

Kirchhoff叠前偏移在天然气水合物准三维地震资料处理中的应用

潘文勇¹，雷新华¹，沙志彬²，张 新¹，雷新民¹，刘豪杰¹

(1 中国地质大学 软件学院，北京 100083 2 广州海洋地质调查局，广东 广州 510760)

摘要：在针对天然气水合物的准三维地震资料处理中，由于受观测系统不规则、横向覆盖次数变化剧烈以及空间假频的影响，叠后偏移难以取得良好的效果。本研究从目前天然气水合物准三维地震资料偏移成像研究现状入手，总结了叠后偏移成像存在的问题，对比分析了 Kirchhoff叠前偏移和波动方程叠前偏移的原理和特点，认为 Kirchhoff积分法受观测系统不规则和横向覆盖次数变化剧烈的影响较小，适合于天然气水合物准三维地震资料叠前偏移处理。并将 Kirchhoff积分法叠前偏移应用到南海北部神狐海域天然气水合物准三维地震资料处理中，同叠后偏移处理相比，Kirchhoff叠前偏移处理获得了更好的效果。

关键词：天然气水合物；准三维；叠后偏移；Kirchhoff叠前偏移

中图分类号：P631.4 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2010)05-0986-07

Application of Kirchhoff Prestack Migration Technology on Interpretation of Quasi Three Dimensional Seismic Data of Gas Hydrate

PAN Wen-yong¹, LEI Xin-hua¹, SHA Zhi-bin², ZHANG Xin¹, LEI Xin-min¹, LIU Hao-jie¹

(1. School of Software China University of Geosciences Beijing 100083 China;
2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 510760 China)

Abstract In the course of processing quasi three dimensional seismic data of gas hydrate, the effect of poststack migration is unsatisfactory resulting from the influences of the irregularity of geometry, intense changes of folds and spatial aliasing. This paper studied the present development status of migration imaging on interpretation of quasi three dimensional seismic data of gas hydrate, and concluded the problems of poststack migration and analyzed the characteristics of main prestack migration algorithms. It is believed that Kirchhoff integral method is little effected by the irregularity of geometry and intense changes of velocity and is favorable to prestack migration processing of quasi three dimensional seismic data of gas hydrate. Kirchhoff integral method prestack migration was applied to process the quasi three dimensional seismic data collected in Shenhu area in northern South China Sea and obtained better effect than poststack migration.

Key words natural gas hydrate; quasi three dimension; poststack migration; Kirchhoff prestack migration

0 引 言

地震勘探是国内外海域天然气水合物调查的主要技术之一^[1]。在针对南海北部海域天然气水合物的地震勘探中，为实现天然气水合物矿体的

准确定位和研究天然气水合物赋存的空间分布情况，需采用准三维地震采集技术^[2]，将海上采集的二维数据进行特殊的观测系统定义，以获取钻探目标区内高分辨率、高信噪比、高保真的三维数据体，即准三维地震资料。偏移处理是准三维地

收稿日期：2010-03-12 改回日期：2010-05-09 责任编辑：潘令枝。
基金项目：国家高技术研究发展计划项目 (2006AA09A202-02-01)。
作者简介：潘文勇，男，硕士研究生，1986年出生，地球物理学专业，主要从事天然气水合物地震勘探研究工作。
Email: pwy198692@126.com
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

震资料处理的关键环节之一,同时也面临着许多困难。通过对加拿大 Cascadia 古大陆俯冲带^[3]、美国布莱克海台^[4]、日本南海海槽区域^[5]以及本研究的前期工作中天然气水合物准三维地震资料叠后偏移处理的分析和研究,认为受观测系统不规则、横向覆盖次数变化剧烈以及空间假频的影响,叠后偏移难以取得良好的效果,这在很大程度上制约了天然气水合物研究的发展。

本文对目前常用的三维叠前偏移方法——克希霍夫(Kirchhoff)积分法叠前偏移方法^[6]和波动方程叠前偏移方法^[7],进行了对比分析,认为 Kirchhoff 积分法叠前偏移受观测系统不规则和横向覆盖次数变化剧烈的影响较小,具有高效的处理横向速度变化的能力,并且对于覆盖次数非常高、工区面积较大的海上三维地震数据,具有更高的运算效率。因此, Kirchhoff 积分法更适合天然气水合物准三维地震资料的叠前偏移处理。

