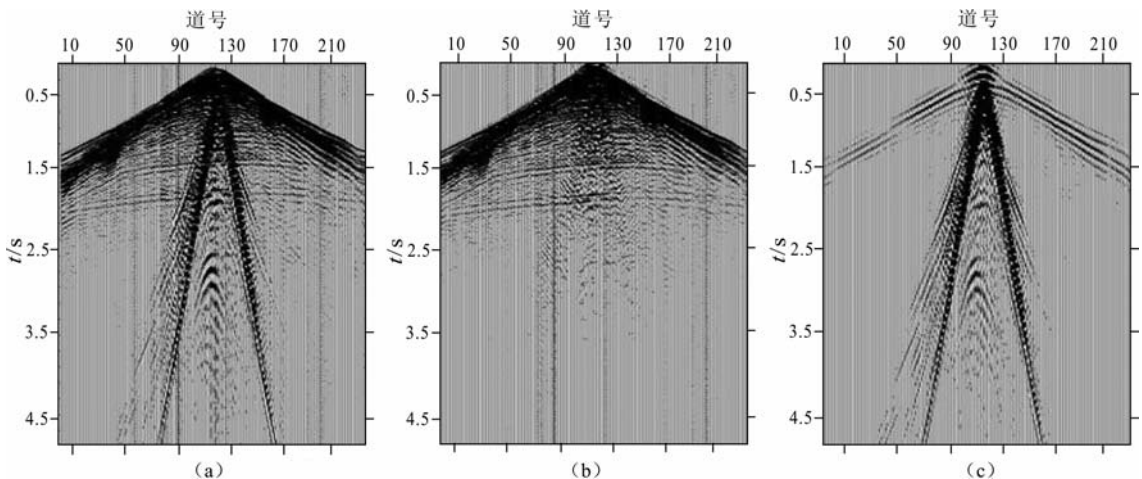


图 2 十字交叉排列面波压制效果分析

(a)原始炮记录;(b)面波压制后炮记录;(c)衰减掉的噪音。

Fig. 2 The surface wave suppression based on cross-spread technique

(a) Initial shot record; (b) Shot record after surface wave suppressed; (c) The surface wave section subtracted from initial record.

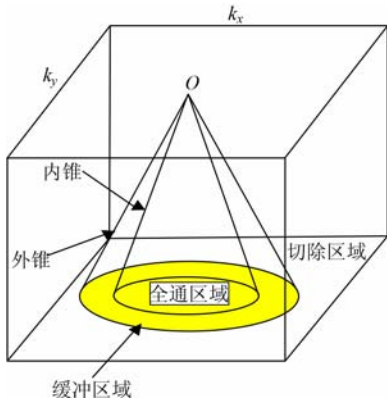


图1 三维 Fourier 变换及滤波区域示意图

Fig. 1 Sketch of 3D Fourier transform and filter zone

道集进行叠加,叠加结果为增强了多次波能量的模型道,记为  $m(t)$ . 在此模型道中,有效反射波被压制,将模型道与 CMP 道集中的每道分别做相关和相减的运算,即完成了层间多次波压制的算法。

在多次波压制算法中,考虑模型道的多次波波形与原动校正后 CMP 道集各道的多次波波形有较

大的差别. 为更好地进行多次波压制,要对模型道作局部振幅适应性修改,即求出模型道  $m(t)$  与各道  $S_i(t)$  的相关系数. 在计算相关系数时要通过上下移动若干个样点来进行振幅调节,选择最大的一个相关系数. 设移动量为  $l$ ,则相关系数可表示为

$$b_i(t_0, l) = \frac{\sum_{\tau=-n/2}^{n/2} s_i(t_0 + \tau) \cdot m(t_0 + \tau + l)}{\sum_{\tau=-n/2}^{n/2} m_2(t_0 + \tau + l)}, \quad (2)$$

移动量  $l$  限值范围为  $[-d, d]$ . 在取值范围内,计算出每一个  $l$  值的相关系数  $b_i(t_0, l)$ ,选择其中最大的一个相关系数:

$$c_i(t_0) = \max_{l \in [-d, d]} (b_i(t_0, l)), \quad (3)$$

然后利用此系数对原道进行多次波压制处理. 压制多次波后的输出:

