

塔里木盆地深反射地震资料处理

于常青¹ 杨文采¹ 李学良² 皮金云¹ 瞿 辰¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 1000)

摘要:通过对塔里木盆地巴楚至塔中的 12 s 深反射地震资料的分析、处理表明,在南北方向上,由和 3 井经和田 1 井至和 4 井基底由北向南逐步抬升,和 4 井向南基底变深;东西向,巴楚隆起基底较浅,到塔中变深;通过处理可以发现,除了通常可以看到的 T4-T9 各层反射结构外,在基底以下的深层,还能看到有效的反射;经初步解释和地质分析认为,所处理剖面同相轴连续性好,信噪比较高,归位准确,深层反射信息可靠,剖面所反映的构造形态清楚,规模较大,基本落实了所部署测线工区的地下构造,而且还揭示了一些以前尚未认识到的构造或构造显示,丰富了该区构造特征和构造演化的认识。

关键词:塔里木盆地;深反射地震资料;构造;静校正;信噪比;成像

中图分类号:P631.4⁺43 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2011)04-1032-16

塔里木盆地位于新疆维吾尔自治区南部,天山和昆仑山之间,盆地的北、西、南三面为高山环绕,只是东面有宽约 70 km 的孔道通向甘肃省河西走廊,是一个基本封闭的干旱盆地。盆地四周高山海拔多在 4000~6000 m,中部海拔 800~1300 m,地势由南向北倾斜,并且由西向东缓斜,从喀什至罗布泊,东西长约 1500 km,南北宽 400~500 km,盆地面积约 56 万 km²,是中国最大的内陆盆地。

为摸清盆地内深层区域的沉积相变化、卡塔克隆起西部和巴楚隆起的断裂及构造发育特征,落实基底形态,中石化于 2007 年在巴楚至塔中采集了两条记录长度为 12 s 的深反射地震剖面(图 1)。由于该剖面穿越了多个构造单元,且地表情况复杂,在对该剖面进行处理时,发现具有如下特点:①由于穿越多个构造单元,使得剖面的目的层埋藏较深,岩性变化大,深层反射能量弱,资料采集中获得好的中深层反射难度大;②该区大部分地区表层为沙土,对地震反射波的高频成分吸收衰减严重;③干扰波发育,除了规则面波、线性干扰波外,还存在一定的局部多次

波干扰和随机噪声干扰;④复杂多变的地表条件影响地震波的传播,致使地震资料存在静校正问题;⑤地下地质构造复杂,基底变化大,横向和垂向速度变化很大。针对以上问题,本文在对资料处理时采用了分时处理的办法(0~6 s 的精细目标处理和 0~12 s 的结构目标处理),通过对地震资料处理方法的试验研究,重点进行了以提高目的层信噪比、分辨率、深层反射信息和剖面成像质量及结构特征的技术攻关。

1 原始资料分析

研究区资料的基本特点是记录上各种干扰严重,尤其是面波和强线性干扰,而且沙丘越大这些干扰波越发育。该区的记录面貌从区域上划分,东部和南部资料的信噪比高于西部、北部;并且各测线之间单炮品质也不一致。

品质较差单炮浅、深层均看不到明显的有效反射同相轴(图 2);品质较好的单炮浅、深层均可见到有效反射同相轴(图 3);许多单炮质量一般,浅层可看到一些反射同相轴,深层几乎看不到反射同相轴。

收稿日期:2011-06-11;改回日期:2011-07-01

基金项目:中石化海相前瞻性项目(YPH08110)和中国地质调查局地质大调查项目(1212011120980)资助。

作者简介:于常青,男,1962 年生博士,研究员,长期从事油气勘探的研究工作,主要研究领域为地震资料处理解释、地震储层预测及综合评价、深部地球物理;E-mail:yucq@tom.com。