本文采用 Kirchhoff 叠前偏移处理方法,对南海北部神狐海域珠江口盆地南缘获得的准三维地震资料进行处理,并将得到的叠前偏移剖面与叠后偏移剖面进行了对比分析。

1 准三维地震资料偏移成像面临的问题

在天然气水合物的准三维地震资料处理过程中,偏移成像是最为关键的环节之一,同时也面临着新的困难。首先,在准三维地震数据采集时,由于横向海流引起电缆羽状偏离,造成观测系统不规则和联络线方向覆盖次数变化剧烈,导致联络线方向偏移成像连续性差、分辨率低^[8];其次,天然气水合物矿体往往呈分散状、块状、层状、瘤状等不规则分布,导致含水合物层横向速度变化剧烈,从而会对偏移成像产生影响;再次,在偏移处理时,频率过高则会产生空间假频,频率过低则无法满足天然气水合物高分辨率处理的要求。

受上述几方面因素的影响,目前针对天然气水合物的准三维地震数据偏移成像都存在一定的问题。1999 年加拿大对 Vancouver 岛岸外的 Cascadia 古大陆俯冲带(ODP 164 航次)获得的准三维地震数据进行了叠后偏移处理^[3],但效果很不理想,尤其是地形较陡的地方出现了严重的绕射波。2000 年美国对布莱克海台采集的准三维地震数据进行了叠后偏移处理^[4],由于布莱克海台海底地

形平坦,且地震资料频率低,空间假频对偏移成像的影响较小,偏移效果较为理想;但联络线方向成像连续性较差,同时地震资料的分辨率很低,在地震剖面上仅能识别海底及 BSR 等振幅较强的同相轴。2000 年日本对南海海槽区域的地震数据进行了叠后偏移处理^[5],在叠后偏移剖面上,虽然海底地形平缓处成像连续性好,但是在地形较陡处则成像连续性差,并且剖面整体分辨率较低。在本研究的前期工作中,采用各种方法对南海北部海域的准三维地震数据进行了叠后偏移处理,发现整个叠后偏移剖面的信噪比和分辨率很低,尤其在海底浅层,同相轴不清晰,为成像模糊的弱振幅带,难以解释 BSR 等天然气水合物基本特征。

根据以上研究,认为在针对天然气水合物准三维地震资料处理中,叠后偏移处理难以取得良好的效果。

2 准三维地震资料叠前偏移方法选择

叠前时间偏移处理技术利用叠前道集及均方根速度场,能够将各个地震数据道偏移到真实的反射点位置,形成共反射点道集,再进行叠加,提高偏移成像精度。在目前的实际资料处理中,三维叠前偏移方法主要有两种:一是 Kirchhoff 积分法偏移;二是波动方程偏移。通过对两种叠前偏移方法的对比分析,认为 Kirchhoff 积分法叠前偏移比波动方程叠前偏移更适合天然气水合物准三维地震资料的叠前偏移处理。

2.1 Kirchhoff 积分法叠前偏移

Kirchhoff 积分法是以 Hagedoorn(1954)“绕射最大凸度曲线”的概念为基础建立叠前深度偏移的方法,它符合 Snell 定律,遵从波的绕射、反射和折射定律^[9]。其积分的目标量可以是反射系数、角度量或其他的物理量。Kirchhoff 偏移利用边界积分法^[10],近似求解波动方程来实现地震数据的成像,地球内部各点的声波反射系数由记录在多维曲面上的数据加权求和来获得^[11],求和曲面的形状以及加权系数由单个散射波传播的格林函数计算,基于格林函数理论和波动方程积分求解^[12]。三维叠前 Kirchhoff 深度偏移在频率-空间的积分形式如公式(1)所示:

$$U(x,y,z,\omega) = \frac{1}{2\pi} \iint \varepsilon(\eta,\theta,\omega) \frac{z}{r} \cdot \left[\frac{ik}{r} - \frac{1}{r^2} \right] d\eta d\theta \quad (1)$$

