

# 叠前深度偏移对速度场敏感性分析

梅金顺<sup>①</sup> 王润秋\*<sup>①</sup> 于志龙<sup>②</sup> 李正中<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京昌平 102249; <sup>②</sup>东方地球物理公司研究院地质研究中心,河北涿州 072751; <sup>③</sup>中国石油大学(北京)地球科学学院,北京昌平 102249)

梅金顺,王润秋,于志龙,李正中. 叠前深度偏移对速度场敏感性分析. 石油地球物理勘探,2013,48(3):372~378

**摘要** 本文分析了叠前深度偏移对速度模型的敏感性,利用广义屏方法(GSP)和 Marmousi 速度模型比较了叠前深度偏移处理三组速度数据体的不同结果。数值模型处理结果表明:对于确定的波数域速度场数据体,低通滤波前、后叠前深度偏移结果是渐变的,说明叠前深度偏移处理对波数域速度场中的高波数成分不太敏感;选择不同的速度场,特别是改变速度场的低波数成分之后,叠前深度偏移结果将会发生明显改变,说明叠前深度偏移对速度场的低波数成分比较敏感。由于在空间域对速度模型做平滑处理很少能改变速度场数据体中的低波数成分,空间域速度场平滑不一定能改善叠前深度偏移对速度模型的敏感性,尤其在速度场含有误差时更是如此。速度建模时依照部分波场信息修改速度模型,对于单炮偏移而言,如果该炮对应的速度场低波数信息被改变,将会导致模型修改前、后深度偏移结果发生较大的改变。

**关键词** 叠前深度偏移 速度模型 敏感性 低波数 层速度

**中图分类号**:P631 **文献标识码**:A

## 1 引言

速度分析是地震资料数据处理中的一个重要内容,速度信息贯穿资料处理的绝大多数环节,从静校正、水平叠加、叠后(前)偏移成像到全波形反演等阶段,速度场的准确与否对结果至关重要。作为正问题的波场模拟,更是由速度+算子组合而成。

伴随着计算机软、硬件技术的进步,地震资料处理已经从叠后偏移发展到叠前偏移、从时间偏移发展到深度偏移;然而,时间偏移与深度偏移对速度场的敏感性截然不同。时间偏移技术目前比较成熟;相应地,波动方程叠前深度偏移对速度误差敏感性强、抗干扰能力弱。计算精度及效率是研究叠前深度偏移方法的重要因素。基于射线理论的 Kirchhoff 叠前深度偏移方法<sup>[1]</sup>具有较高的计算效率,但它只适合于速度横向变化相对缓慢的介质;波动方程类偏移方法(如有限差分偏移方法<sup>[2~4]</sup>及傅里叶有限差分(FFD)<sup>[5]</sup>方法等)能够较好地适应速度场的横向变化;Wu 等<sup>[6,7]</sup>研究了相位屏波场传播算子

及其在地震中的应用。为了提高适应强横向介质中波传播的计算精度,人们发展了广义屏(GSP)技术<sup>[8~12]</sup>以及各种不同计算效率和准确度的屏算子。在实际资料处理中较为实用的偏移方法是 FFD 和 GSP 双域波动方程,两者均是对分裂步傅里叶法<sup>[13]</sup>进行改造而形成的方法,其他各类混合算子可以看做是它们的某种近似。FFD 采用有限差分进行高阶修正,容易产生数值频散现象;有限差分方法用于三维偏移成像时,引入方向分裂算法也会引起人为的方向各向异性。GSP 采用傅里叶法进行高阶修正,一般不会产生数值频散,并且 GSP 中由于采用了快速傅里叶变换(FFT)进行计算,因而 GSP 具有更高的计算效率。本文采用 GSP 进行偏移计算。

常规的速度分析基于一定的假设,所得到的速度信息只适合于时间偏移或叠后深度偏移等处理流程。理论上讲,叠前深度偏移流程是一个反复迭代的过程,迭代过程中修改的参数便是速度场信息(如同全波形反演的处理流程),其目的是得到地下复杂地质体的精确成像、提高地震资料的水平分辨率。任何速度场都存在误差,同为叠前处理流程,叠前时

\* 北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京)CNPC 物探重点实验室 510 室,102249。Email: wrq@cup.edu.cn