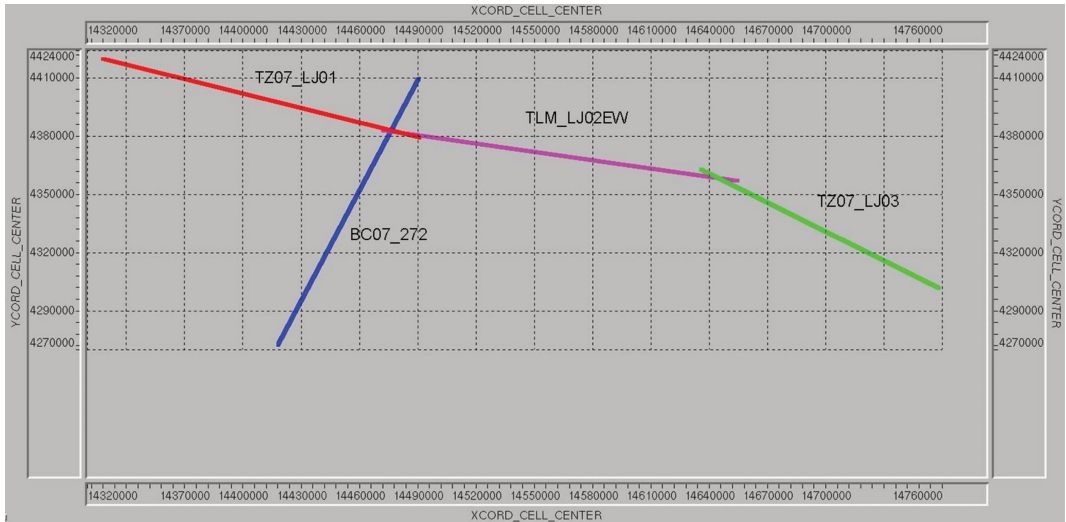


图 1 工区测线位置图
Fig.1 Location of the survey line in the work area

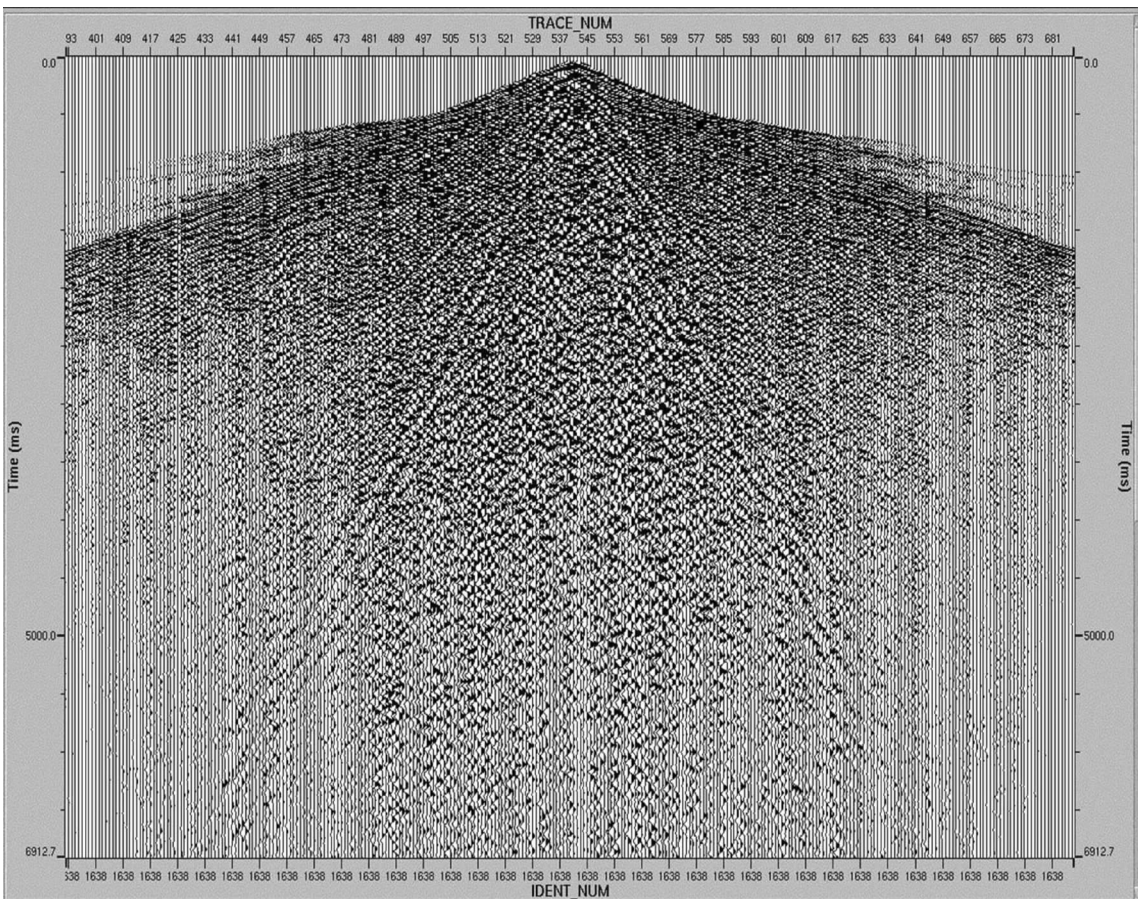


图 2 品质较差的原始单炮
Fig.2 Original gather with poor quality

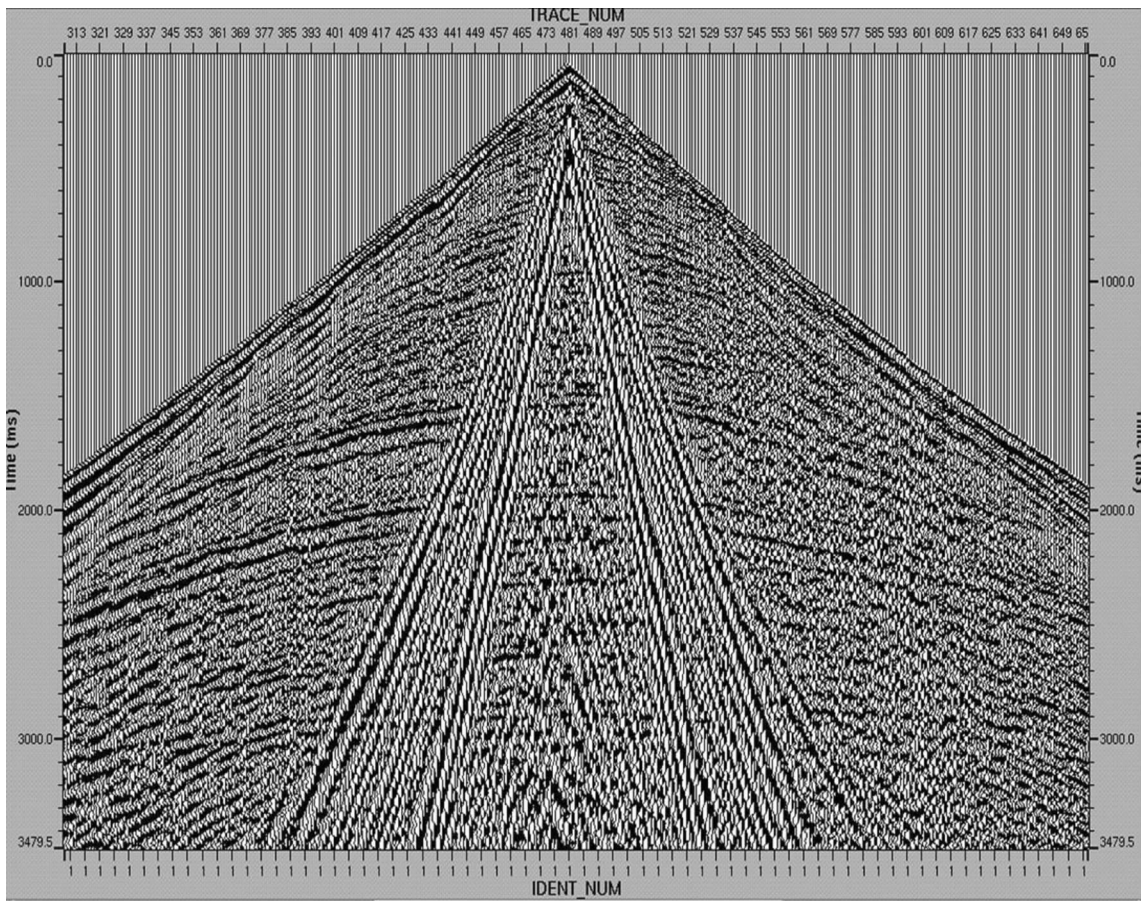


图 3 品质较好的原始单炮

Fig.3 Original gather with good quality

由于该区地表多为连绵起伏的沙丘,地表高程变化较大,静校正问题严重,从单炮可看出,初至扭曲,反射凌乱(图 4);从初至线性动校看出,起伏较大;在叠加剖面上表现为同相轴不连续。

2 处理难点分析及采取的主要技术对策

从对原始资料的分析中可看出,本次资料处理的难点是:(1)由于地表起伏及激发条件复杂,穿越起伏变化较大的沙丘多,低降速带变化大,引起严重的静校正问题;(2)干扰波发育,尤其是折射多次波,能量强,分布范围广,造成有效反射信号弱,给叠前、叠后去噪带来很大问题;(3)最大偏移距达到 10 790 m,部分反射信号只有远偏移距观测到,速度较为敏感;(4)深层有效反射信号弱,频率低,与强线性干扰波频带重叠。

针对上述处理的难点,笔者确定采取以下技术措施:

(1) 静校正

该区地表覆盖巨大沙丘,低降速带横向变化不稳定,静校正问题复杂。复杂的静校正问题不是哪一种方法可以完全解决的。首先做好野外静校正,是解决静校正问题的有效方法。在后续处理中,应用 2~3 次迭代剩余静校正技术,加上精细的速度分析工作,进一步解决残余静校正问题,从而提高叠加成像的精度。

(2) 叠前去噪

由于线性规则干扰波发育,能量强,并且其频率与有效波接近,因此,采用何种方法消除折射多次波及其他干扰也是本区资料处理的关键问题之一。根据规则强线性干扰波的特点,采用线性干扰自动识别与消除技术,在多域压制斜干扰,是解决该问题的有效方法。

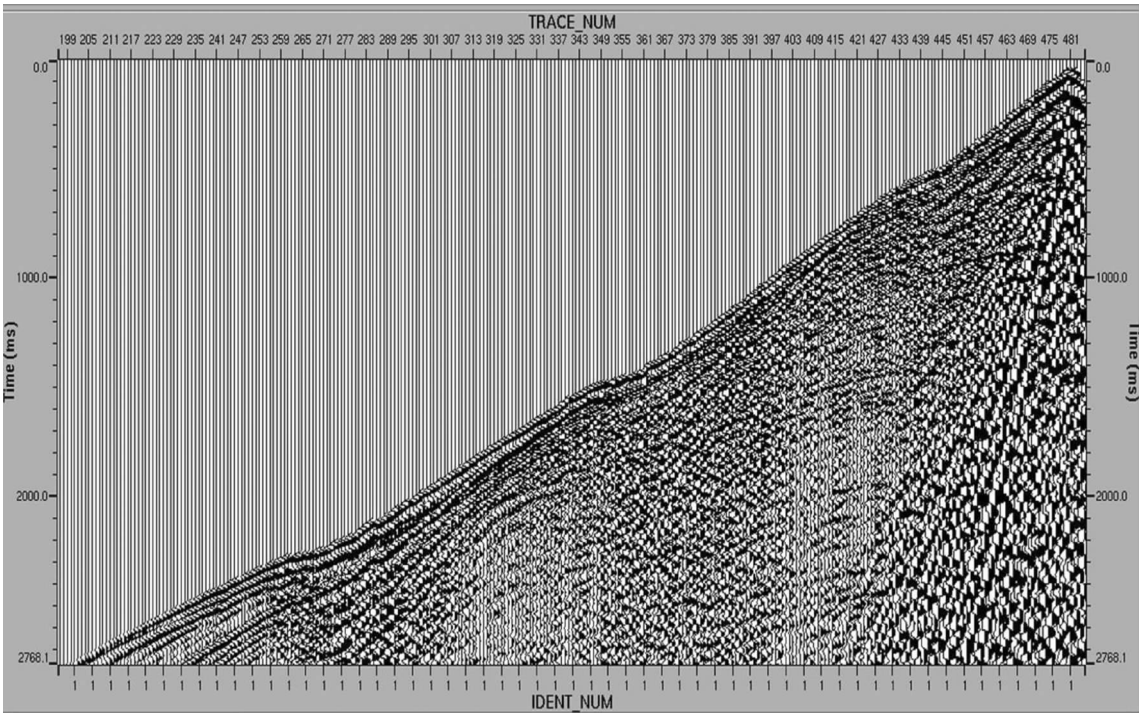


图 4 静校正问题严重的炮集

Fig.4 Gather with serious static correction problems

(3) 精细速度分析

针对偏移距大,速度较为敏感的问题,采用精细的速度分析,在速度特别敏感位置,采用叠加速度扫描,百分比扫描和精细切除相结合的方法。

(4) 叠后去噪

在叠前去噪的基础上,为进一步提高深层资料信噪比,在叠后进一步针对线性干扰和随机干扰进行压制,适当提高深层资料信噪比。

3 静校正处理技术

静校正处理是本区资料处理的关键。近年来用于解决沙漠地震资料静校正问题的主要手段有两种:①对测线较密地区,采用野外微测井技术及大量的地表测量数据,建立地表模型,估算沙丘速度与厚度,形成沙丘曲线,以拟合长波长静校正量,并配合折射静校正技术,解决表层静校正问题;②使用单炮记录直接提取表层信息,采用折射静校正技术分离长、短波长静校正量,以解决表层静校正问题。做好折射静校正的关键是从单炮记录中提取完整的表层信息^[1,2]。根据以往处理沙漠资料的经验,由于近炮点初至波波清晰、稳定并容易辨别和准