$$s_i(t_0) = s_i(t_0) - c_i(t_0) \cdot m(t_0), \quad (4)$$

利用多次波速度进行反动校正后,就得到压制多次波后的 CMP 道集。

图3为古龙断陷的二维地震资料,应用减去法

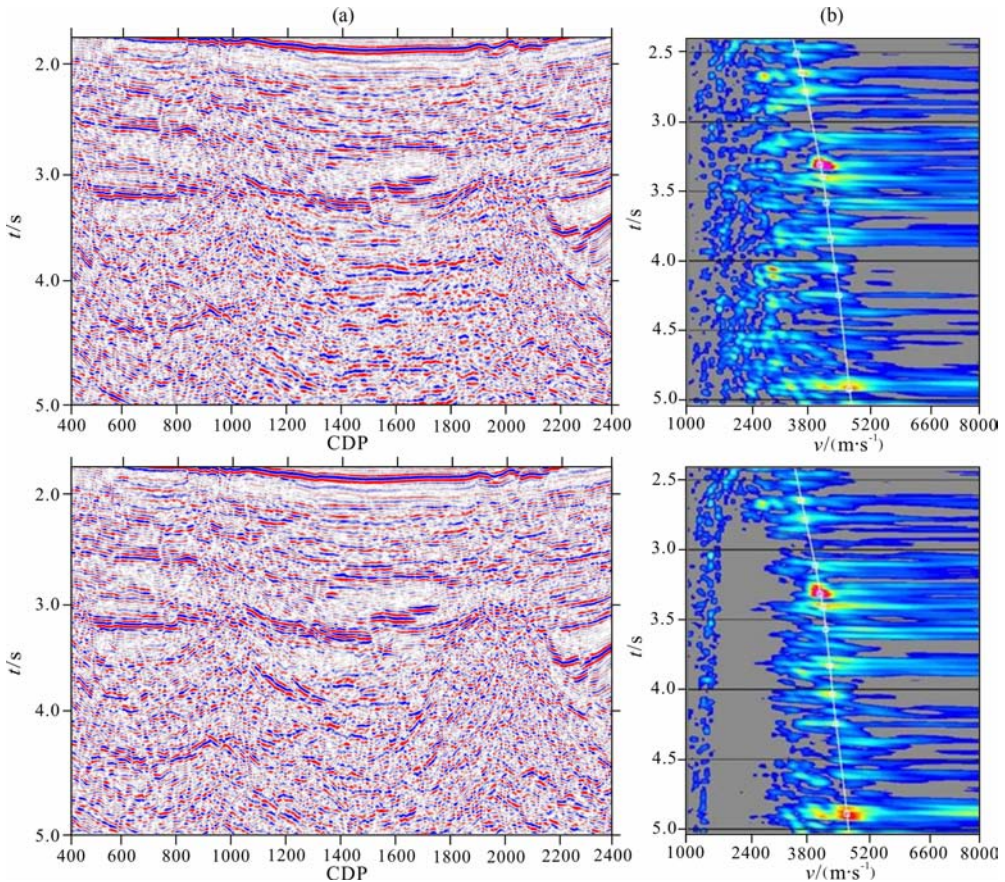


图3 古龙断陷地震资料多次波压制前后叠加剖面 and 速度谱

(a) 多次波压制前(上)后(下)的叠加剖面; (b) 多次波压制前(上)后(下)的速度谱。

Fig. 3 The seismic section and velocity spectrum before and after multiple suppressions in Gulong fault depression  
(a) Stack section before (up) and after (down) multiple suppression; (b) Velocity spectrum before (up) and after (down) multiple suppression.

技术压制多次波前后的叠加剖面及速度谱,对比图 3a 中 3.0 s 与 5.0 s 间的地震剖面可知,多次波在叠加剖面上呈排状,多次波压制后,深层陡倾角的地层得到清晰的成像.通过剖面 and 速度谱对比分析,可明显看出减去法多次波压制技术有效压制了多次反射的能量,深层有效反射得到加强,波组特征明显.

### 2.3 超面元叠加技术

超面元成像处理技术是增强地震反射信号,特别是深层地震信号的有效方法<sup>[28]</sup>.地震反射波的能量并不是一个反射点的反射能量,而是由整个菲涅耳带内所有反射能量组成的.因此应用菲涅耳原理,

在菲涅耳带内优化最佳成像共反射面元,提高深层覆盖次数,然后利用射线旁轴近似理论,把不同共反射点的道集校正到同一个道集内进行叠加成像,即可增强深层反射信号能量和信噪比<sup>[29]</sup>.该方法将不同 CMP 道集的资料校正到反射面元中心点的 CMP 道集上,使道集内的反射波同相叠加,实现了不同 CMP 道集的叠加,该方法对提高深层能量较弱的地震资料的信噪比和同相轴的连续性非常有效.