式中: r 为地下点 (x, y, z) 到地面点的距离, $\sin \frac{z}{r}$ 为倾斜因子, 用于振幅校正; ω 为圆频率, $H_z k$ 为圆波数, $1/m$ 。公式 (1) 可用来完成频率 - 空间域的 Kirchhoff 积分法的偏移成像。同样, Kirchhoff 叠前偏移也可在时间 - 空间域实现, 只是积分形式有所不同。

Kirchhoff 积分法叠前偏移能够适应不同的观测系统, 对输入的地震数据没有特殊要求。若想使陡倾角成像, 可以加大偏移孔径来实现。若要 进行参数测试或利用偏移后的 CRP 道集重新进行速度分析, 就可以按照给定的三维网格输出偏移结果, 具有较高的灵活性, 并且该方法计算速度快、效率高; 但是, Kirchhoff 积分法由于其固有理论的缺陷, 存在容易出现假频、深层分辨率降低、振幅关系保持不好等缺点。

2.2 波动方程叠前偏移

波动方程叠前偏移是在共炮集域中实现的, 需要对每一炮进行单炮偏移成像, 然后再把各炮成像结果在对应的地下位置上叠加, 从而得到整个成像剖面, 其计算量非常大。该方法可以输出整个三维的 CRP 道集, 但不能按速度谱网格输出 CRP 道集。波动方程叠前偏移的核心是波场外推算子, 目前常用的波场外推算一般为分步 Fourier 方法^[6]。

分步 Fourier 方法由下行波的相移方程和时移方程组成, 在频率 - 波数域和频率 - 空间域中交替进行的。在频率 - 波数域中进行相移偏移, 收敛绕射波。在频率 - 空间域校正由于横向变速引起的时差。与上行波外推方法结合, 加上成像条件, 即可进行波动方程叠前时间偏移。

波动方程偏移是复杂构造成像的最有效方法, 其优势在于它良好的成像保真性, 成像结果更适于做叠前反演、属性处理等工作。该方法用可以描述波在复杂构造中的传播过程的算子作波场外推算子, 因而该方法更适合复杂介质的偏移成像。它的另一优点是其保幅性, 这为地震资料偏移成像后进行的波阻抗反演奠定了良好的基础。但波动方程叠前时间偏移对地震观测系统的适用性较差, 一般需对输入数据进行规则化预处理。

2.3 Kirchhoff 叠前偏移算法的优势

尽管波动方程叠前偏移方法有其自身优势, Kirchhoff 叠前偏移方法也存在缺陷, 但在针对天然气水合物准三维地震资料处理中, Kirchhoff 叠

前偏移主要有以下优势:

(1) 受单源单缆采集方式和海上施工条件差异的影响, 观测系统变化较大, 三维数据横向覆盖次数变化剧烈; 因此, Kirchhoff 积分法叠前偏移比波动方程叠前偏移更适合天然气水合物准三维地震处理。

(2) 由于天然气水合物赋存形态的不规则导致其赋存带横向速度变化剧烈, 而 Kirchhoff 积分法偏移的优点之一是它具有相对高效的处理横向速度变化的能力; 因此, Kirchhoff 叠前偏移具有更好的效果。

(3) 由于 Kirchhoff 积分法在计算时间上大大优于波动方程法, 尤其是对于覆盖次数非常高、工区面积较大的海上三维地震数据, 这种优势更加明显。

与其他偏移方法相比, Kirchhoff 积分法具有无可比拟的优势; 因此, 本研究最终选择 Kirchhoff 积分法来完成天然气水合物准三维地震资料叠前偏移。

3 Kirchhoff 叠前偏移技术实例应用

3.1 研究区概况

研究区位于南海北部陆坡中段神狐暗沙东南海域附近的珠江口盆地珠二坳陷^[16], 该地区水深范围在 800~1 600 m 之间, 水深线与海岸大致平行, 海底地形变化较大, 坡度较陡, 地质构造复杂(图 1)。珠江口盆地珠二坳陷自中中新世以来处于构造沉降阶段, 形成了良好的天然气水合物成藏地质条件^[17-18]。2005 年广州海洋地质调查局“奋斗四号”调查船采用准三维地震采集技术对神狐海域的地震数据进行了采集。施工宽度约为 9 km, 测线长度 17.3 km, 电缆长度 3 000 m (240 道接收), 设计测线间距 75 m, 道间距 12.5 m, 炮间距 25 m, 采样间隔 2 ms, 记录长度 6 s, 激发方式为气枪震源组合。本文对此次采集的准三维地震资料进行了 Kirchhoff 法叠前偏移处理。