确拾取^[3,4],所以在初至拾取时,我们一般采用拾取近炮点的初至波部分,形成以近炮点初至波为主的折射静校正模型,来做表层静校正^[5]。

通过试验应用,笔者采用野外静校正和折射静校正相结合的办法,较好地解决了资料的静校正问题,消除了剖面波组存在的起伏现象(图 5~6),成像效果改善明显(图 7)。

从以上静校正应用前后效果对比(图 5~7)可见,所采用的野外静校正加折射静校正的处理方法,基本解决了资料的静校正问题,为后续处理打下了良好基础。

4 叠前去噪处理技术

叠前去噪工作是此次处理的难点,此次处理使用了 3 种方法分别针对干扰进行了压制:(1)区域异常振幅衰减;(2)面波压制;(3)线性干扰压制。

首先,通过多域自动去噪,进行异常振幅衰减(图 8)。从减出的噪音(图 9)可见,这种方法可以衰减大部分的面波和一些随机的异常振幅。

其次,进行面波压制,由于工区表层为沙丘地貌,面波干扰十分发育。从图 8 可以看到通过区域异

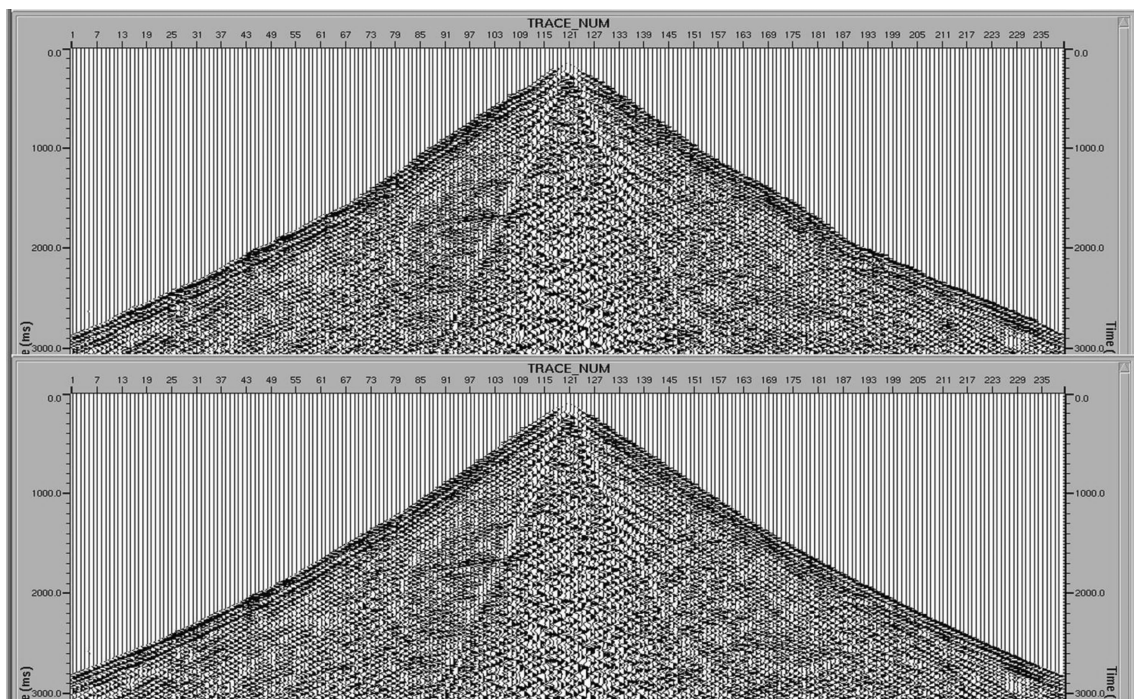


图5 静校正应用前后炮集效果对比(上:运用前,下:运用后)

Fig.5 Comparison of gather before and after application of static correction
(upper panel: before use, lower panel: after operation)

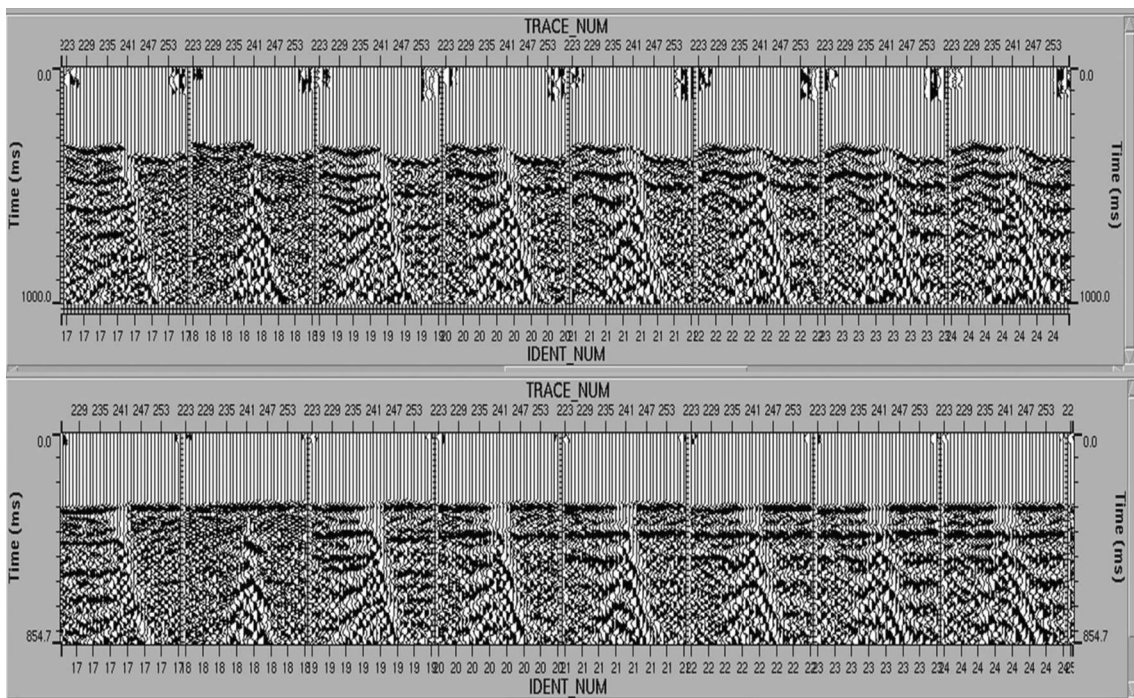


图6 静校正应用初至线性动校效果对比(上:运用前,下运用后)

Fig.6 Comparison of application of static correction to linear motion
(upper panel: before use, lower panel: after use)

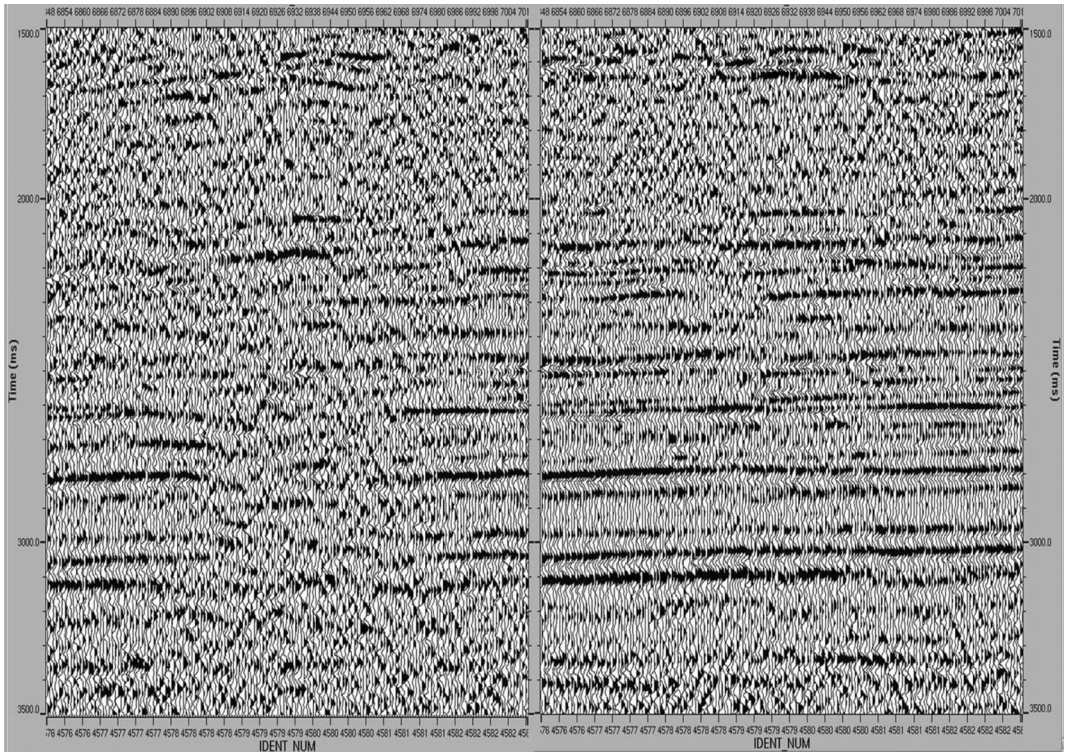


图 7 静校正应用前后叠加效果对比(左:运用前,右:运用后)

Fig.7 Comparison of stack section before and after application of static correction (left: before application, right: after operation)

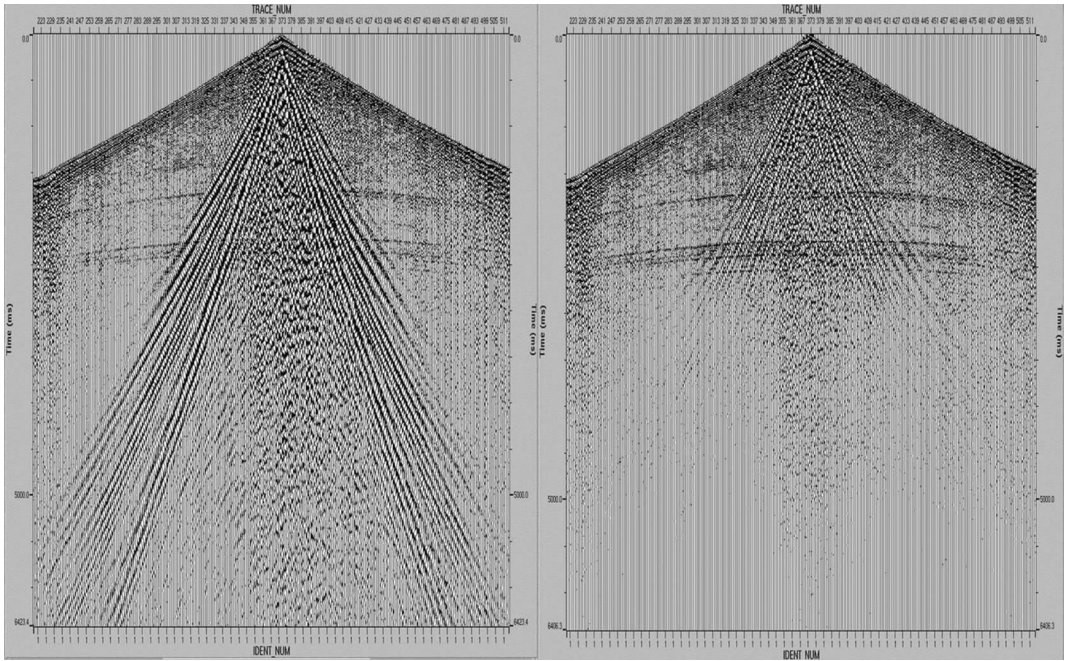


图 8 异常振幅衰减前后单炮对比(左:去噪前,右:去噪后)