图 4 显示了常规偏移和扩大面元前后的叠前时间偏移道集,由图可知,经过扩大面元后的叠前时间偏移道集的信噪比高、同相轴的连续性好,道集的质

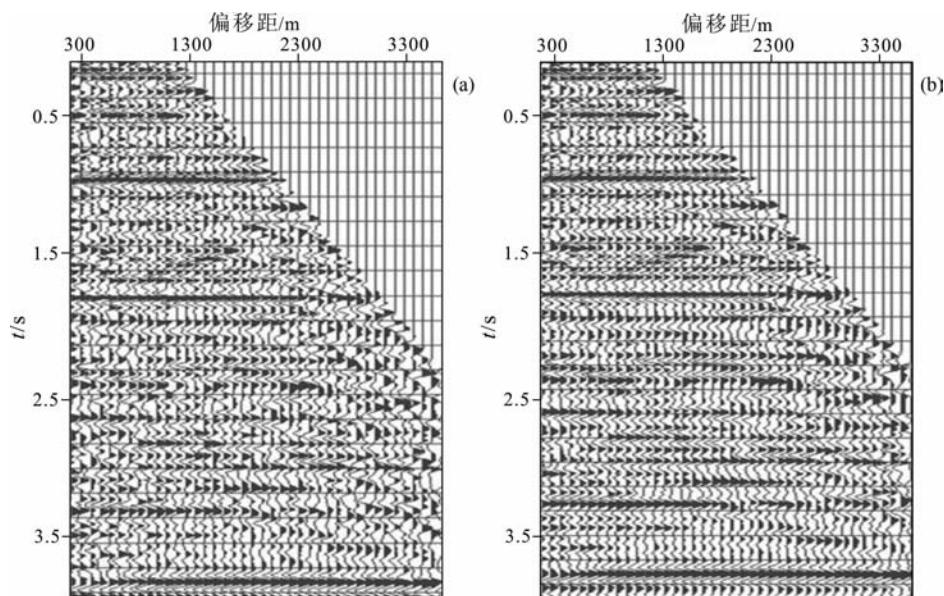


图 4 常规与超面元技术应用前后偏移 CRP 道集

(a) 常规偏移道集; (b) 超面元偏移道集.

Fig. 4 CRP gather acquired from traditional imaging method and supper surface stack technique

(a) CRP gather acquired by traditional imaging technology; (b) CRP gather acquired by supper surface stack technique imaging technology.

量有了很大的提高.

## 3 深层地震资料速度分析技术

地震资料的速度分析是后续偏移成像的关键<sup>[30,31]</sup>.古龙断陷的三维地震资料偏移距较小(一般为 2700 m),深层速度能量团很难聚焦,难以获得准确的偏移速度场,古龙断陷研究工区针对深层采集的二维地震资料炮检距较大(6500 m),深层能量较强,速度谱能量团聚焦效果好,本文在进行三维地震资料速度分析中,引入二维速度函数的约束,提出并应用了二维速度模型约束下的三维速度场建立技术,为后续深层资料成像研究创造了有利条件.

图 5a 为二维地震资料的速度谱,与图 5b 所示

的三维地震资料的速度谱对比分析可知,对工区深层反射同相轴而言,三维地震资料速度分析精度比二维资料低.借鉴图 5c 所示的速度模型,建立了精度相对较高的三维地震资料的初始速度场(图 5d).该技术为提高古龙断陷区深层地震资料的成像精度奠定了基础.

## 4 叠前深度偏移技术

在古龙断陷深层叠前偏移成像中,应用了 Kirchhoff 积分叠前深度偏移方法. Kirchhoff 积分法叠前时间偏移利用边界积分法近似求解波动方程实现地震数据的成像<sup>[32]</sup>.基于 Green 函数理论和波动方程积分解,三维叠前 Kirchhoff 积分深度偏移