3.2 准三维地震资料的叠前偏移处理

叠前偏移方法要求观测系统排列规则, 原始地震资料信噪比较高, 覆盖次数分布均匀, 偏移距分布均匀^[13-15]。为此, 笔者对叠前地震资料进行了针对性的预处理, 包括叠前去噪、反褶积和高精度速度分析等, 在一定程度上改善了叠前地震资料的品质, 均衡了覆盖次数和网格面元。在针对天然气水合物准三维地震资料的叠前时间偏

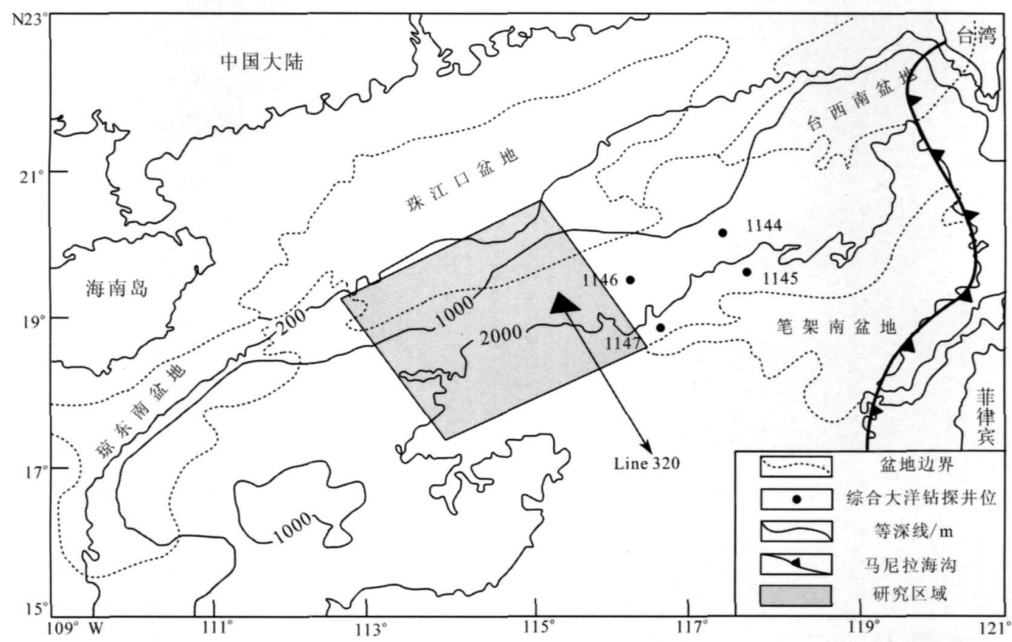


图 1 南海北部海域研究区位置图

Fig. 1 Location map of research area in northern South China Sea

移处理中, 主要难点在于合理的偏移速度的获取和参数的选择, 下面将从上述两个方面进行详细介绍。

3. 2. 1 速度模型的建立

叠前时间偏移一般采用均方根速度场获得从震源和检波点到地下位置的旅行时, 因此, 需要对水合物目标区进行精确的速度分析, 以便得到准确的速度场。初始速度模型建立的过程不仅是一个地震数据处理的过程, 而且是一个对地震作业区内地下地质构造形态、各种地质现象以及地质层序间关系划分等地质概念的分析、认识过程, 其准确程度直接关系到叠前时间偏移迭代的次数以及成像质量。因此, 初始速度模型的建立是叠前时间偏移成像技术的关键。

本研究通过对动校正后的 CMP 道集及对叠加成像的效果检验, 保证了叠加速度的准确性, 获取了比较精确的叠加速度; 再将叠加速度经插值平滑处理后得到均方根速度场, 以此作为初始速度模型对目标线进行偏移处理。为了得到更准确的偏移速度模型, 还需要对初始均方根速度模型进行修改, 即根据偏移后的 CRP 道集, 通过剩余均方根速度分析, 产生新的均方根速度, 并用它来更新以前的均方根速度体。如此不断迭代, 直到获得最满意的偏移速度体。图 2 所示为本研究得到的初始速度模型。