Fig.8 Comparison of gather before and after anomaly amplitude attenuation (left: before denoising, right: after application)

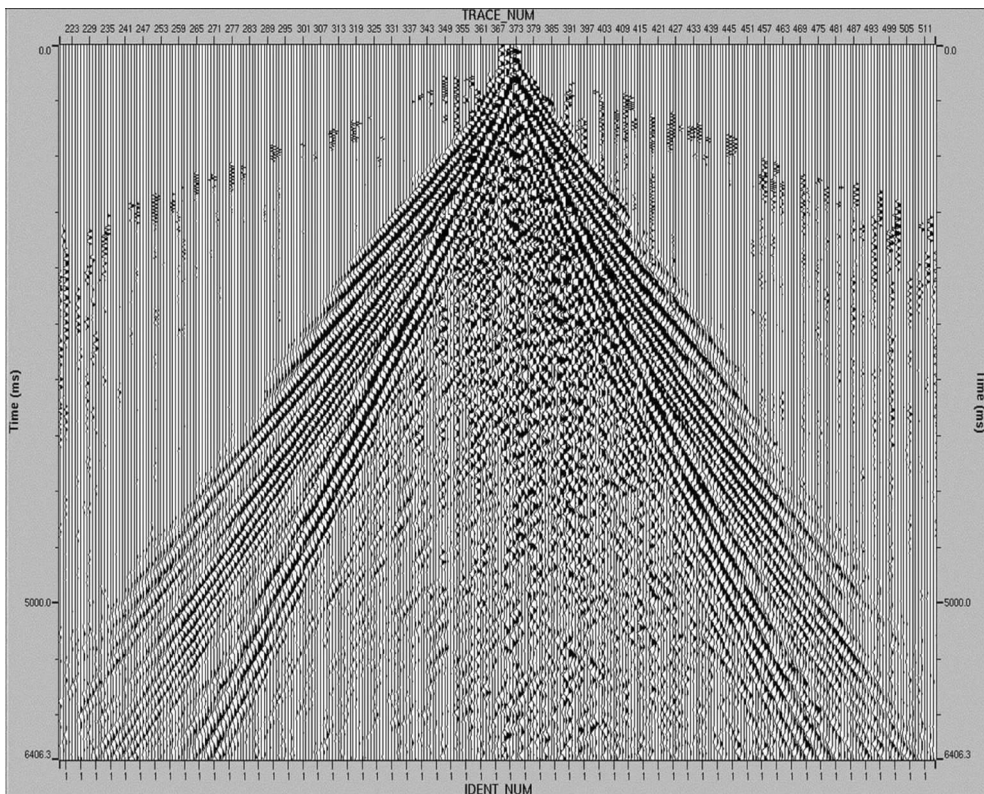


图9 异常振幅衰减压制掉的噪音

Fig.9 Noise section after anomaly amplitude attenuation

常振幅衰减可以压制掉一部分具有明显能量差异的面波,如大偏移距、深层,面波能量与有效信号能量存在数量级的差异,压制效果较好;但当能量差异较小时,如近道、浅层,有效波能量与面波能量比较接近,此时单纯用能量差异的办法无法压制面波干扰^[9]。

目前去除面波的方法较多,使用效果各不相同,虽然传统的高通滤波方法仍然是一种比较有效、适用性较广的方法。但由于本区资料深层有效反射频率低,若简单地使用高通滤波必然影响深层有效信号。本次处理中,采用定向滤波法来消除面波。优点在于:压制面波在给定的时窗内利用定向滤波方法进行面波预测,而后再预测出来的面波减去;重点压制面波区,而区域外的信息不受影响,不像简单的高通滤波模块,在去面波的同时,也将损失目的层的低频有效信息。图10显示了压制面波干扰不同处理方法的频谱分析对比;通过传统的高通滤波的方法扫描发现,若采用传统的高通滤波的方法来压制面波则低截频高达14 Hz才能将面波完全压制,这必然要损失大量的有效信号;而利用定向滤波法可以看

到0~14 Hz的信号得到了最大限度的保留。

图11为通过区域异常振幅加定向滤波法进行面波压制前后的叠加剖面对比,从该对比可以见到面波得到了明显压制,但由于该区线性干扰发育,面波压制后仍然难以看到有效反射,还有必要针对线性干扰进行特别的压制。

最后,进行线性干扰压制,强线性干扰的存在是塔里木沙漠地区地震资料的特点之一。线性干扰的存在严重影响了剖面的信噪比。目前去除线性干扰的方法主要有以下几种:

FK滤波:FK滤波虽然能部分消除线性干扰,但混波作用特别强,对强线性干扰的消除能力有限,不利于低信噪比资料叠加成像。

τ - p 变换消除线性干扰:该方法对线性干扰的消除能力虽然优于FK滤波,但通常要进行一些变换,然后重构数据(有时还要利用速度信息,而低信噪比数据速度难于求准),混波现象严重,易损伤有效波。

采用多倾角滤波方法,首先在炮点域对线性干

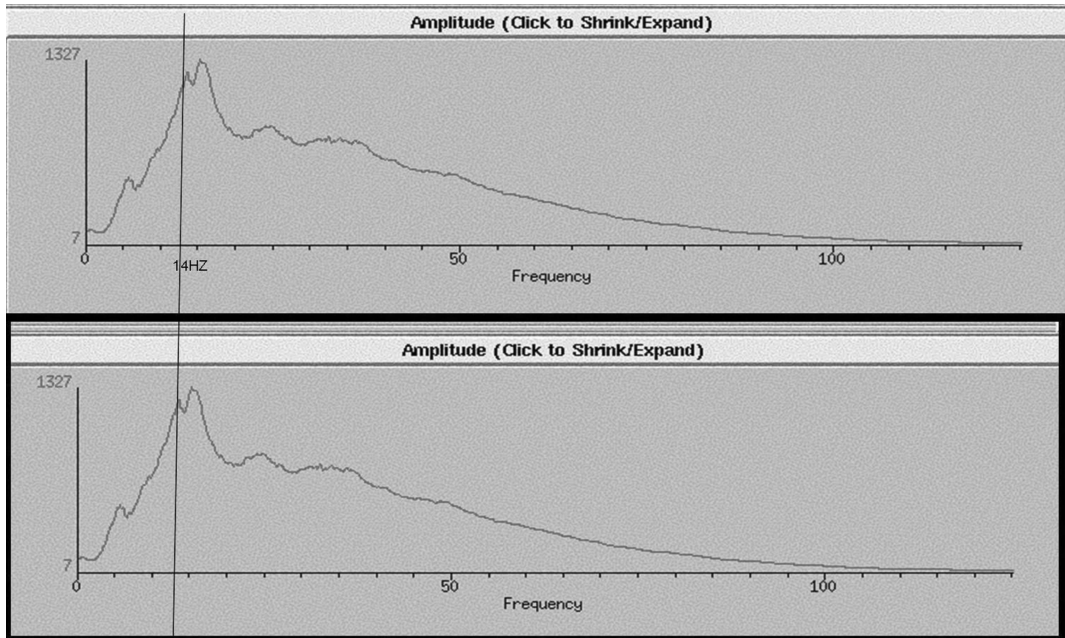


图 10 面波压制方法的频谱分析对比(上:定向滤波,下:高通滤波)

Fig.10 Comparison of frequency spectrum analyses of surface wave suppression method (upper panel: directional filtering, lower panel: high-pass filter)