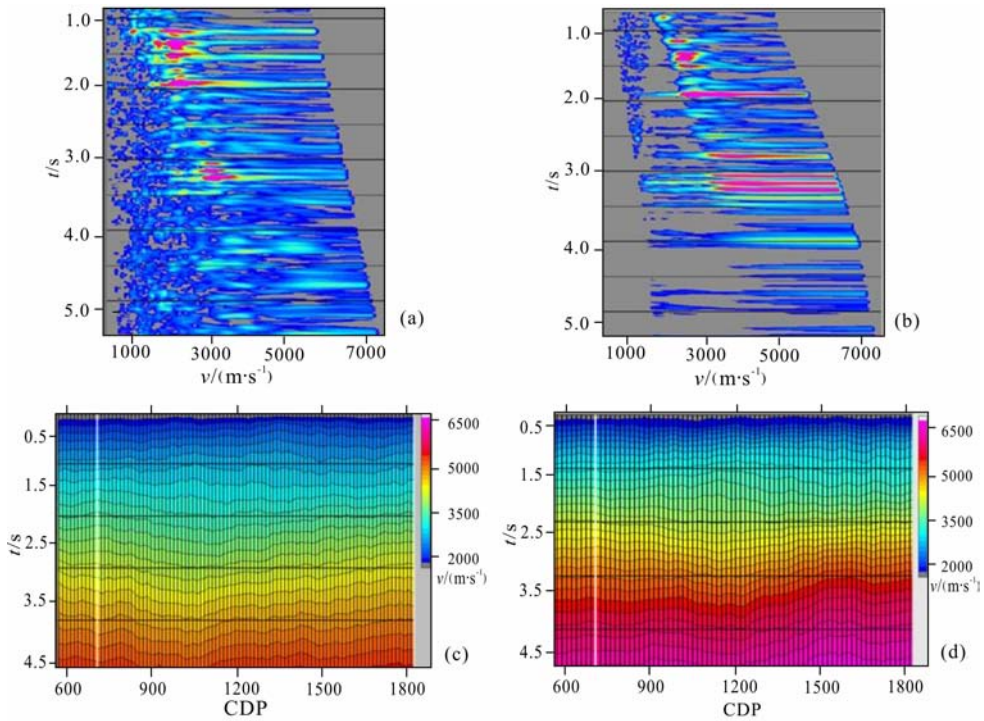


图5 二维速度模型约束下的三维速度场建立

(a) 二维地震资料的速度谱;(b) 三维地震资料的速度谱;(c) 二维地震资料的速度场;(d) 三维地震资料的速度场。

Fig. 5 Three dimensional velocity field constrained by 2D velocity model

(a) Velocity spectrum of 2D seismic data; (b) Velocity spectrum of 3D seismic data; (c) Velocity section of 2D seismic data; (d) Velocity section of 3D seismic data constrained by the 2D velocity section.

的积分形式可写为

$$R(r) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{A(r, r_g)}{A(r, r_s)} \frac{\partial t(r, r_g)}{\partial z} \times \frac{\partial P(r_g, t(r, r_g) + t(r, r_s))}{\partial t} dx dy, \quad (5)$$

式中,  $r$ 、 $r_s$  和  $r_g$  分别表示成像点、震源点和接收点;  $t(r, r_s)$  和  $t(r, r_g)$  分别表示成像点到震源点和到接收点的走时;  $A(r, r_s)$  和  $A(r, r_g)$  分别表示成像点到震源点和到接收点的振幅;  $z$  为深度,  $P$  表示声压场,  $R(r)$  为反射系数。

Kirchhoff 叠前深度偏移与 Kirchhoff 叠前时间偏移原理上来说基本相同, 其主要区别在于走时计算的方法不同, 叠前深度偏移利用深度域层速度模型, 采用精确的射线追踪算法来计算走时, 能够很好地处理速度的横向变化影响<sup>[33,34]</sup>, 所以说叠前深度偏移处理的过程实际就是速度建模的过程。下面分速度模型建立和偏移效果分析两部分对叠前深度偏移技术进行阐述。

#### 4.1 叠前深度偏移的速度模型建立

在叠前深度偏移时, 建立一个相对稳定的初始速度模型, 对叠前深度偏移来说至关重要<sup>[35,36]</sup>。在古龙断陷深层成像研究中, 在二维地震资料约束所

建立的三维均方根速度场的基础上, 利用时间域解释的构造模型求取每一层的初始层速度, 结合利用测井速度计算的各层速度梯度, 就可建立深度域初始层速度模型。

速度模型的优化就是对建立的初始层速度模型进行优化处理, 使其符合实际地层速度分布规律, 从偏移结果来看就是使偏移后的 CRP 道集拉平, 速度模型的优化也是叠前深度偏移取得良好应用效果的关键。一般来说, 速度模型优化是根据偏移后 CRP 道集校平的程度人工沿层拾取剩余延迟时, 然后采用层析成像技术修正现有速度模型。判断速度模型的标准如下: 剩余延迟均得到了很好的收敛; 偏移后的道集基本校平; 优化的速度模型与测井速度的变化趋势基本一致。图 6 为基于以上准则给出的最终的偏移速度体。

#### 4.2 叠前深度偏移成像效果分析

基于前述速度模型, 进行叠前深度偏移成像的计算。本文对古龙断陷的有利钻探目标区进行了叠前深度偏移成像的试验和分析。图 7 给出的是常家围子-高台子工区的最终叠前时间和深度偏移剖面, 由图可知: 叠前深度偏移(图7b)与叠前时间偏移

(图 7a)相比,在整个大的隆起构造部位由于速度相对横向变化较大,深度偏移效果有所改善,其余部位两种成像方法的成像效果基本相同,同相轴的双程走时大于 2.5 s 的深层基底反射深度偏移好于时间偏移.