本文于 2013 年 3 月 8 日收到,最终修改稿于同年 3 月 28 日收到。

本研究受国家专项(2011ZX0519-008)及中石油重大基础研究项目(2011A-3605)联合资助。

间偏移对速度场不敏感,而叠前深度偏移对速度场比较敏感。

Roelof 等<sup>[14]</sup>通过采用不同孔径进行速度场平滑等手段分析了深度偏移对速度模型的敏感性;Grubb 等<sup>[15]</sup>、Pierre 等<sup>[16]</sup>讨论了速度误差引起深度偏移的不确定性;Samuel 等<sup>[17~21]</sup>对在深度偏移中因速度模型误差造成的成像结果误差进行了计算与分析。本文采用 GSP 法对 Marmousi 模型进行叠前深度偏移,通过引入几组不同的速度模型,分析叠前深度偏移结果对速度场误差的敏感性。对于确定的速度场数据体,对其做平滑处理,平滑前、后深度偏移结果是渐变的,说明此时叠前深度偏移结果对速度场的变化并不敏感,亦即叠前深度偏移结果对速度场的高波数成分不一定敏感;选择不同的速度场,特别是改变速度场的低波数成分之后,叠前深度偏移结果将会发生明显变化。叠前时间偏移对应的是水平层状介质模型,使用的是叠加速度,这种自上而下综合得到的速度数据体,其空间变化范围通常不是很大,也就是说,该数据体的低波数成分基本保持稳定,因而偏移结果对速度场不太敏感;叠前深度偏移使用的层速度信息,目的是对地下复杂构造地质体精确成像,此时层与层之间的层速度差别巨大,很难得到各层准确的层速度信息(包括层速度场的低波数成分),也就是说,叠前深度偏移速度场中的低波数信息很难求准,从而导致叠前深度偏移对速度场比较敏感。

## 2 叠前深度偏移对速度场敏感性分析

### 2.1 频率—波数域 GSP 波场延拓原理

地震勘探野外采集得到的数据体只有时间标示,并无直接深度概念。数据处理中首先得到的是叠加速度,由于其受上覆地层的综合作用,叠加速度通常总是缓变、稳定的,可以利用 Dix 公式将叠加速度转换成层速度。基于数据误差存在这一客观事实,在由叠加速度转换成层速度时,计算结果并不总是稳定的。随着计算机软、硬件技术的发展,地震资料处理很快由叠后进入到叠前时间偏移阶段;由于时间偏移是建立在均匀介质或水平层状介质速度模型基础之上的,当速度场横向变化或不满足水平层状介质假设时,时间偏移不能准确成像,于是出现了叠前深度偏移。叠前时间偏移使用的是叠加速度,

它对速度场不太敏感;叠前深度偏移使用的层速度,能适应速度场的横向变化,但对速度场很敏感,成像效果取决于速度模型的精度。在速度场无横向变化的前提下,叠前深度偏移非常接近于叠前时间偏移,此时叠前深度偏移对速度场是否依旧敏感?为了分析叠前深度偏移对速度模型敏感性的根源,参照叠前时间偏移方法,以具有精确速度数据体的 Marmousi 模型作为分析对象。

GSP 的基本思想是把速度场  $v(x, z)$  分解为层内常速背景  $c(z)$  与相应较小的层内变速扰动  $\Delta v(x, z)$  之和,即

$$v(x, z) = c(z) + \Delta v(x, z) \quad (1)$$

同理,把地震波场  $P(x, z, t)$  分解为与  $c(z)$  对应的背景场  $P_0(x, z, t)$  及与层内变速扰动  $\Delta v(x, z)$  对应的散射场  $P_s(x, z, t)$ , 即

$$P(x, z, t) = P_0(x, z, t) + P_s(x, z, t) \quad (2)$$

根据局部 Born 近似,可以得到频率—波数域 GSP 波场延拓表达式

$$P(k_x, z + \Delta z, \omega) = P_0(k_x, z + \Delta z, \omega) + P_s(k_x, z + \Delta z, \omega) \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} P_0(k_x, z + \Delta z, \omega) = e^{ik_z \Delta z} P(k_x, z, \omega) \\ P_s(k_x, z + \Delta z, \omega) = i \frac{\omega^2 \Delta z}{2c^2(z)k_z} \times \\ e^{ik_z \Delta z} \text{FT} \left[ \left( \frac{c(z)}{v(x, z)} - 1 \right) P(x, z, \omega) \right] \end{cases}$$

式中:FT 表示对水平坐标  $x$  做傅里叶变换;  $\Delta z$  为延拓步长;  $k_x$  为水平波数;  $k_z$  为垂直波数,且有

$$k_z = \sqrt{\left( \frac{\omega}{c(z)} \right)^2 - k_x^2}$$

文中主要针对  $v(x, z)$  沿  $x$  轴方向做波数域低通滤波处理,然后利用 GSP 方法进行偏移。

### 2.2 叠前深度偏移对速度场敏感性分析

为了深入了解速度场横向变化对深度偏移的影响,依次对经傅里叶变换后的速度场波数域数据体做一组低通滤波,对所得到的偏移结果进行对比分析,以弄清滤波前、后不同偏移结果的变化,探索叠前深度偏移对速度场横向变化、尤其是速度场中高波数部分的敏感性;为了了解叠前深度偏移对速度场低波数部分的敏感度,本文选择对准确速度场乘以适当的比例因子(此处采用 90%、110%),然后对比分析这些速度场对应的偏移结果。