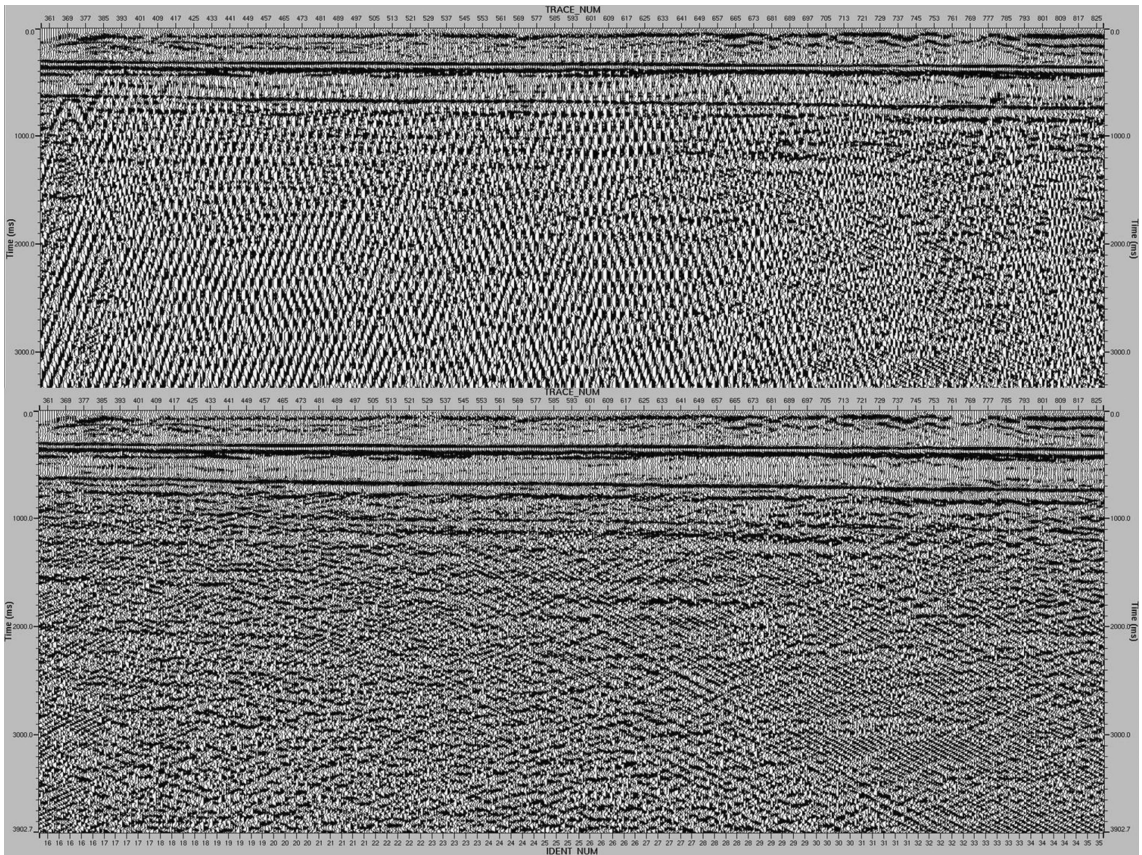


图 11 面波压制前后的叠加剖面对比

Fig.11 Comparison of stack profiles before and after surface wave suppression (upper panel: before application, lower panel:after use)

扰进行压制。炮点域去噪后,原炮域表现不强的线性干扰在反抽回检波域时又突出出来,此时再次在检波域对线性干扰进行压制。最大限度在叠前消除斜干扰。效果见图 12。

考虑到叠前压制视速度与有效速度差异问题,在叠前重点压制了视速度低于 2000 m/s 的斜干扰;对于视速度较高的斜干扰只进行了有针对性的压制,如分析直达波和折射波速度,分区域进行压制,从图 13 左图叠加剖面可以看出,在斜干扰特别发育的区域,通过叠前的方法还不能完全压制,而在叠后由于有效波大多为平层,视速度差异明显,故部分残留的线性干扰在叠后将进一步进行压制。

从单炮上看,在叠前最大限度地消除了各种规则干扰,为了进一步对叠前去噪效果进行监控,对去噪前后的叠加剖面进行了对比,从图 13 可以看出,进行叠前去噪后,在叠加剖面上,斜干扰得到极大压制,被干扰掩盖的弱反射信号连续性明显变好。

5 精细速度分析及剩余静校正技术

叠加速度是资料处理中非常重要的一个参数^[7],准确提取叠加速度是改善地震资料叠加质量的可靠

途径,但速度参数又受到了诸多因素的影响,如排列长度、覆盖次数、信噪比等等。本区资料速度变化较大,精细速度分析非常重要。另外,在工区的一些部位的地层反射仅远偏移距观测到广角反射信号,对叠加速度极为敏感,拾取难度大。不正确的速度值将影响叠加效果,为了得到准确的叠加速度,笔者通过以下几种手段,综合分析,来求取合适的速度。

(1)进行速度扫描,以便掌握每套层位的大概速度范围和构造的基本情况。

(2)选择优势频带,利用速度谱,并结合速度扫描,间隔 200 个 CDP 进行精细速度分析,求取对应点的速度值。

(3)显示速度剖面,对速度剖面的异常点,再返回到速度扫描,并结合叠加剖面,分析这种异常是否合理,如不合理,则调整速度谱。

(4)利用剩余静校正和速度分析的多次迭代来提高速度分析的精度。

以下显示几种不同信噪比的速度谱及对应的 CDP 道集(图 14~15)。

利用静校正解决了大的静校正问题后,静校正并没有完全消除,还存在剩余静校正量,剩余静校正

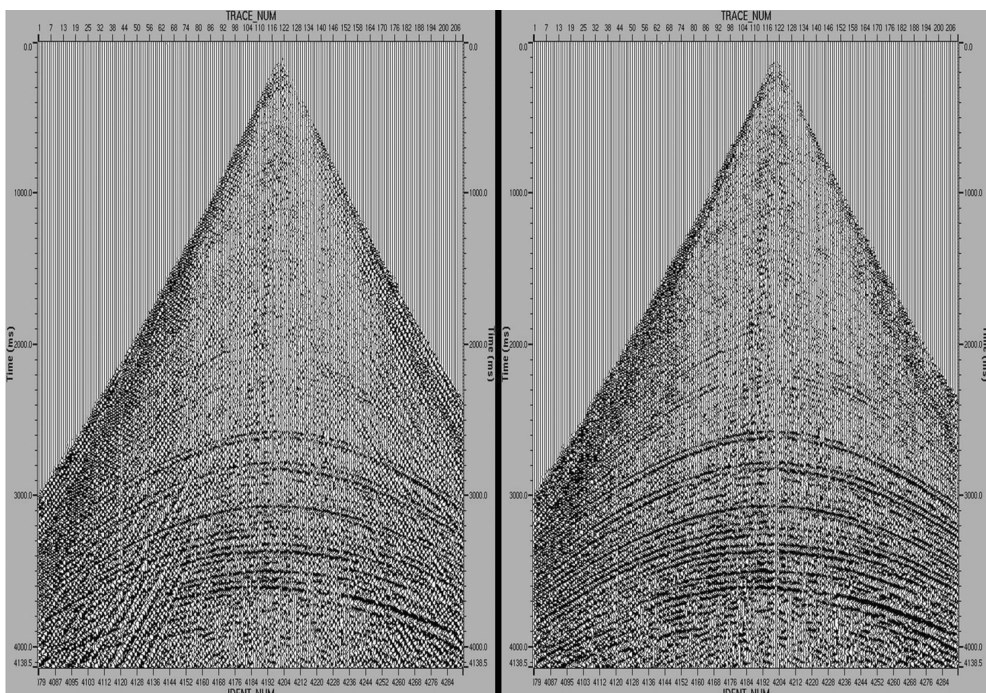


图 12 在共检波域消除斜干扰前后的效果对比

Fig.12 Comparison of gather effects before and after the CSP for eliminating inclined interference (left: before denoising, right: after application)

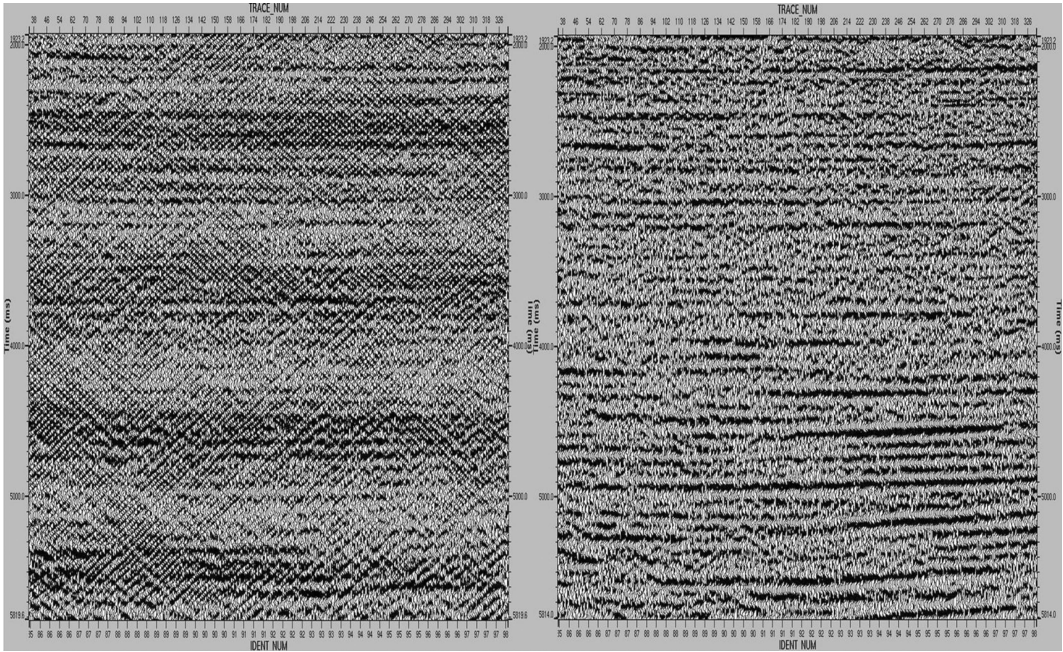


图 13 斜干扰压制前后的叠加剖面对比(左:前,右:后)