基于常家围子-高台子工区的成像试验,由于该

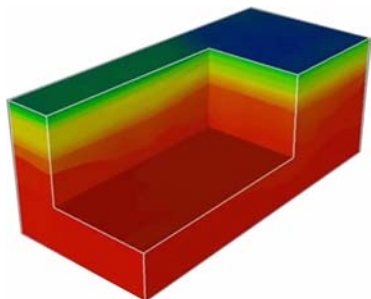


图 6 用于叠前深度偏移的优化的速度体  
Fig. 6 The optimum velocity body used in prestack depth migration algorithm

地区速度相对稳定,横向变化不大,叠前深度偏移与叠前时间偏移相比构造形态差异不大,而在速度横向变化较大的陡构造区,深度偏移的成像效果要好于时间偏移.

图 8 为古龙断陷的主体部位古龙 1 井区的二维地震资料成像效果对比图,从叠前时间和深度偏移的成果可看出,叠前深度偏移成像剖面的总体分辨率和信噪比关系较为协调.深层反射同相轴较为连续,地震信号的能量得到了有效恢复和增强.叠前深度偏移处理后的剖面,营城组顶面 T4 以下的断陷期目的层同相轴的连续性和趋势性得到有效提高.深层地震反射的地质结构较为清晰,有助于判别地层接触关系,同时对基底反射特征的识别和深层资料的构造解释具有重要意义.

图 9a 为古龙 1 井区以往的成像结果及对断陷结构的认识,其结果显示古龙断陷中部的断陷期地

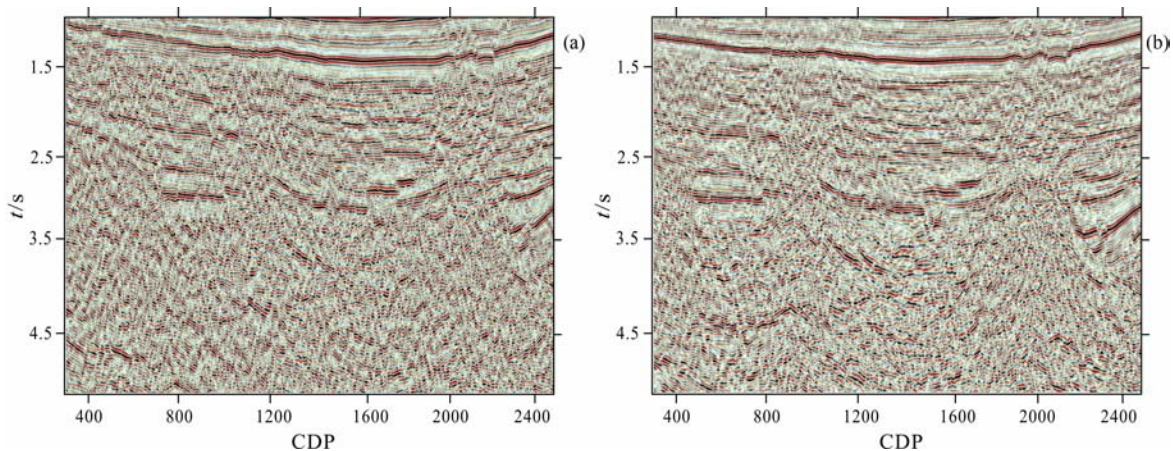


图 8 古龙 1 井区二维地震资料叠前深度偏移成像效果  
(a) 叠前时间偏移剖面; (b) 叠前深度偏移剖面.

Fig. 8 PSDM and PSTM imaging results in Gulong well 1 area

(a) Seismic section via PSTM algorithm; (b) Seismic section via PSDM algorithm.

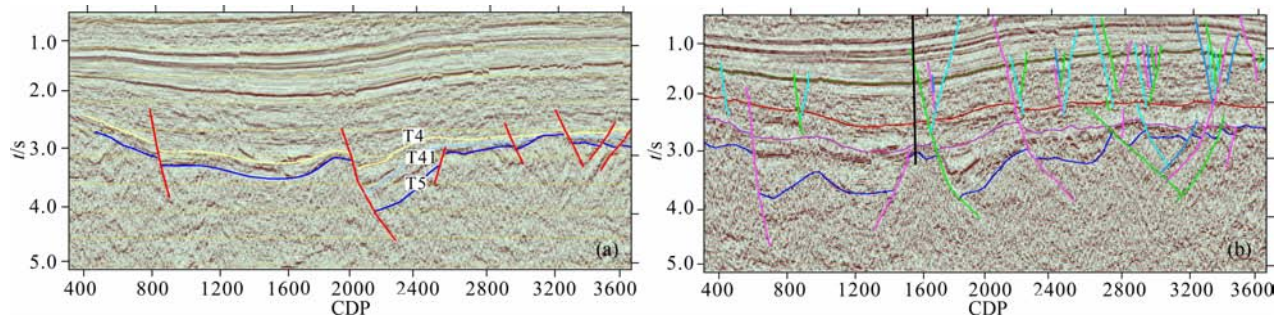


图 9 古龙 1 井断陷区构造解释方案对比

(a) 传统成像结果及解释方案; (b) 本文成像结果及断陷区构造解释方案.

