

文章编号: 1001-1749(2023)06-0717-09

塔里木盆地沙漠区超深层碳酸盐岩 地震资料精细处理技术

赵锐锐¹, 周强², 彭更新¹, 胡晓亚², 孙海军¹,
陈立², 李忠², 王珑², 王玉华²

(1. 中国石油 塔里木油田分公司勘探开发研究院, 库尔勒 841000;

2. 东方地球物理公司 物探技术研究中心, 成都 610213)

摘要: 塔里木盆地超深层海相碳酸盐岩油气资源丰富, 但勘探面临诸多挑战: 其地表为塔克拉玛干大沙漠, 出露巨厚沙丘, 静校正和吸收衰减严重; 上覆火成岩, 多次波发育, 信噪分离困难; 埋藏超深, 大于6 000 m, 深层分辨率低; 受二叠系火成岩影响, 速度变化大, 深度域精准建模难度大。通过十余年不懈攻关, 逐步形成了沙漠区超深层碳酸盐岩地震资料精细处理技术, 其中, 微测井约束层析反演沙漠区近地表结构, 可以有效解决时间一致性问题; 多信息综合识别长程及短程层间多次波, 能够针对性压制提供优质的预处理道集; 采用波动方程近地表Q补偿, 可以解决沙漠吸收衰减问题, 提高深层分辨率且目的层主频能够提高5 Hz; VSP井控和火成岩小网格层析提高深度域建模精度, 可以确保碳酸盐岩高精度成像。大沙漠区超深层碳酸盐岩地震资料高精度成像技术, 可精准刻画出走滑断层和缝洞, 有效支撑了塔里木盆地 1×10^9 t级富满油田的勘探发现。

关键词: 沙漠; 超深层碳酸盐; Q补偿; 多次波压制; 建模; 地震资料处理

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.06.04

0 引言

碳酸盐岩油气总量约占全球油气总量的70%, 塔里木盆地碳酸盐岩油储层是塔里木油田原油上产的重要战略要地。以塔里木盆地近10年来石油勘探最大的发现——富满油田为例, 高品质地震资料采集处理技术是其成功勘探发现的两大关键技术之一。

富满油田位于塔克拉玛干沙漠, 其地震资料处理面临三大挑战^[1-2]: ①地表为大沙漠区, 位于塔克

拉玛干沙漠腹地, 广泛分布松散沙土, 沙丘表层结构横向变化剧烈, 吸收衰减严重; ②目的层奥陶系埋藏超深, 多次波发育对目的层信号造成多重污染, 信噪分离难, 影响剩余时差拾取精度; ③全层系高精度建模需考虑的地层数量众多, 尤其沙丘表层和火成岩速度变化剧烈, 严重制约奥陶系走滑断裂和精准成像。

针对大沙漠区表层、超深埋藏、全层系精准建模三大挑战, 塔里木油田持续对地震资料处理进行攻关, 针对性形成了沙漠近地表反演及剥蚀技术、近地表Q补偿技术、层间多次波压制技术、超深目的层

全层系高精度建模技术,通过精细化处理获得高品质的预处理道集和精准的速度模型,从而达到提高奥陶系缝洞和走滑断裂成像精度的目的。

1 沙丘近地表反演及剥蚀技术

塔克拉玛干沙漠广泛分布条带状沙丘和蜂窝状沙丘,纵横向存在速度变化,以往采用沙丘曲线来解决静校正问题。沙丘曲线法是将沙丘作为一个规则的变化体来考虑,而现实中沙丘形态千变万化,成因和物性又各不相同,一条沙丘曲线并不能充分表征大面积的表层结构特性,具有局限性。折射静校正是一种较好的替代方法,通过交互初至拾取,逐段估算折射波速度,用延迟时反演法建立近地表模型,然后用相关方法计算各道与模型道时差,最后根据近地表模型用统计方法算出炮点和检波点的静校正量。但其应用前提是要求有一个平稳光滑的低降速带底界,且须追踪同一折射层,应用条件相对苛刻,且精度不够。通过大量研究证实:微测井约束层析静校正能相对精准反演塔克拉玛干沙漠近地表结构。