对 Marmousi 模型提供的精确速度场分别乘以 90%、100%、110%，亦即是低于、等于、高于精确速度场。对于不同的速度场数据体，傅里叶变换前、后对应的波数域成分呈现确定的比例关系，所得到的叠前偏移结果却存在巨大差异。为了分析高、低波数成分对叠前偏移结果的影响，对波数域速度场做低通滤波，以系统对应的最高波数乘以一定的百分比作为低通滤波器的高通波数。对标准速度场(100%)采用 9 组低通滤波，高通波数为系统最高波

数的百分比分别是 10%~90%，增量为 10%。图 1 是该速度模型及其沿水平方向经傅里叶变换波数域对数振幅谱图(以 10 为底)；图 2、图 3 为低通滤波后的 Marmousi 速度模型及其沿水平方向傅里叶变换后波数域对数振幅谱图；图 4 为图 2、图 3 数据的叠前深度偏移结果；对其他两组数据体(精确速度场分别乘以 90%、110%)，采用 5 组低通滤波，高通波数占系统最高波数的百分比分别是 10%~90%，增量为 20%，偏移结果如图 5 及图 6 所示。

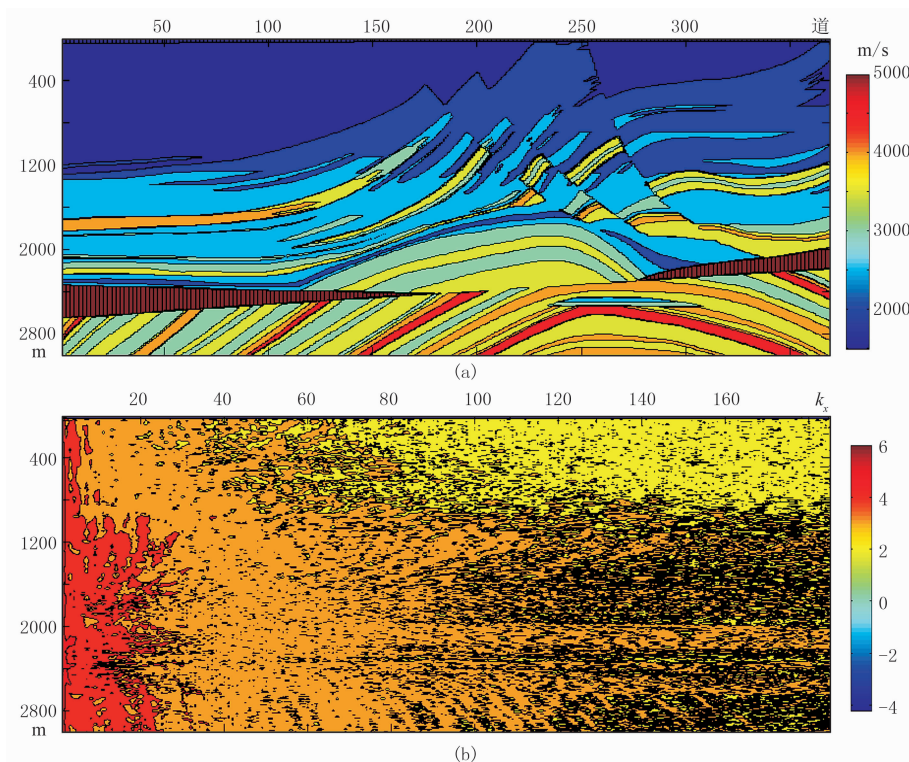


图 1 Marmousi 速度模型(a)及其对数振幅谱图(b)

从图 4 可以看出，随着低通滤波器的高通波数为系统最高波数的百分比不断增加，叠前深度偏移成像质量逐渐提高，说明此时叠前深度偏移对速度场的高波数成分不太敏感；也就是说，随着百分比的逐步变小，叠前深度偏移的成像质量逐步变差。即使高通波数为系统最高波数的 20%，Marmousi 模型中主要的构造特征依然显现在偏移结果中(图 4b)。高通波数为系统最高波数的 10% 的偏移结果比 20% 的偏移结果要差许多(图 4a)，其余相邻百分比的偏移结果相差并不太明显，这说明了叠前偏移对速度场低波数敏感、高波数不太敏感(图 4c~图 4i)。图 5、图 6 分别为 Marmousi 模型精确速度场分别乘以 90%、110% 低通滤波后叠前深度偏移结