Fig. 9 Comparison of seismic interpretation strategy in Gulong well 1 area

(a) Traditional section and seismic interpretation strategy; (b) Imaging section based on the proposed method in this paper and the according interpretation strategy.

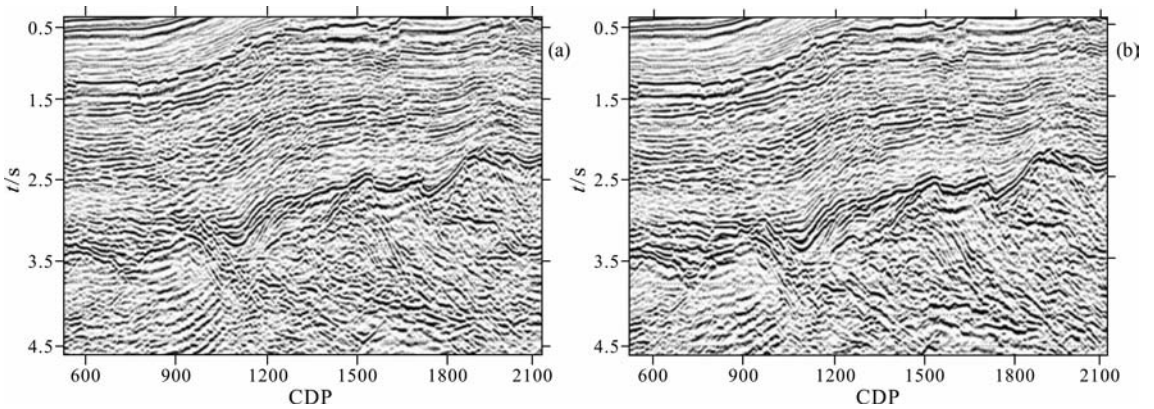


图7 常家围子-高台子工区叠前深度偏移成像效果

(a)叠前时间偏移剖面;(b)叠前深度偏移剖面。

Fig. 7 PSDM and PSTM imaging results in Changjiaweizi-Gaotaizi block

(a) Seismic section via PSTM algorithm; (b) Seismic section via PSDM algorithm.

层厚度不大,勘探前景不大.对该区的地震资料应用本文方法进行重新成像处理后,其结果如图9b所示,可以看出成像效果有很大改善,新构造解释方案显示该区的断陷期地层厚度大,是下步深层天然气勘探的重点准备区。

上述古龙断陷的不同研究目标区的叠前时间偏移和深度偏移的成像效果对比分析表明:叠前深度偏移方法的断层和构造成像,相对于叠前时间偏移而言,断面清楚、深层地层成像较好、波组特征明显,便于地震解释和层位追踪.同时火山岩反射特征更加清楚,深部地层成像有很大改善.另外本文给出的成像技术为古龙地区断陷结构的识别提供了重要技术支持。

## 5 结 论

古龙断陷以中浅层为勘探目标的三维地震资料的深层反射能量弱、信噪比低,最大偏移距较小,本文对古龙断陷研究目标区的地震资料进行了成像研究.研究并应用了一系列压制随机噪声和规则干扰的预处理技术.其中交叉排列面波压制技术可在保护低频有效信号的同时,压制频散的面波干扰,使得深层地震资料的有效信号得到一定程度的增强;减去法多次波压制技术可有效压制火山岩区发育的层间多次波,消除深层地震资料的构造假象;超面元叠加技术可增加深层地震资料的覆盖次数,有效提高地震资料信噪比,进而提高地震资料的成像精度.二维速度模型约束下的三维速度场建立技术为地震资料的叠加、叠前时间偏移和叠前深度偏移的速度模型建立提供了精度较高的初始速度场.成

像研究表明,在古龙断陷速度变化较为剧烈的目标区,叠前深度偏移的成像精度要高于叠前时间偏移.本文探索了以深层地震资料信噪比增强、高精度速度模型建立和叠前深度偏移为基础古龙断陷深层火山岩成像技术,该技术在很大程度改善了古龙地区深层反射的成像质量,为古龙断陷结构的研究奠定了基础。