层析成像利用地震波旅行时来反演地下介质的层速度和反射界面。因为走时是各个网格旅行时的总和,导致成极浅层速度偏大,故用微测井速度提供极浅层速度,有助于提高表层速度模型精度。微测井约束层析能很好地刻画沙漠表层(图1),北面是蜂窝状沙丘,沙丘顶部速度为1400 m/s,南面是条带状沙丘,条带状沙丘顶部速度极低小于1000 m/s,蜂窝状和条带状沙丘底部速度都相对较高,在1700 m/s左右。分析证实塔克拉玛干沙漠第四系松散沙土速度受压实胶结程度影响巨大,沙丘顶部和底部速度差异大,整个大沙漠区速度横向变化剧烈,存在严重的静校正问题,地震道时间一致性极差,对地下构造恢复及成像精度影响极大。

近地表速度模型反演之后求取静校正需要两个步骤,①从物理点(激发点和接收点)高程往下将低降速带剥蚀到高速层顶;②从高速层顶向上用替换速度填充到基准面。在这两个步骤里,剥蚀的低降速带速度由近地表反演的精度决定,替换速度和统一基准面为1500 m,替换速度为1700 m/s,需要关注的焦点是剥蚀到哪个深度。

如图2所示,间隔100 m/s分别选1700 m/s~2100 m/s作为高速层顶界,即低降速带的底界,从沙丘表面向下剥蚀,再用替换速度校正到统一基准

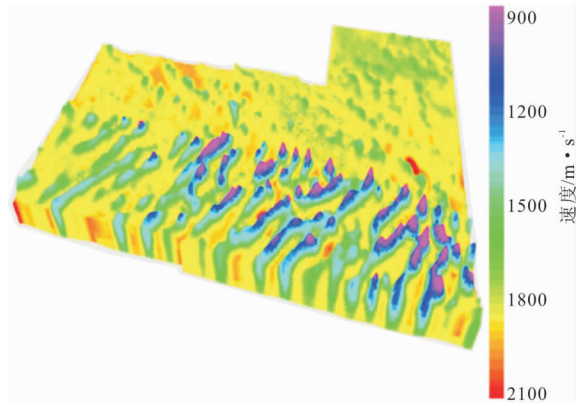


图1 沙漠区近地表结构

Fig.1 Near surface structure of desert

面,完成静校正。图2(a)为应用不同速度界定高速层的在近地表模型纵剖面上的示意图,图2(b)~图2(f)依次为剥蚀到不同高速层的叠加效果,直观来看,选择潜水面速度1700 m/s作为剥蚀的低降速带底界,成像效果欠佳,剥蚀到1900 m/s的剖面同相轴明显更加连续,且与该区VSP速度拐点吻合,故推荐大沙漠区高速层顶界优选1900 m/s。

2 沙漠区近地表Q补偿技术

沙漠区表层广泛分布松散沙丘,由于迎风面背风面及胶结程度不同,近地表速度的横向变化,除了引起地震道时间一致性差异,还会引起地震子波的空间变化^[3]。另外沙丘Q值小,地震波能量衰减快,宋智强等^[4]指出,对于60 Hz以上的地震波,当它穿过80 m厚的沙丘时,地震波衰减大于38 dB,能量相对损失可超过90%,导致深层地震波能量弱,分辨率低。传统的处理方法采用地表一致性反褶积,利用地震数据计算出不同炮检点的反褶积因子然后进行补偿,解决地震数据由于近地表变化而引起的子波空变问题。反褶积假设地震子波为最小相位,反射系数为白噪,且一定的时窗范围内地震数据的子波时不变,实际资料很难满足这些条件。蒋立等^[5]探索在地表吸收起主要作用的沙漠区使用近地表补偿技术。