Fig.13 Comparison of stack profiles before and after inclined interference suppression (left: before application, right: after use)

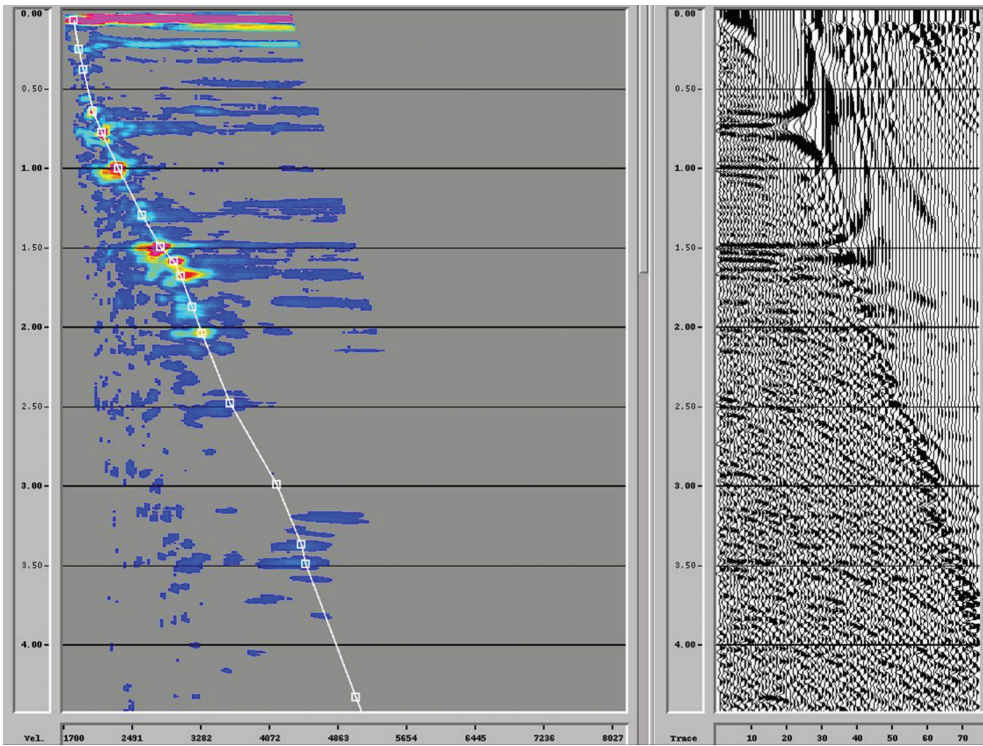


图 14 信噪比较高的浅层速度谱显示(BC272 线 CDP7000)

Fig.14 Velocity spectrum of high signal to noise ratio, Line BC272, CDP7000

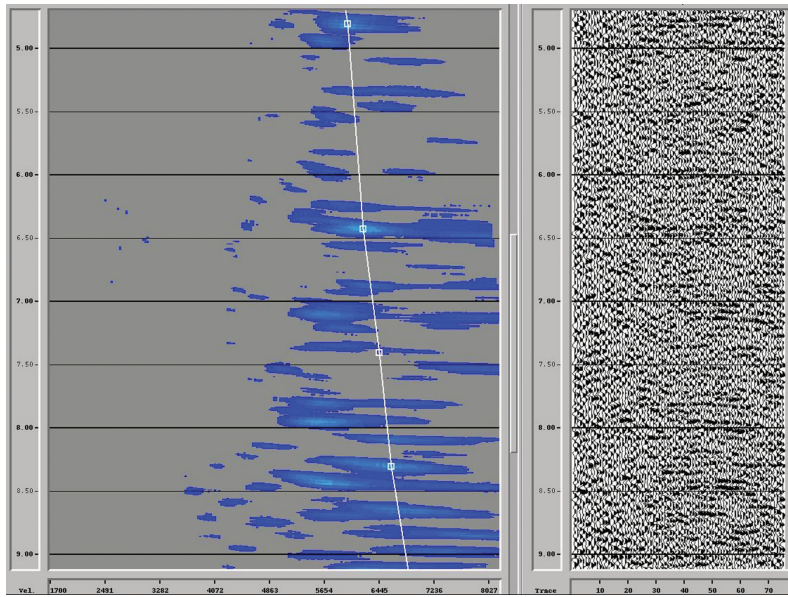


图 15 较高信噪比的深层段的速度谱显示(LJ01 线, CDP7400)
 Fig.15 Velocity spectrum of high signal to noise ratio, Line LJ01, CDP7400

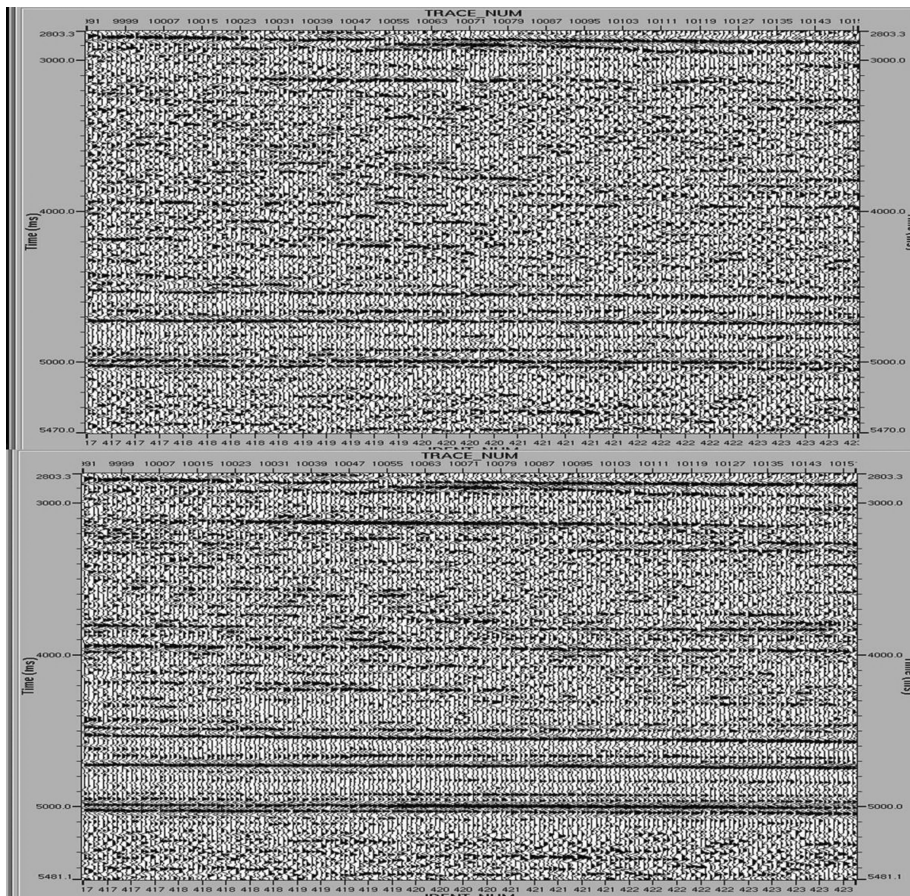


图 16 剩余静校正前后叠加效果对比(上, 剩余静校正前, 下: 剩余静校正后)
 Fig.16 Comparison of stack sections before and after residual static correction
 (upper panel: before residual static correction, lower panel: after residual static correction)

量的存在影响了剖面的叠加效果^[9]。在精细速度分析的基础上,采用两次剩余静校正和速度叠代后,进行组合剩余静校正方法解决中长波长的静校正量,取得了明显的效果,使剖面的信噪比和同相轴的连续性得到了一定的提高。图 16 为剩余静校正前后的叠加效果对比。

6 偏移成像技术

本区构造形态较平缓,偏移速度选取较为简单,在叠加速度的基础上,采用沿层速度平滑技术,根据构造形状对速度进行平滑,以确定偏移速度场,再根据偏移效果局部调整速度场,直到偏移效果最佳^[8,9,10]。

在实际资料处理中,笔者选取了 Omega 软件上常用的几种方法进行偏移方法测试。

通过对以上偏移结果的对比,最终选用有限差

分法偏移。这种偏移方法背景自然,偏移划弧现象较轻。

7 特殊处理技术

要想获知深层的岩石结构,采用深反射地震是目前最有效的方法^[11,12]。但是由于采集和处理等诸多原因,所获取的深反射资料的深层信息很少,结构不清楚^[13]。为获取深层的有效信息笔者采取了 χ^2 分布处理手段来提高深反射地震资料的品质^[12,14]。

χ^2 分布处理针对深反射地震资料特点,应用图像处理的研究成果,将深反射地震剖面视为一幅二维灰度图像,由最优相干、模式识别等技术提取反射特征,采用非线性迭代的方式,逐次提高深反射地震剖面的可识别程度,突出地壳的反射结构模式,按照图像灰度概率密度满足 χ^2 分布的自由度来评价深