果。对比图 5、图 6 同样可以得出上述结论。因此，对于波数域 Marmousi 模型而言，叠前深度偏移对高波数不敏感、低波数较为敏感。如果速度模型异常复杂，模型中的高波数成分所占比例较大，叠前深度偏移对比重较大的高波数成分依然会敏感。

由于上覆地层少、误差积累小，采用的比例因子 90%、110% 比较接近于 1，速度误差较小，图 5 和图 6 的浅层成像较好；深层成像较差。显然，图 5 与图 4 或者图 6 与图 4 相比，在波数域内，由于图 5、图 6 是图 4 对应的速度场分别乘以 90%、110%，因此傅里叶变换后对应的波数成分也呈对应的比例关系；在标准 Marmousi 模型速度场傅里叶变换后波数域内，低波数成分的绝对值远大于高波数成分的



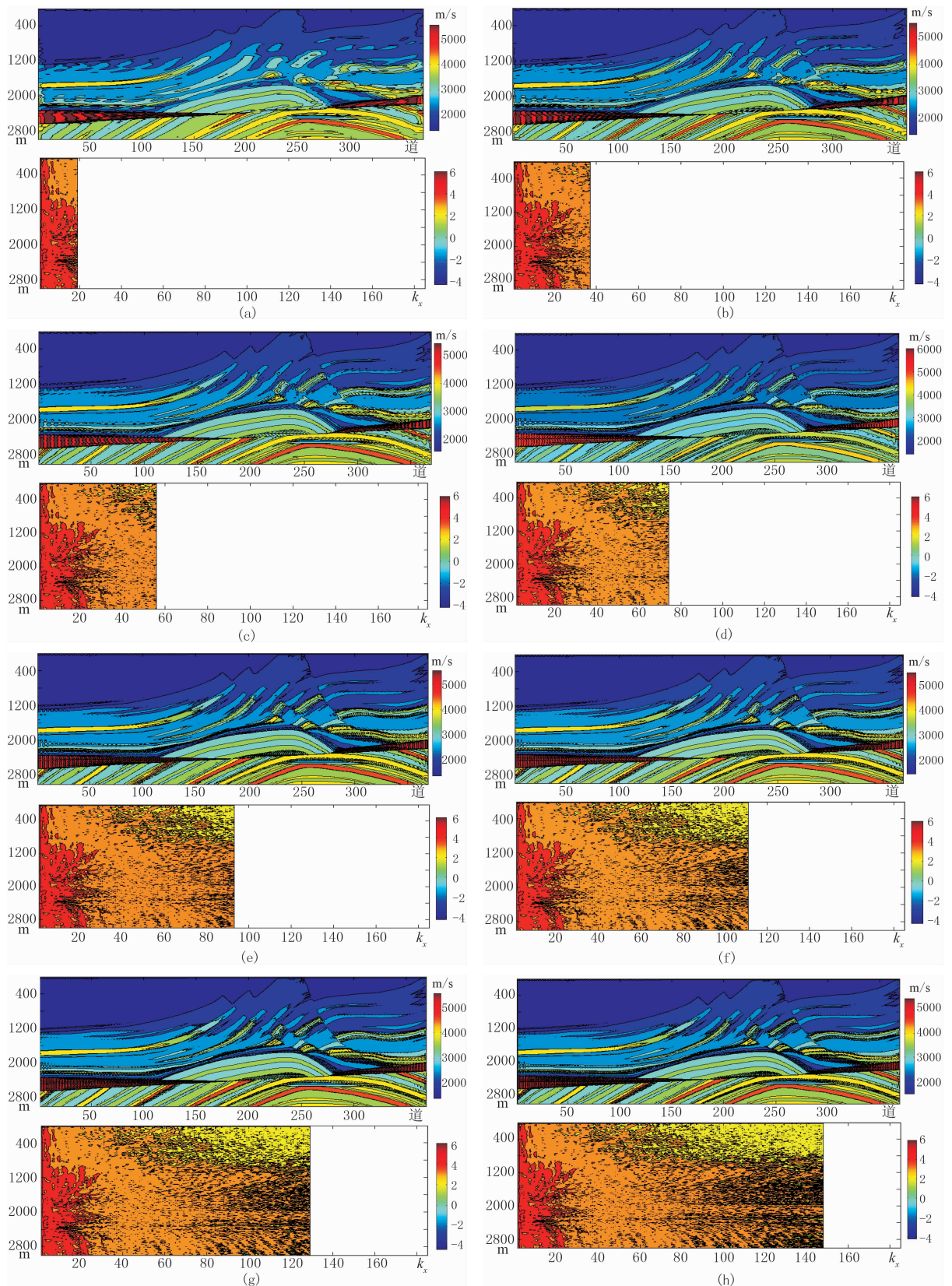


图 2 Marmousi 精确速度模型低通滤波后剖面(上)及其对数振幅谱图(下)(一)  
(a)10%; (b)20%; (c)30%; (d)40%; (e)50%; (f)60%; (g)70%; (h)80%  
百分数为高通波数占系统最高波数的百分比,下图同。