近地表介质吸收衰减补偿处理的关键是构建精准的近地表Q模型^[6],笔者对比分析了传统的谱比法,认为极浅层Q值估算过小,存在小于2的情形,这属于不合理范围,故优选振幅曲线拟合法估算沙丘品质因子Q,即平面波在介质中传播一个波长距离之后的能量耗散比。

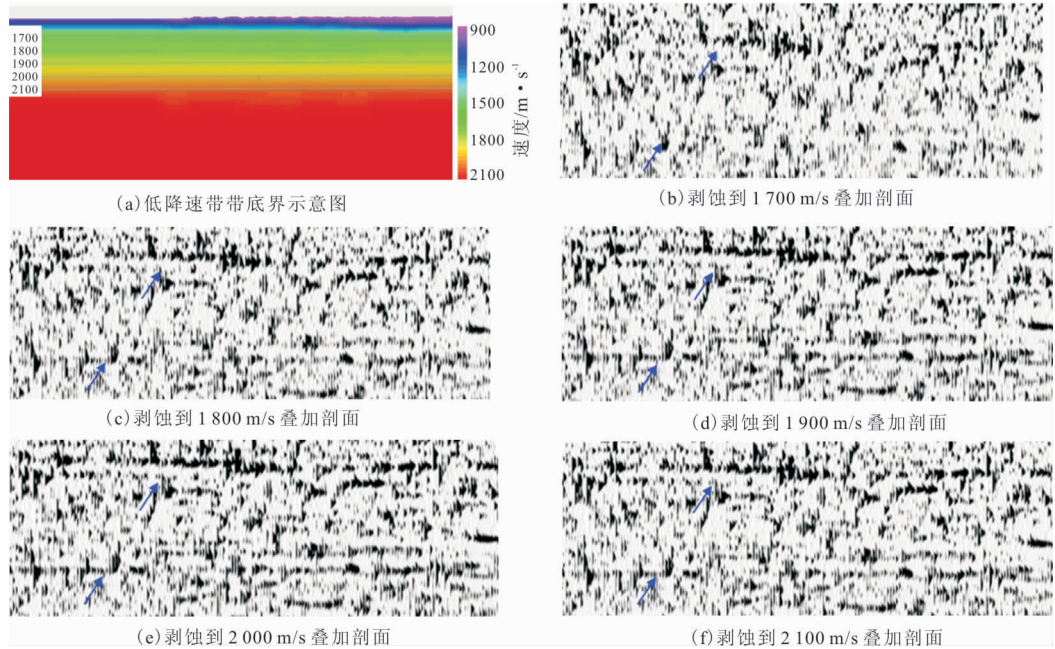
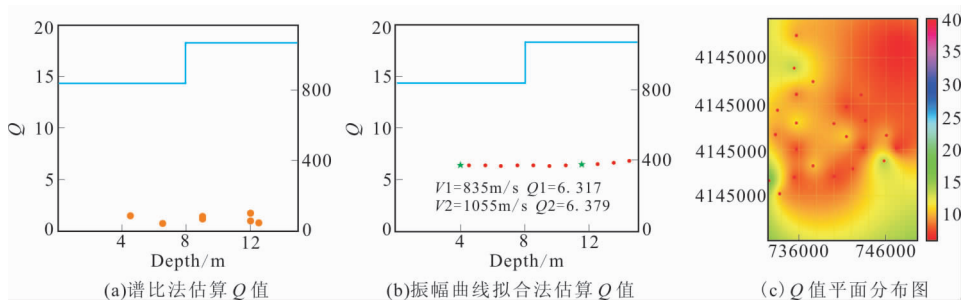