3. 2. 2 偏移孔径与反假频因子的选择

偏移孔径是准三维叠前时间偏移中极为重要的参数。Kirchhoff 叠前时间偏移算法通过倾角的限制和最大孔径时间来计算偏移孔径, 本研究在纵测线和联络线方向进行了大量的试验, 认为: (1) 偏移孔径太小会使陡倾角同相轴受到抑制, 同时造成振幅畸变, 以致影响陡倾角同相轴的成像, 绕射无法彻底收敛, 还可将随机噪声转化为以假水平同相轴为主的干扰, 这种现象在深层尤为严重; (2) 偏移孔径太大则可能把深层的噪声带到浅层来, 信噪比降低, 增加作业的运行时间; (3) 测线方向和联络线方向的最大偏移孔径定为 3 km 即可满足天然气水合物准三维叠前偏移处理的要求 (图 3)。

由于 Kirchhoff 积分法是利用绕射面对数据成像, 没有考虑数据频率成分, 其设计的算子是在离散的时间 - 空间域而不是频谱域, 所以 Kirchhoff 的积分算子很有可能产生空间假频。此外, 本研究进行偏移成像处理的目标区位于南海北部陆坡, 地层倾角比较大; 因此, 在实际进行叠前偏移处理时, 空间假频问题非常严重, 反假频因子的选择就尤为重要。本研究通过大量的试验, 认为反假频因子过小会增加高频噪声, 产生绕射波; 当设置反假频因子为 4 时, 绕射波收敛, 效果较好 (图 4)。

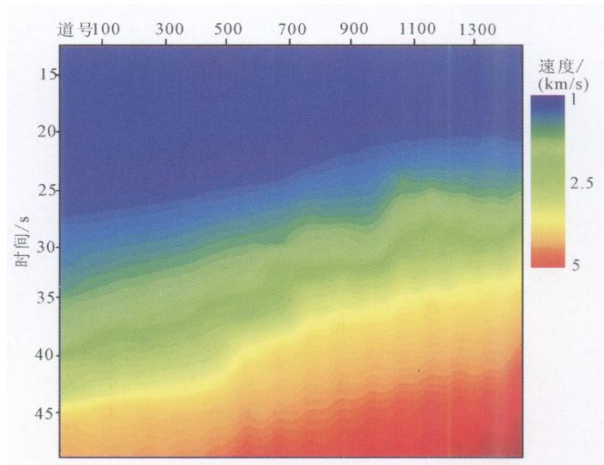


图 2 初始速度模型
Fig 2 Initial velocity model

3. 2. 3 叠前偏移效果分析

根据以上研究，采用 Kirchhoff积分法对南海北部海域的准三维地震资料进行了叠前偏移处理，将神狐海域 320 测线的叠前偏移剖面与叠后偏移剖面对比 (图 5)，可以看到：(1)经过叠前偏移处理的剖面上主要目的层段反射波能量适中，同相轴连续，反射层次齐全，地质特征明显；(2)成像效果好，主要表现为，地层接触关系清楚，波组特征明显，绕射波收敛，断面波归位，断点、断面清晰；(3)在天然气水合物特征识别方面，空白反射带明显，空白反射带与围岩接触关系清楚，BSR 清晰、易于识别追踪，为后续的地质解释、天然气水合物检测及叠后属性处理提供了高质量的三维地震数据。