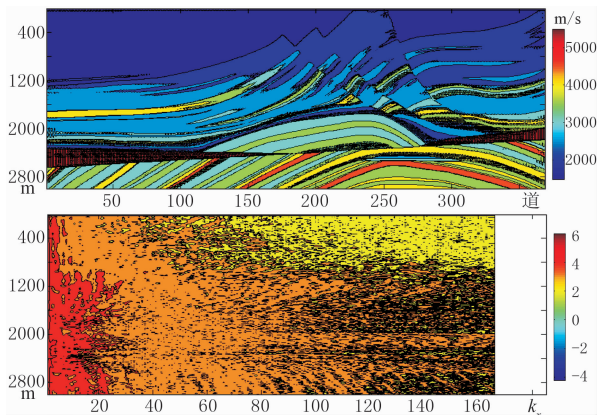


图3 Marmousi 精确速度模型低通滤波后剖面(上)及其对数振幅谱图(下)(二)

图中高通波数占系统最高波数的百分比为 90%

绝对值(图 2、图 3)。因此,图 5 与图 4 相比,造成偏移结果产生巨变的主要原因还是由于速度场中低波数成分差异所致。叠前时间偏移使用的是叠加速

度,叠前深度偏移使用的是层速度;叠加速度场中的低波数部分比较稳定,但在复杂介质中由叠加速度转换成层速度时不一定稳定,因此,叠前深度偏移相对叠前时间偏移而言对速度场就敏感得多。

一般说来,空间域速度场平滑通常改变的是速度模型的高波数成分。从图 4~图 6 可以看出,由于叠前深度偏移对高波数并不敏感,因此空间域速度场平滑改善叠前深度偏移结果的作用有限。此外,速度场网格间隔通常大于野外实际观测系统的检波器网格间隔;由于各炮对应的速度场数据体总是存在着相互交叉现象,在速度建模阶段,依照有限炮点波场信息修改后的速度模型也许会改变其他炮点对应的速度数据体,导致新的叠前深度偏移敏感性现象发生。因此在速度建模中对于偏移结果比较理想的炮集,保持它们对应速度场的低波数成分,只修改对应速度场的高波数部分。