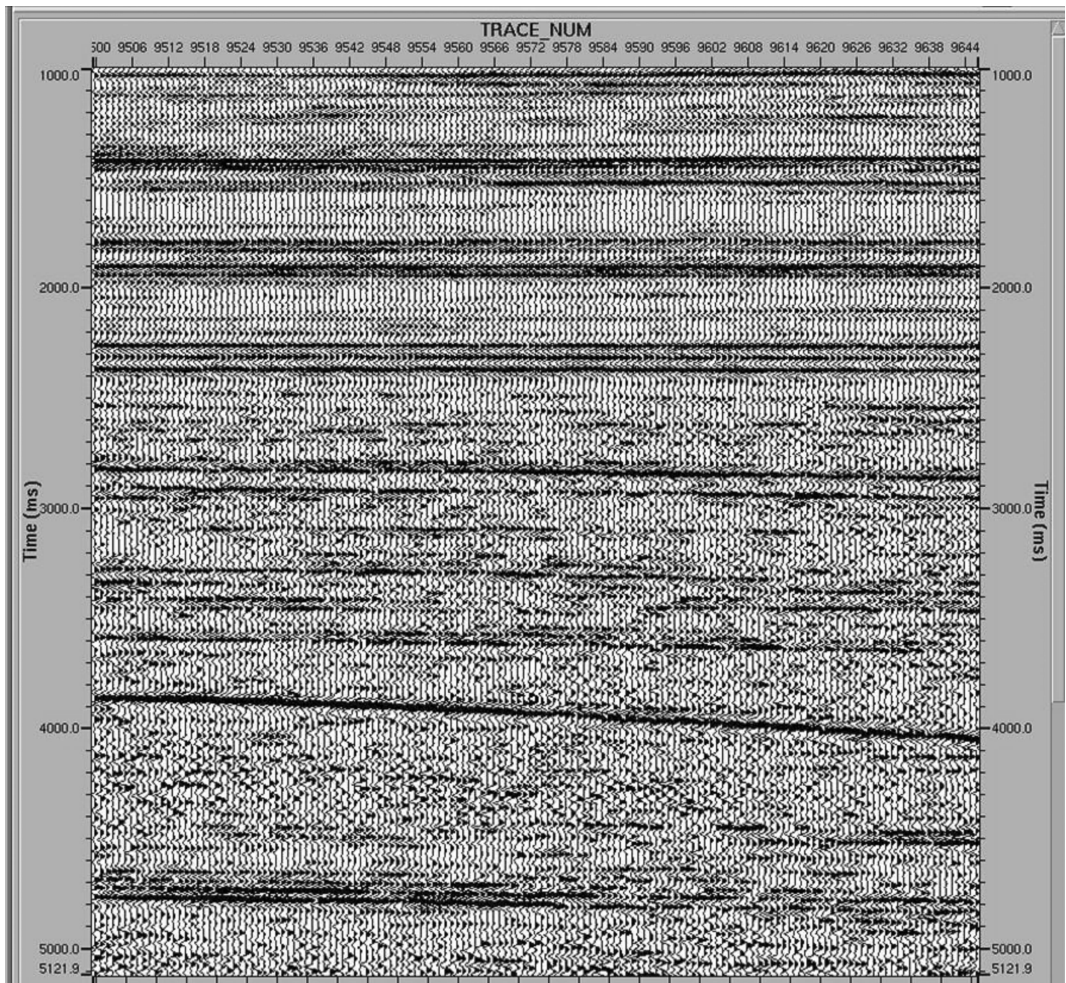


图 17 FX 偏移结果

Fig.17 Migration section of F-X method

反射地震剖面的优劣，得到线条图和构造与能量叠合剖面。

图 19 和图 20 分别是应用 χ^2 分布处理技术对资料进行特殊处理所得到的线条图和构造与能量叠合剖面。

8 结论及认识

(1)以针对地质目标的、交互处理方式为基础所建立的深反射地震资料处理技术是深反射地震资料处理的方向^[5]，所得到的资料可靠，应用效果明显。

(2)在野外静校正基础上，充分有效地利用折射静校正技术提取长、短波长的静校正量，采用精细速度分析与剩余静校正循环迭代，可以较精确地完成动、静校正处理，并通过后续的处理特别是得到

精确的构造成像提供基础。

(3)从处理结果来看，浅层 LJ02、LJ03 较为平缓，沉积地层厚度较大，中浅层信噪比较高；LJ01 线和 BC272 线的中浅层起伏大，沉积地层厚度相对较薄，中浅层信噪比相对较低；对于深层资料，LJ01 线信噪比最高，地下反射信息丰富，其次是 LJ02 线和 BC272 线，LJ03 线深层信息相对较弱。