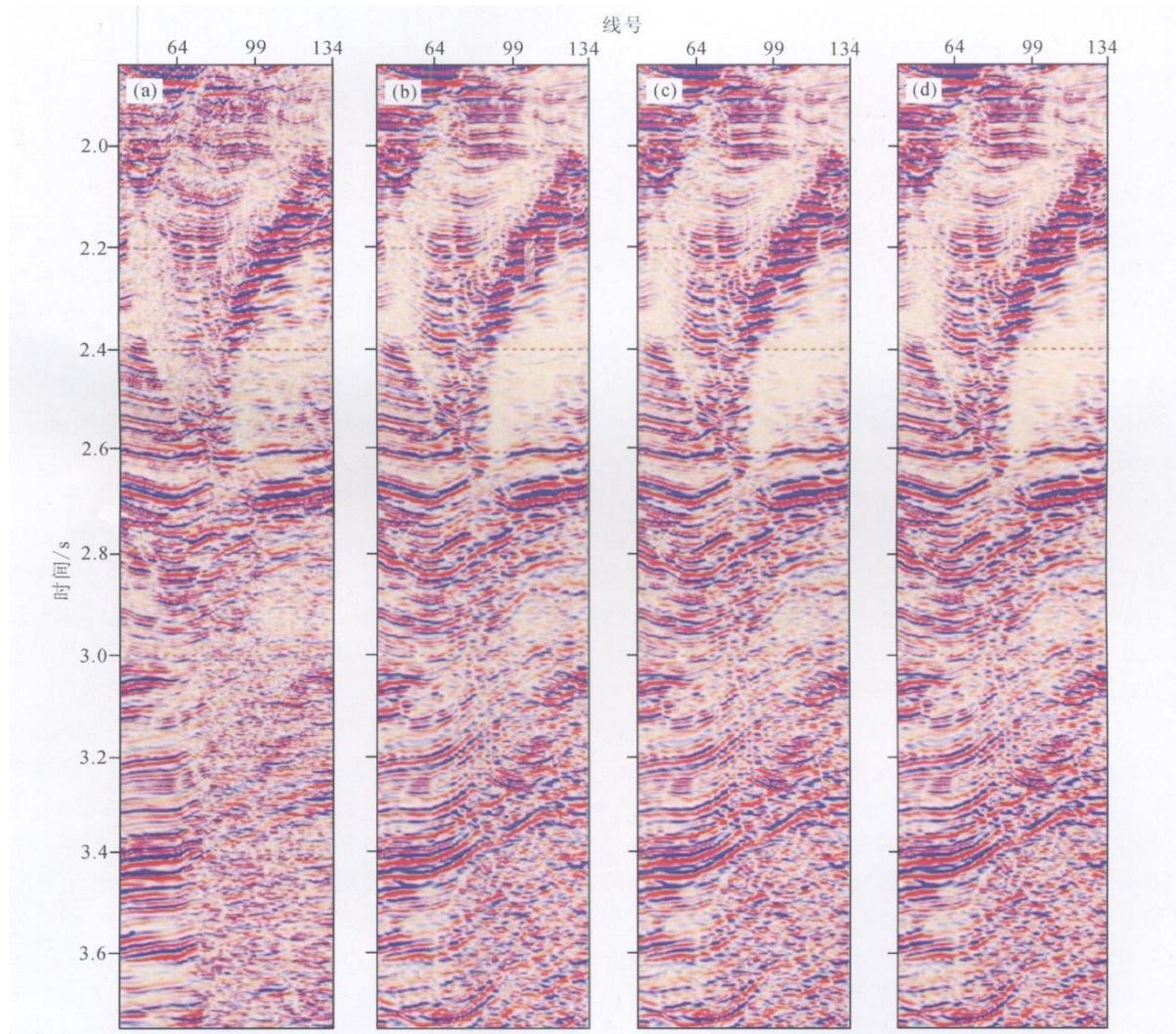


图 3 偏移孔径分别为 1 km (a)、2 km (b)、3 km (c)和 4 km (d)的效果图

Fig. 3 The migration effects of different apertures of 1 km (a), 2 km (b), 3 km (c) and 4 km (d)