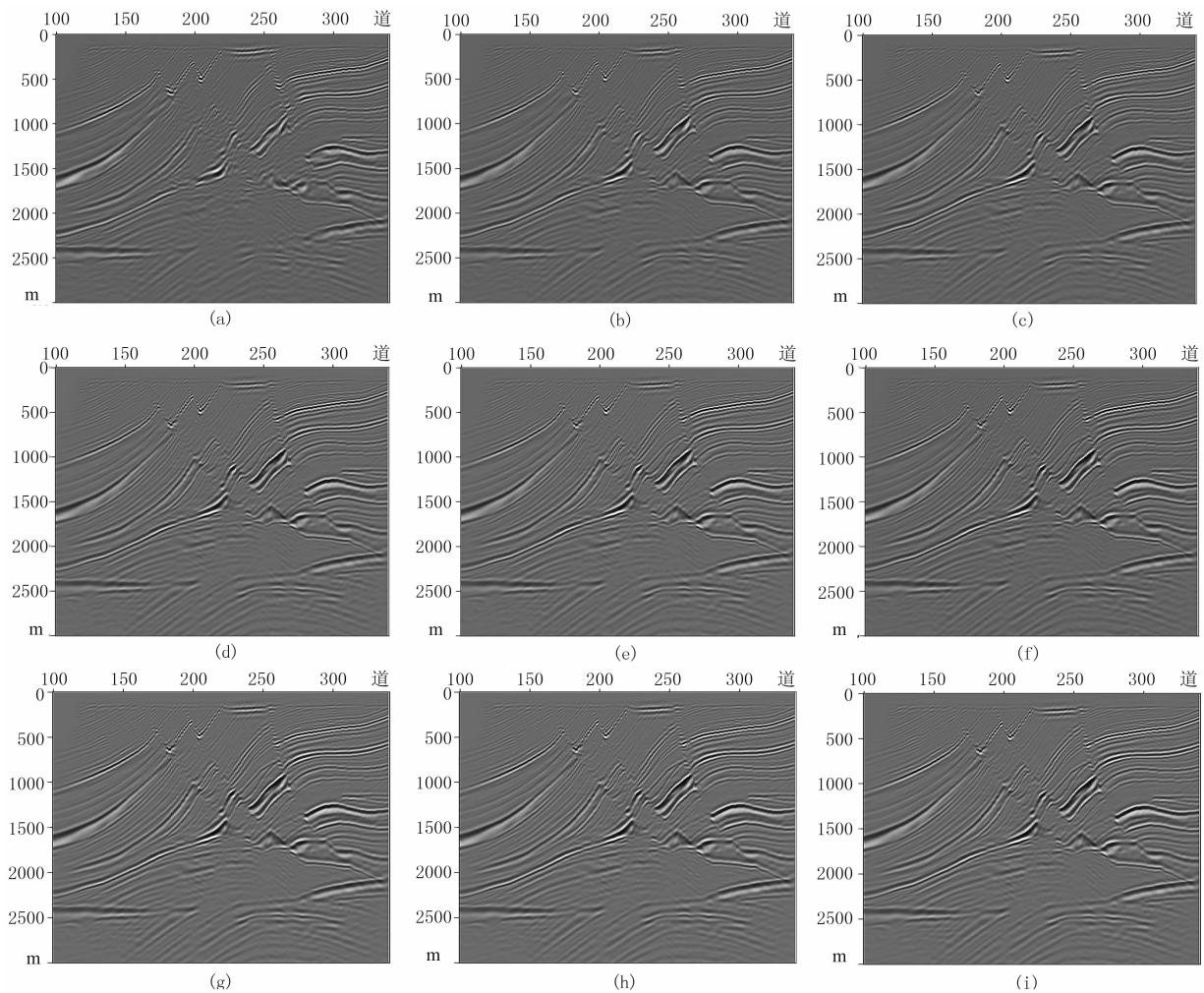


图4 Marmousi 模型精确速度场低通滤波后的叠前深度偏移结果

(a)10%; (b)20%; (c)30%; (d)40%; (e)50%; (f)60%; (g)70%; (h)80%; (i)90%

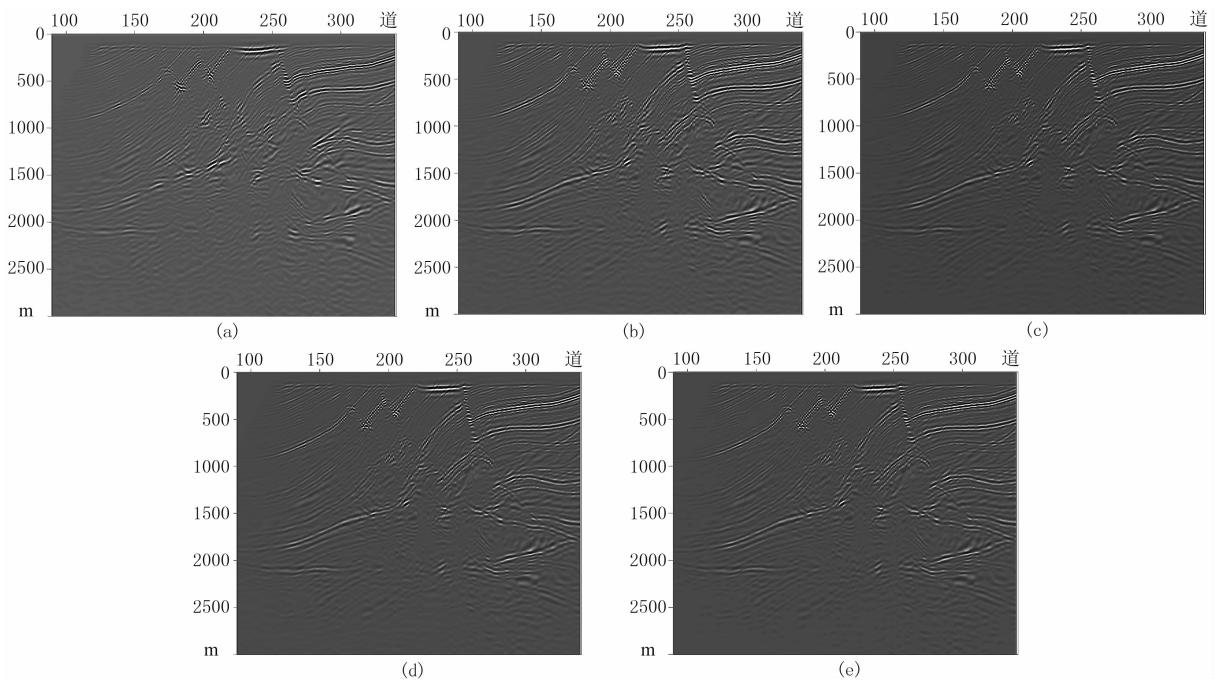


图 5 Marmousi 模型精确速度场  $\times 90\%$  低通滤波后的叠前深度偏移结果  
(a)10%; (b)30%; (c)50%; (d)70%; (e)90%