## 参考文献(References)

- [1] 侯启军. 松辽盆地古龙地区天然气勘探方向, 石油勘探与开发. 2005, **38**(4): 23~27  
Hou Q J. Natural gas play targets in Gulong area, Songliao Basin. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2005, **32**(5): 38~41
- [2] 单玄龙, 秦树红, 张 艳等. 松辽盆地北部浅部基底推覆伸展作用的地震学证据与地质意义. 地球物理学报, 2009, **52**(8): 2044~2049  
Shan X L, Qin S H, Zhang Y, et al. Seismic evidence and geological significance of thrust-extension structure in upper basement of north Songliao Basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(8): 2044~2049
- [3] Audebert F, Nichols D, Rekdal T, et al. Imaging complex geologic structure with single arrival Kirchhoff prestack depth migration. *Geophysics*, 1997, **62**: 1533~1543
- [4] Fowler P. A comparative overview of prestack time migration methods. 67<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1997. 1571~1574
- [5] 马学军. 叠前深度偏移技术在塔河地区盐下成像中的应用. 勘探地球物理进展, 2004, **27**(3): 208~212  
Ma X J. Application of prestack depth migration technology in imaging the subsalt targets in Tahe district. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 2004, **27**(3): 208~212
- [6] 方伍宝, 周 腾, 袁联生等. 叠前深度偏移在复杂地区的应



- 用. 石油物探, 2003, **42**(1): 68~71
- Fang W B, Zhou T, Yuan L S, et al. Application of prestack depth migration in complex area. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2003, **42**(1): 68~71
- [7] 姜忠良, 范运臣, 王睿祥等. 叠前深度偏移技术在东蹠凹陷的应用. 勘探地球物理进展, 2003, **26**(3): 12~16
- Jiang Z L, Fan Y C, Wang R X, et al. Application of prestack depth migration in Dongpu depression. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 2003, **26**(3): 12~16
- [8] 董春晖, 张剑锋. 起伏地表下的直接叠前时间偏移. 地球物理学报, 2009, **52**(1): 239~244
- Dong C H, Zhang J F. Prestack time migration including surface topography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(1): 239~244
- [9] 刘国峰, 刘洪, 李博等. 山地地震资料叠前时间偏移方法及其 GPU 实现. 地球物理学报, 2009, **52**(12): 3101~3108
- Liu G F, Liu H, Li B, et al. Method of prestack time migration of seismic data of mountainous regions and its GPU implementation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(12): 3101~3108
- [10] 董春晖, 张剑锋. 结合基准面重建的叠前时间偏移方法. 地球物理学报, 2010, **53**(10): 2435~2441
- Dong C H, Zhang J F. Prestack time migration incorporated with redatuming. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(10): 2435~2441
- [11] Gray S, May W. Kirchhoff migration using eikonal equation traveltimes. *Geophysics*, 1994, **59**: 810~817
- [12] 王华忠, 蔡杰雄, 孔详宁等. 适于大规模数据的三维 Kirchhoff 积分法体偏移实现方案. 地球物理学报, 2010, **53**(7): 1699~1709
- Wang H Z, Cai J X, Kong X N, et al. An implementation of Kirchhoff integral prestack migration for large-scale data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(7): 1699~1709
- [13] Liu G F, Liu H, Li B, et al. Getting pre-stack time migration travel times from the single square root operator. *Applied Geophysics*, 2009, **6**(2): 129~137
- [14] 李博, 刘国峰, 刘洪. 地震叠前时间偏移的一种图形处理器提速实现方法. 地球物理学报, 2009, **52**(1): 245~252
- Li B, Liu G F, Liu H. A method of using GPU to accelerate seismic pre-stack time migration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(1): 245~252
- [15] 刘洪, 刘国峰, 李博等. 基于横向导数的走时计算方法及其叠前时间偏移应用. 石油物探, 2009, **48**(1): 3~10
- Liu H, Liu G F, Li B, et al. The travel time calculation method via laterally derivative to velocity and its application in prestack time migration. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2009, **48**(1): 3~10
- [16] 李来林, 吴清岭, 何玉前. 叠前深度成像技术及其应用. 大庆石油地质与开发, 2004, **23**(5): 110~112
- Li L L, Wu Q L, He Y Q. Prestack depth imaging technique and its application. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing* (in Chinese), 2004, **23**(5): 110~112
- [17] Cambois G. Preserved amplitude processing in the presence of noise. 66<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., SEG expanded abstracts, 1996. 1595~1598
- [18] 刘建红, 孟小红, 程玉坤. 针对叠前反演的去噪技术. 石油勘探与开发, 2007, **34**(6): 718~723
- Liu J H, Meng X H, Cheng Y K. Pre-stack inversion oriented noise attenuation. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2007, **34**(6): 718~723
- [19] 余德平, 吴继敏, 李佩等. 低频信号在玄武岩地区深层成像中的应用研究. 河海大学学报(自然科学版), 2006, **34**(1): 83~87
- She D P, Wu J M, Li P, et al. Application of low-frequency signals to imaging of deep layers in subbasalt areas. *Journal of Hehai University(Natural Science)* (in Chinese), 2006, **34**(1): 83~87
- [20] 余德平, 吴继敏, 李佩等. 利用低频信号提高膏岩区深层成像质量. 石油物探, 2006, **45**(3): 234~238
- She D P, Wu J M, Li P, et al. Application of low-frequency signals to imaging anhydrite based on modeling. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2006, **45**(3): 234~238
- [21] 王维红, 崔宝文, 刘洪. 表面多次波衰减的研究现状与进展. 地球物理学进展, 2007, **22**(1): 156~164
- Wang W H, Cui B W, Liu H. Research progress in surface-related multiple attenuation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(1): 156~164
- [22] 石颖, 刘洪, 邹振. 基于波动方程表面多次波预测与自适应衰减方法研究. 地球物理学报, 2010, **53**(7): 1716~1724
- Shi Y, Liu H, Zou Z. Surface-related multiples prediction based on wave equation and adaptive subtraction investigation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(7): 1716~1724
- [23] Wang Y. Multiple prediction through inversion; a fully data-driven concept for surface-related multiple attenuation. *Geophysics*, 2004, **69**: 547~553
- [24] 李翔, 胡天跃. 逆散射级数法去除自由表面多次波. 地球物理学报, 2009, **52**(6): 1633~1640
- Li X, Hu T Y. Surface-related multiple removal with inverse scattering series method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(6): 1633~1640
- [25] 刘伊克, 常旭, 王辉等. 波路径偏移压制层间多次波的理论与应用. 地球物理学报, 2008, **51**(2): 589~595
- Liu Y K, Chang X, Wang H, et al. Internal multiple removal and its application by wavepath migration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(2): 589~595
- [26] 马继涛, Mrinal K Sen, 陈小宏. 平面波域反数据处理压制多次波方法研究. 地球物理学报, 2009, **52**(3): 808~816
- Ma J T, Mrinal K Sen, Chen X H. Multiple attenuation using inverse data processing in the plane-wave domain. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(3): 808~816