(4)针对深层资料采取的 χ^2 分布处理的特殊处理技术，可以更多地获取深层资料信息，提高对深层资料的认识，是深反射地震资料处理中不可缺少的一项技术。

致谢：在剖面处理过程中，得到了中石化科技部、西北分公司、西部勘探指挥部和中石化研究院西部分院及中石油东方地球物理勘探公司塔里木研究分

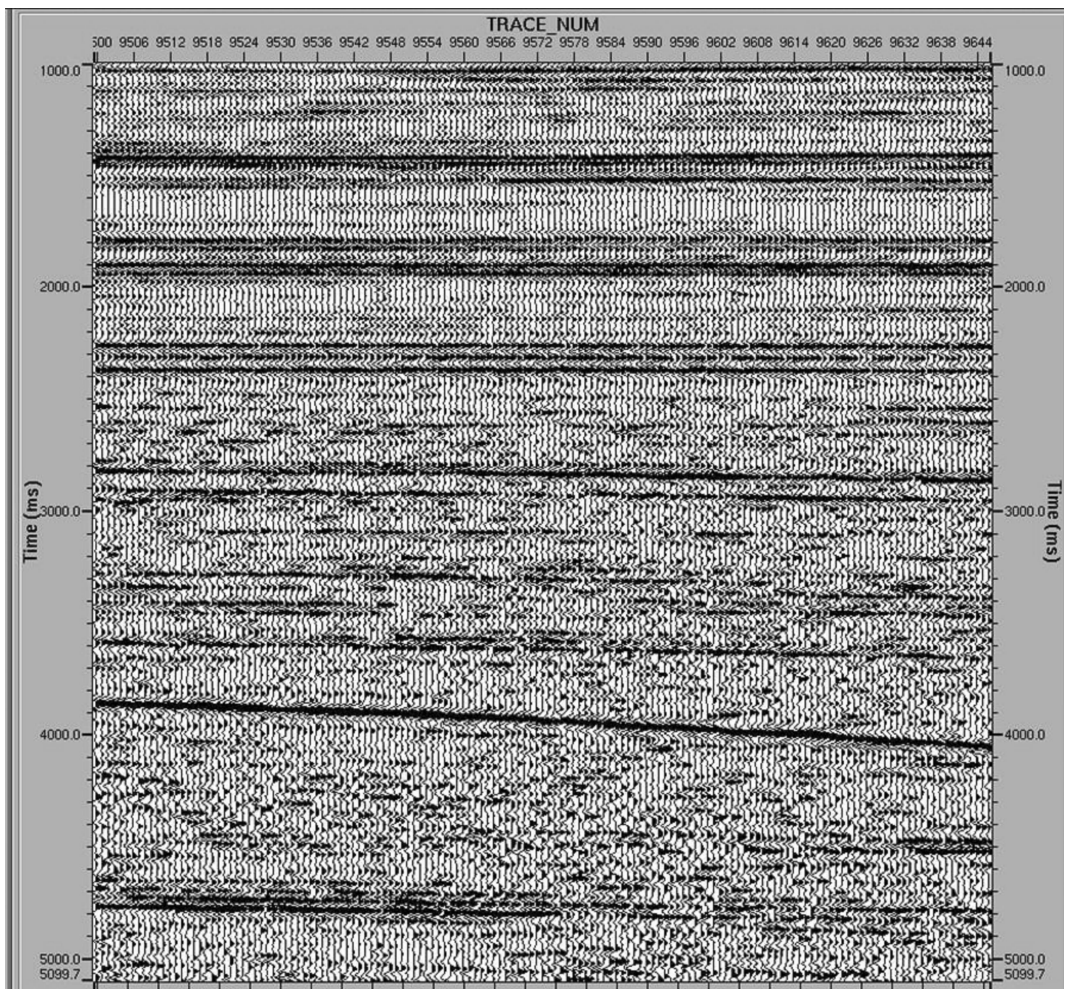


图 18 有限差分偏移结果
Fig.18 Migration section of finite difference

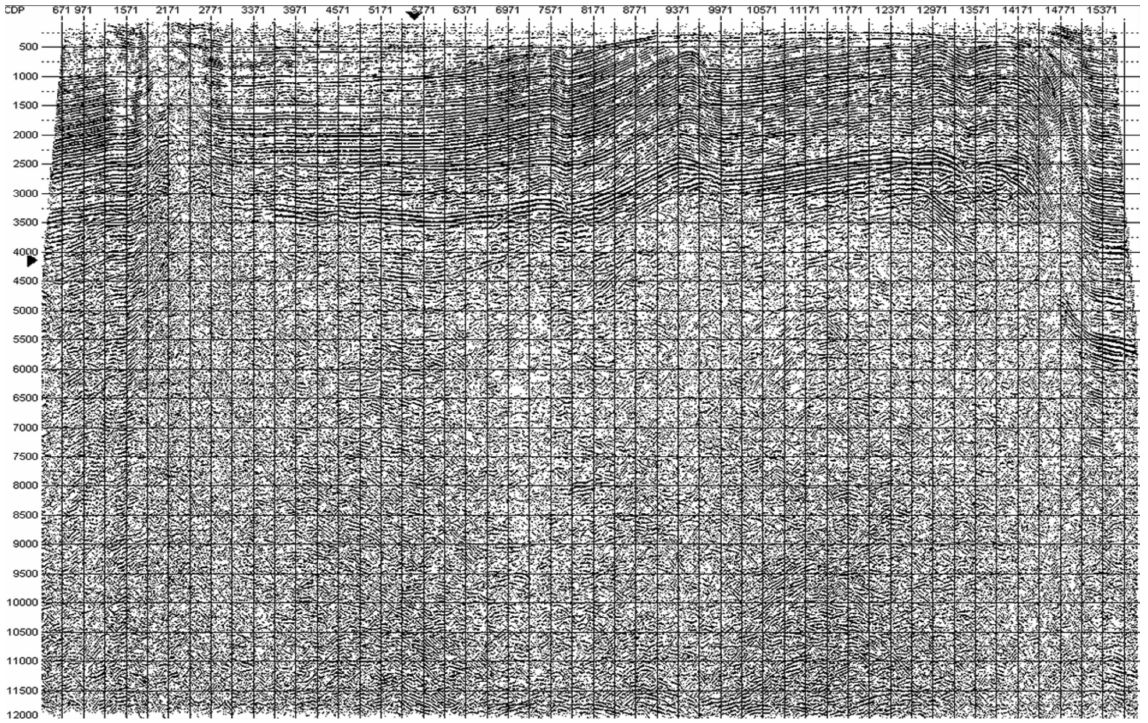


图 19 BC272.6 线线条图剖面
Fig.19 Skeleton section for Line BC272.6

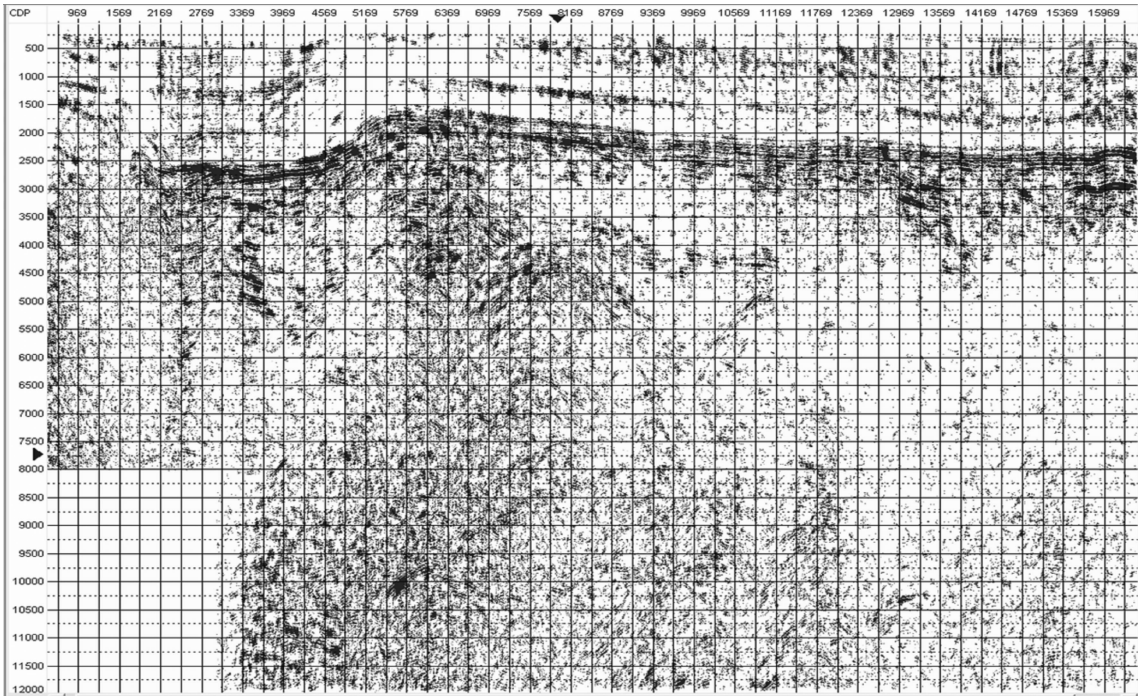


图 20 LJ01 线的能量叠合剖面
Fig.20 Energy composite profile for Line LJ01

院的领导和相关技术人员的大力支持和帮助,在此表示感谢。

参考文献 (References):

- [1] 胡鹏飞, 康艳芳, 李钢, 等. 塔里木盆地低信噪比地震资料处理方法研究[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(3):203-207.
Hu Pengfei, Kang Yanfang, Li Gang, et al. Study on processing method for seismic data with low S/N ratio in Tarim basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(3):203-207.
- [2] 杜耀斌, 曾庆才. 塔里木盆地河南探区地震资料处理方法研究[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(1):53-55.
Du Yaobin, Zeng Qincai, Study of the methods for seismic data processing in Henan prospecting area in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27 (1): 53-55 (in Chinese with English abstract).
- [3] 陈启元, 王彦春, 段云卿, 等. 复杂山区的静校正方法探讨 [J]. 石油物探, 2001, 4(01):73- 81.
Chen Qiyuan, Wang Yanchun, Duan Yunqin, et al. A study on the methods of static correction in complicated mountain area [J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2001, 4 (01):73- 81 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王彦春, 余钦范, 段云卿, 等. 折射波静校正法在复杂地表地区的应用[J]. 物探与化探, 1999, 23(6):428- 434.
Wang Yanchun, Yu Qinfan, Duan Yunqing, et al. The application of refraction static correction in complex areas [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1999, 23 (6):428- 434 (in Chinese with English abstract).
- [5] 谢里夫 R E, 吉尔达特 L P. 勘探地震学[M]. 北京:石油工业出版社, 1999.
Robert E. Sheriff, Geldart L L P, Exploration Seismology [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1999.
- [6] 李庆忠. 走向精确的勘探道路[M]. 北京:石油工业出版社, 1996.
Li Qingzhong. Precise Exploration of the Road Towards [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1996(in Chinese).
- [7] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 东营:石油大学出版社, 1993.
Lu Jimeng. Principles of Seismic Exploration [M]. Dong Ying: Petroleum University Press, 1993(in Chinese).
- [8] 杨文采, 于常青. 微尺度反射地震波场与油气藏识别[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(6):1-10.
Yang Wencai, Yu Changqing. The macro-size reflected seismic wave-field and recognition of hydrocarbon reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31 (6):1-10 (in Chinese with English abstract).
- [9] 胡中平, 孙建国. 高精度地震勘探问题思考及对策分析 [J]. 石油地球物理勘探, 2002, 3(75):530-536.
Hu Zhongping, Sun Jianguo. Discussion on problem of high-precision seismic exploration and its countermeasure analysis [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37 (5):530-536 (in Chinese with English abstract).
- [10] 阎世信, 刘怀山, 姚雪根. 山地地球物理勘探技术 [M]. 北京:石油工业出版社, 2000.
Yan Shixin, Liu Huaishan, Yao Xuegen. Mountain Geophysical Exploration Technology [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2000(in Chinese).
- [11] Zhang Z J, Lin Y H, Liu E R. Large static correction using a hybrid optimization method in complex terrains:Some experience learnt from China[J]. Journal of Seismic Exploration, 2005, 13(4):337-352.
- [12] Zhang Z J, Wang G J, Teng J W, et al. CDP mapping to obtain the fine structure of the crust and upper mantle from seismic sounding data:an example for the southeastern China[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2000,122(1/2):133-146.
- [13] 高锐, 黄东定, 卢德源, 等. 横过西昆仑造山带与塔里木盆地结合带的深地震反射剖面[J]. 科学通报, 2000, 45(17):1874-1879 .
Gao Rui, Huang Dongding, Lu Deyuan, et al. The deep seismic reflection profile across associated area of the western Kunlun orogenic belt and the Tarim Basin [M]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(17): 1874-1879(in Chinese).
- [14] Zhang Z J, Zhang X, Badal J. Composition of the crust beneath southeastern China derived from an integrated geophysical data set [J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 2008,113 (B4), B04417, DOI: 10.1029/2006JB004503.
- [15] 吴其斌. 国外深地震反射研究之现状 [J]. 地质科技情报, 1993, 12(1):85-91.
Wu Qibin. The state of the art of deep seismic reflection [J]. Geological Science and Technology Information, 1993, 12(1):85-91(in Chinese with English abstract).

The processing of deep reflection seismic data in Tarim basin

YU Chang-qing¹, YANG Wen-cai¹, LI Xue-liang², PI Jin-yun¹, QU Chen¹

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: The analysis and processing of 12-second deep reflection seismic data obtained from Bachu to Tazhong in Tarim basin show that, in NS direction, the basement is gradually uplifted from He-3 well through Hetian-1 well to He-4 well, with the basement becoming deeper from He-4 well southwards; in EW direction, the basement of Bachu uplift is relatively shallow, and becomes deeper at Tazhong. Through processing, the authors have found that, besides commonly seen reflection structures of T4-T9 layers, effective reflection can also be seen in the deep layers beneath the basement. Based on preliminary interpretation and geological analysis, the authors hold that the processed profile has good continuity of phase axis, high signal-to-noise ratio and homing accuracy and reliable deep reflection information. The tectonic framework reflected by the profile is clear and of fairly large scale. The authors' work has confirmed the underground structure along the deployed survey line of the work area, and also revealed structures or structural manifestations which had not been detected by previous researchers, thus enriching the understanding of the structural characteristics and structural evolution in this region.

Key words: Tarim basin; deep reflection seismic data; structure; static correction; signal-to-noise ratio; imaging

About the first author: YU Chang-qing, male, born in 1962, doctor, professor, engages in oil and gas exploration research, major field of study for seismic data processing and interpretation, seismic reservoir prediction and comprehensive evaluation, deep geophysical exploration; E-mail: yucq@tom.com.