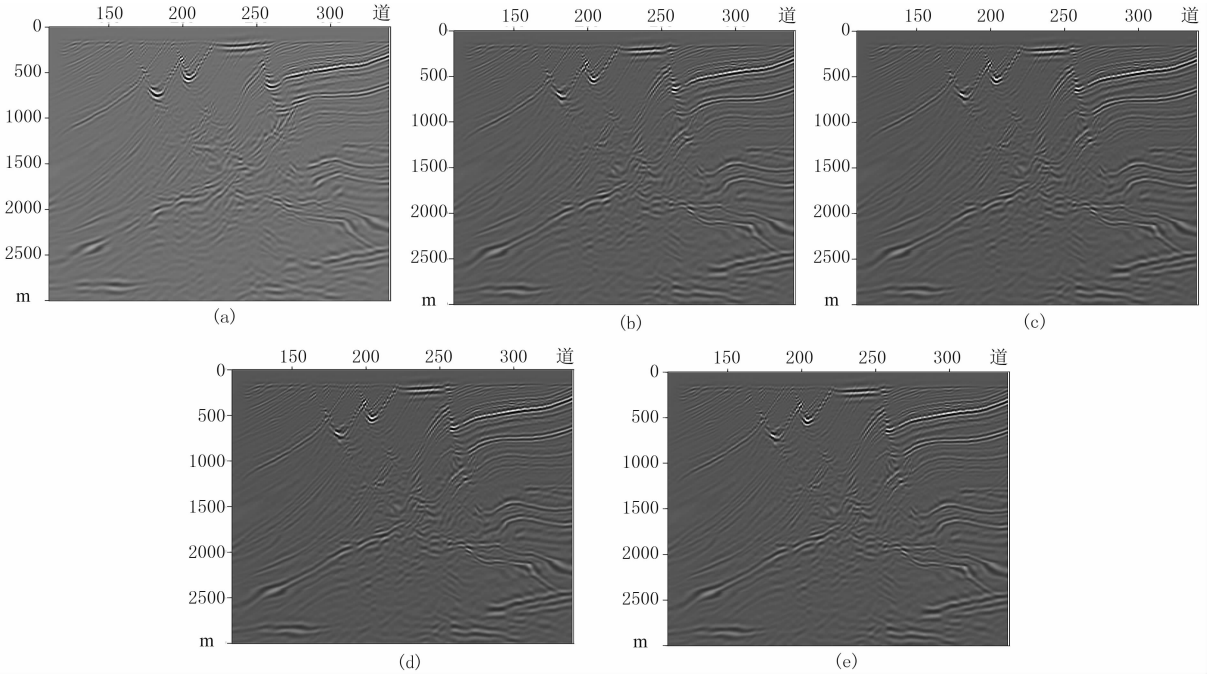


图 6 Marmousi 模型精确速度场  $\times 110\%$  低通滤波后的叠前深度偏移结果  
(a)10%; (b)30%; (c)50%; (d)70%; (e)90%

### 3 结束语

本文采用广义屏法对 Marmousi 模型做叠前深度偏移处理,通过引入三组不同的速度数据体分析

叠前深度偏移对速度场的敏感性。对于确定的速度场数据体,经过波数域低通滤波处理,滤波前、后叠前深度偏移结果是渐变的,说明叠前深度偏移结果对速度场的高波数成分不一定敏感;选择不同的速度场,尤其是改变速度场的低波数成分之后,叠前深

度偏移结果将会发生明显改变。由于叠前深度偏移使用层速度信息,而层速度(相对于叠加速度)在速度模型中的变化范围较大,导致叠前深度偏移比叠前时间偏移对速度场要敏感许多。

本文遵循从叠前时间偏移到叠前深度偏移的发展思路,在由叠加速度转换成层速度的过程中,由于真实的层速度通常是经过反复迭代计算后得到的,在建立速度模型的初始阶段,重点应该是调试速度场的低波数部分,由这部分速度场信息可以得到一个大致正确的叠前深度偏移结果,然后再修改速度场的高波数部分,循序渐进地得到准确的速度模型。鉴于速度场空间平滑并不会改变其低波数成分,在速度场低波数数据体存在误差的情况下,空间平滑不会改进叠前深度偏移的处理效果。在做单炮深度偏移处理时,若该炮对应的速度场低波数数据信息发生变化,模型修改前、后偏移结果也会产生较大变化,这也是叠前深度偏移对速度模型的敏感性因素之一。本文思路有利于指导叠前深度偏移处理中的速度建模。