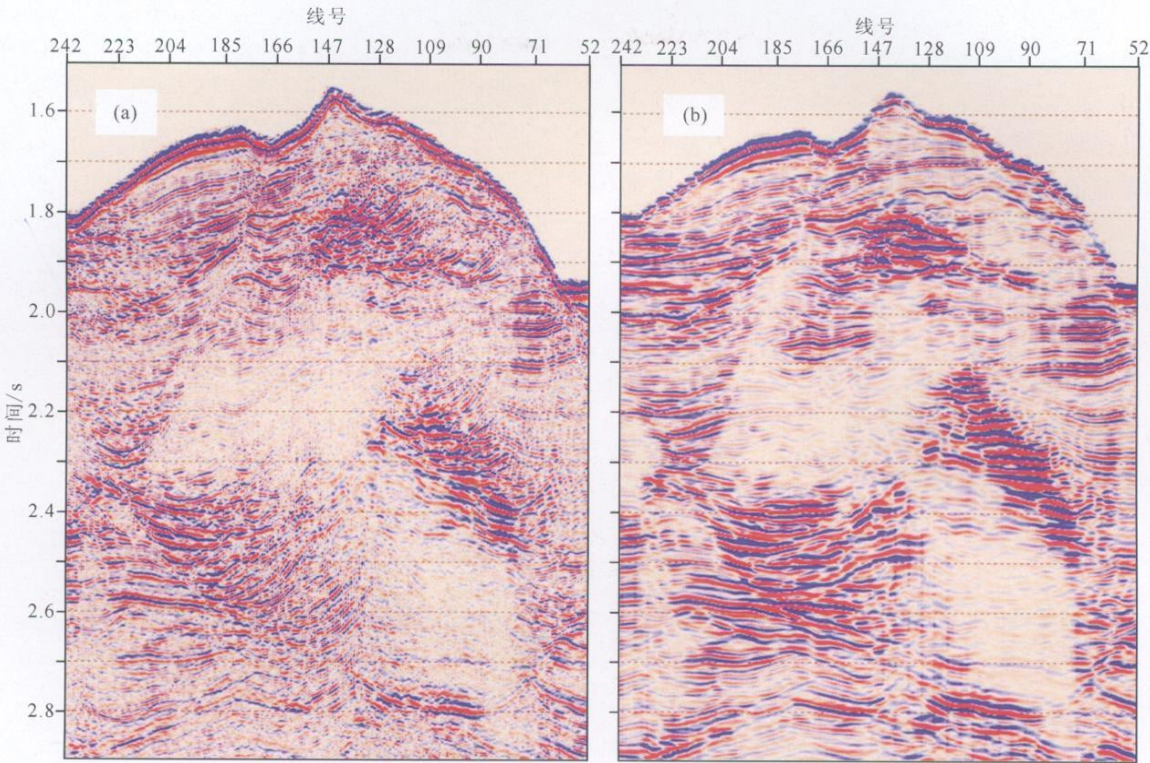


图 4 反假频因子分别为 2(a) 和 4(b) 时处理效果图
Fig. 4 The migration effects of anti-alias factors equal to 2(a) and 4(b)

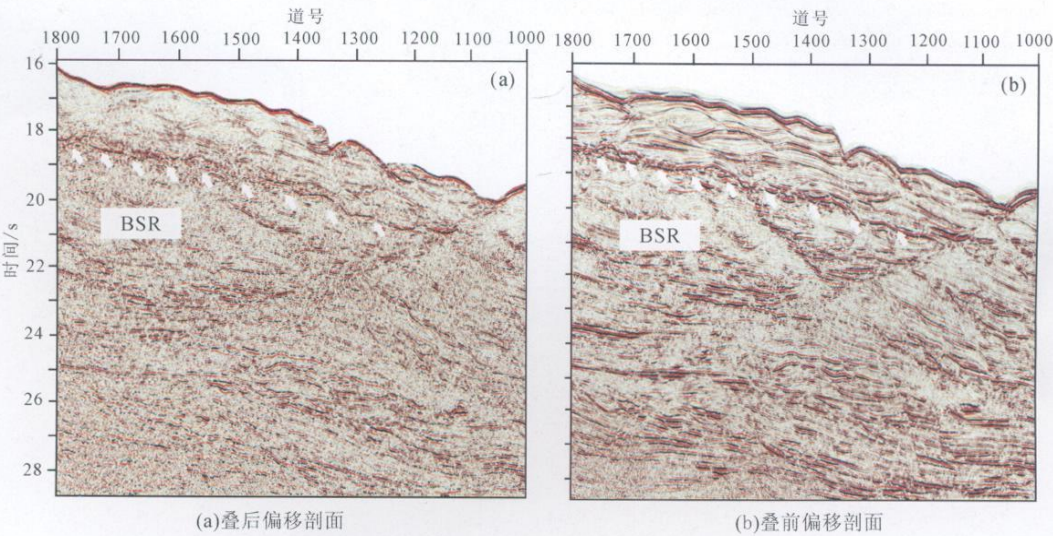


图 5 神狐海域 320 测线叠后偏移与叠前偏移处理效果对比
Fig. 5 The comparison of effects between poststack migration and prestack migration in line 320 of Shenhu area
((a) poststack migration profile in line 320 of Shenhu area; (b) prestack migration profile in line 320 of Shenhu area)