- [27] 薛亚茹, 陈小宏, 陆文凯. 压制多次波的正交多项式谱减法. 地球物理学报, 2009, **52**(3):817~823  
Xue Y R, Chen X H, Lu W K. Orthogonal polynomial spectrum subtraction for multiple attenuation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(3):817~823
- [28] 裴江云, 刘洪, 李幼铭等. 共反射元弧叠加方法在火山岩成像中的应用. 地球物理学报, 2004, **47**(1):106~111  
Pei J Y, Liu H, Li Y M, et al. Application of the common reflection arc stack method in seismic imaging of igneous rocks. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(1):106~111
- [29] 杨 锴, 马在田. 输出道成像方式的共反射面元叠加方法 I——理论. 地球物理学报, 2006, **49**(2):546~553  
Yang K, Ma Z T. Common reflection surface stack by an output imaging scheme. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(2):546~553
- [30] 潘宏勋, 方伍宝. 地震速度分析方法综述. 勘探地球物理进展, 2006, **29**(5): 305~311  
Pan H X, Fang W B. Review of seismic velocity analysis methods. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 2006, **29**(5): 305~311
- [31] Wombell R, Jones E, Priestly D, et al. Long Offset Acquisition and Processing for Sub-Basalt Imaging. 69<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys. Expanded Abstracts, 1999. 1429~1432
- [32] 刘伊克, 常 旭, 卢孟夏等. 目标函数叠前保幅偏移方法与应用. 地球物理学报, 2006, **49**(4):1150~1154  
Liu Y K, Chang X, Lu M X, et al. Objective function prestack amplitude preserving migration and its application. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(4):1150~1154
- [33] Al-Chalabi M. Series approximation in velocity and traveltime computation. *Geophysical Prospecting*, 1973, **21**(4): 783~795
- [34] 王彦飞, 杨长春, 段秋梁. 地震偏移反演成像的迭代的正则化方法研究. 地球物理学报, 2009, **52**(6): 1615~1624  
Wang Y F, Yang C C, Duan Q L. On iterative regularization methods for migration deconvolution and inversion in seismic imaging. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(6): 1615~1624
- [35] 刘定进, 印兴耀. 傅里叶有限差分法保幅叠前深度偏移方法. 地球物理学报, 2007, **50**(1):269~277  
Liu D J, Yin X Y. A method of Fourier finite-difference preserved-amplitude prestack depth migration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(1):269~277
- [36] 刘礼农, 陈树民, 张剑锋. 稀疏采样下陡角度构造的波动方程深度偏移成像. 地球物理学报, 2006, **49**(5):1452~1459  
Liu L N, Chen S M, Zhang J F. Steep dipping structure depth imaging using wave equation based migration scheme on 3-D sparse dataset. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(5):1452~1459