#### 参考文献

- [1] Schneider W. Integral formulation for migration in two and three dimensions. *Geophysics*, 1978, 43(1): 49~76
- [2] Claerbout J. *Fundamentals of Geophysical Data Processing*. McGraw-Hill Book Co, 1976
- [3] 马在田. 高阶方程偏移的分裂算法. 地球物理学报, 1983, 26(4): 377~388  
Ma Zaitian. A splitting-up method for solution of higher-order migration equation by finite-difference scheme. *Chinese J Geophys*, 1983, 26(4): 377~388
- [4] 张关泉. 利用低阶偏微分方程组的大倾角差分偏移. 地球物理学报, 1986, 29(3): 273~282  
Zhang Guanquan. Steep dip finite-difference migration using the system of lower-order partial differential equations. *Chinese J Geophys*, 1986, 29(3): 273~282
- [5] Ristow D, Ruhl T. Fourier finite-difference migration. *Geophysics*, 1994, 59(12): 1882~1893
- [6] Wu R S. Synthetic seismograms in heterogeneous media by one-return approximation. *Pure and Appl Geophys*, 1996, 148: 155~173
- [7] Huang L J, Wu R S. Prestack depth migration with acoustic screen propagators. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1996, 15: 415~418
- [8] Wu R S. Wide-angle elastic wave one-way propagation in heterogeneous media and an elastic wave complex screen method. *J Geophys Res*, 1994, 99: 751~766
- [9] Jin S, Wu R S, Peng C. Seismic depth migration with pseudo-screen propagator. *Computational Geosciences*, 1999, 3: 321~335
- [10] De Hoop M, Rousseau J, Wu R S. Generalization of the phase screen approximation for the scattering of acoustic waves. *Wave Motion*, 2000, 31: 43~70
- [11] 金胜汶, 许士勇, 吴如山. 基于波动方程的广义屏叠前深度偏移. 地球物理学报, 2002, 45(5): 684~690  
Jin Shengwen, Xu Shiyong, Wu Rushan. Wave equation based prestack depth migration using generalized screen propagator. *Chinese J Geophys*, 2002, 45(5): 684~690
- [12] 陈生昌, 马在田. 波动方程的高阶广义屏叠前深度偏移. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1445~1451  
Chen Shengchang, Ma Zaitian. High order generalized screen propagator for wave equation prestack depth migration. *Chinese J Geophys*, 2006, 49(5): 1445~1451
- [13] Stoffa P L, Fokkema J T, de Luna Freire et al. Split-step Fourier migration. *Geophysics*, 1990, 55(4): 410~421
- [14] Roelof Jan Versteeg. Sensitivity of prestack depth migration to the velocity model. *Geophysics*, 1993, 58(6): 873~882
- [15] Grubb H, Turaz A, Hanitzsch C. Estimating and interpreting velocity uncertainty in migrated images and AVO attributes. *Geophysics*, 2001, 66(4): 1208~1216
- [16] Pierre Thore, Arben Shtukaz, Magali Lecour et al. Structural uncertainties: Determination, management, and applications. *Geophysics*, 2002, 67(3): 840~852
- [17] Samuel H Bickel. Velocity-depth ambiguity of reflection traveltimes. *Geophysics*, 1990, 55(3): 266~276
- [18] Zhu Jinming, Larry Linesz and Sam Gray. Smiles and frowns in migration/velocity analysis. *Geophysics*, 1998, 63(4): 1200~1209
- [19] Liu Zhenyue, Norman Bleistein. Migration velocity analysis: Theory and an iterative algorithm. *Geophysics*, 1995, 60(1): 142~153
- [20] 贺锡雷, 吴永国, 贺振华. 速度误差对时间偏移和深度偏移的影响分析. 物探化探计算技术, 2010, 32(5): 459~463  
He Xilei, Wu Yongguo, He Zhenhua. Analysis of velocity error to the time and depth migration. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 32(5): 459~463
- [21] 潘宏勋, 方伍宝. 速度模型误差给叠前深度偏移成像带来的假象. 物探化探计算技术, 2010, 32(1): 64~67  
Pan Hongxun, Fang Wubao. Alias in prestack depth migration from the velocity model error. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 32(1): 64~67

(本文编辑: 金文昱)