图 2 剥蚀到不同低降速带成像效果

Fig. 2 Imaging of correction to different low-velocity layers

图 3 近地表 Q 值计算Fig. 3 Near surface Q value calculation

研究区沙丘厚度达到 120 m, 分布微测井 403 口, 振幅曲线拟合法估算的第一层 Q 值为 6.317 (图 3(b)), 相比谱比法估算的 0.8~2 更为合理 (图 3(a))。基于多口微测井 Q 插值得到近地表 Q 模型, 在沙层 5 m 范围内, 沙层 Q 值分布在 6~20 (图 3(c)), 横向存在较强变化, 采用 GeoEast 的近地表波动方程 Q 吸收补偿方法, 对穿过沙丘的地震数据进行振幅和相位补偿, 提高资料分辨率。从图 4 近地表补偿前后单炮图 4(a)、图 4(b) 和图 4(c) 来看, 红色为 Q 补偿后频谱, 能量有所恢复, 频带宽度得到拓展, 图 4(d)、图 4(e)、图 4(f) 展示, 深偏剖面主频由 11 Hz~67 Hz 拓展到 3 Hz~80 Hz, 为超深层奥陶碳酸盐岩高精度成像奠定基础。

3 层间多次波压制技术

研究区层间多次波发育, 其压制效果直接影响后续剩余时差的拾取精度, 如图 5 所示, 首先从速度谱分析, 根据明显速度差异判别长程多次波存在时间段; 利用声波曲线生成合成记录, 与波动方程正演结果匹配, 定位多次波污染比较严重的层系; 根据动校正后的 VSP 上行波直接识别层间多次波发育地层。通过多信息识别多次波后, 根据长程和短程多次波不同的特征分别进行压制。

根据动校的 VSP 上行波是否能传播到达初至 (图 6(a) 红色实线), 直观识别出 4 层相对明显的层间多次波 (红色虚线)。以图 6 中第二组多次波多②为例, 因其未能与初至相交, 被认定为层间多次波,

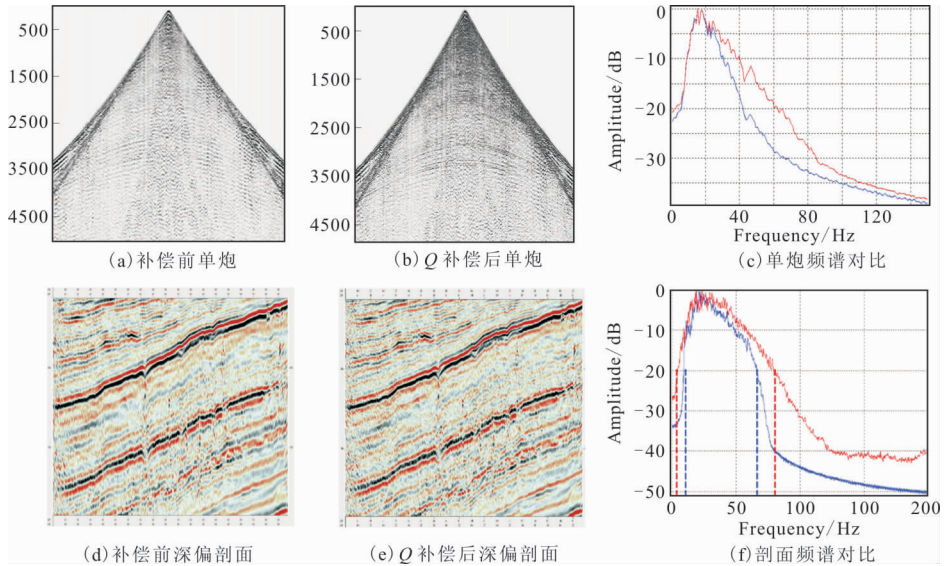
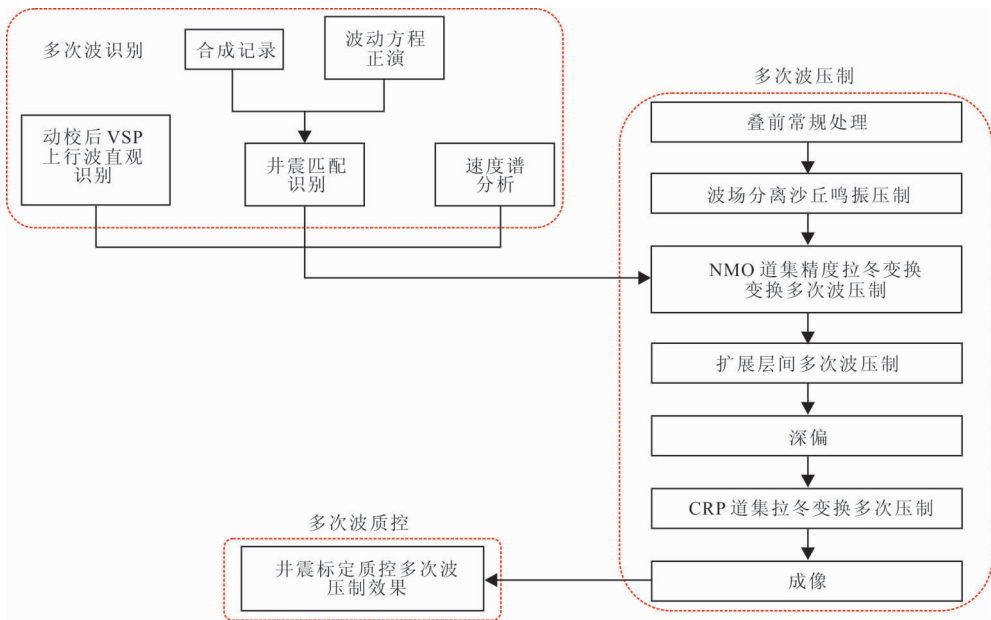
图 4 近地表 Q 补偿效果Fig. 4 Effect of near surface Q compensation