4 结 论

在前人研究的基础上, 本文分析了叠后偏移在针对天然气水合物准三维地震资料处理中存在的问题, 并对 Kirchhoff 叠前偏移和波动方程偏移

的特点进行了研究, 认为 Kirchhoff 叠前偏移受观测系统不规则和横向覆盖次数变化剧烈的影响较小, 对横向速度的变化具有较高的灵活性, 并且计算速度快、效率高, 比波动方程偏移更适合天然气水合物准三维地震数据偏移处理。

本研究将 Kirchhoff叠前偏移应用于南海北部神狐海域的准三维地震资料处理, 在叠前偏移处理过程中, 建立了精确的速度模型, 选取了合适的偏移孔径和反假频因子, 最终获得了具有良好效果的叠前偏移剖面。与叠后偏移剖面相比, 叠前偏移剖面的同相轴连续, 反射层次齐全, 地质特征明显; 绕射波收敛, 断面波归位, 断点、断面清晰, 成像效果更好; 并且 BSR 清晰连续, 空白带特征明显, 更有利于天然气水合物的勘探。因此, Kirchhoff叠前偏移适合于天然气水合物准三维地震资料叠前偏移处理。

参考文献:

[1] 张光学, 黄永样, 陈邦彦, 等. 海域天然气水合物地震学 [M]. 北京: 海洋出版社, 2006 27- 56.

[2] 赵庆献, 韩立国, 伍忠良, 等. 天然气水合物准三维地震勘探电缆动态定位精度研究 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(5): 936- 941.

[3] Michael Riedel. 3-D seismic investigations of northern Cascadia marine gas hydrate [D]. Victoria University of Victoria 2001.

[4] Matthew J.H. 3D seismic imaging and fluid flow analysis of gas hydrate province [D]. Laramie University of Wyoming 2005.

[5] Pecher I.A, Minshull T.A, Singh S.C, et al Velocity structure of a bottom simulating reflector offshore Peru: Results from full waveform inversion [J]. Earth and Planetary Science Letters 2001, 139 459- 469

[6] Stoffa P.L, Fokkema J.T, de Luma Freire R.M, et al Split step Fourier migration [J]. Geophysics 1990 55(4): 410- 421.

[7] 王棣, 王华中. 叠前时间偏移方法综述 [J]. 勘探地球物理进展, 2004 27(5): 310- 320.

[8] Cordson A. Narrow-versus wide-azimuth and 3D seismic surveys [J]. The Leading Edge 2002 21(8): 764- 770.

[9] Sherif R.E, Geldart L.P. Exploration Seismology [M]. Cambridge Cambridge University Press 1995 20- 25.

[10] Jon F.C, James L.Black. Basic Earth Imaging [M]. Stanford Stanford University Press 2005: 1- 17.

[11] 王锡文, 秦广胜, 陈君, 等. 叠前克希霍夫成像技术及其应用 [J]. 江汉石油学院学报, 2004 26(6): 52- 55

[12] 郭时光. Kirchhoff公式的一种推导 [J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2005, 18(2): 99- 102.

[13] 张永刚. 地震波场数值模拟方法 [J]. 石油物探, 2003 42(2): 143- 148.

[14] Alistair R.B. Seismic attributes and their classification [J]. The Leading Edge 1996 15(10): 1090

[15] Quiney C, Steve S. Seismic attributes technology for reservoir forecasting and monitoring [J]. The Leading Edge 1997, 16(5): 445- 456.

[16] 姚伯初, 杨木壮, 吴时国, 等. 中国海域的天然气水合物资源 [J]. 现代地质, 2008 22(3): 333- 341.

[17] 陆敬安, 杨胜雄, 吴能友, 等. 南海神狐海域天然气水合物地球物理测井评价 [J]. 现代地质, 2008 22(3): 447- 451

[18] 沙志彬, 王宏斌, 杨木壮, 等. 天然气水合物成矿带的识别技术研究 [J]. 现代地质, 2008 22(3): 438- 446