图 5 多次波压制技术路线

Fig. 5 Technical route of multiple elimination

其发生在双程走时 3 970 ms 处,能量消失对应黄色虚线处的同相轴就是对应的反射层位,位于双程走时 3 190 ms,按照等走时原则,绘制出多②产生的示意图 6(b)。初步认为地震波穿过地层,在多②层发生强反射,到达 A 地层又遭遇强反射,在多②层和 A 层之间来回震荡,产生层间多次波。结合地质认识和井资料,多②层是二叠系火成岩底,为高速;A 层是白垩系底,为相对高速;二者之间为低速层。通过大量研究,认为一间房的多次波主要产生层系为

古近、白垩、二叠、石炭、志留,其中二叠底产生的多次波能量强,志留系底离一间房近,二者对奥陶系一间房污染严重(图 6(c))。

应用拉冬变换多次波^[8]压制具有明显速度差异的长程多次波(图 7),基于动校道集拾取正剩余时差范围,在拉冬变换后的谱数据上进行切除线定义,该方法针对动校道集压制受限于动校速度,要慎重,需根据速度谱和 VSP 资料划定压制范围,只压制长程多次波发育的时段。没有明显速度差异的短程层

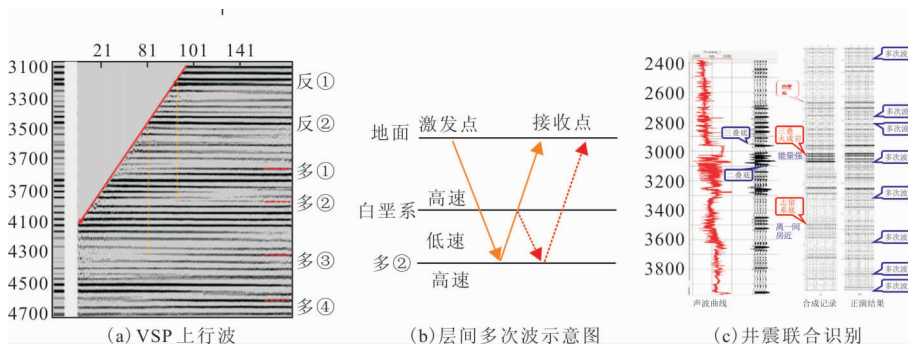


图 6 多次波识别

Fig. 6 Multiple identification

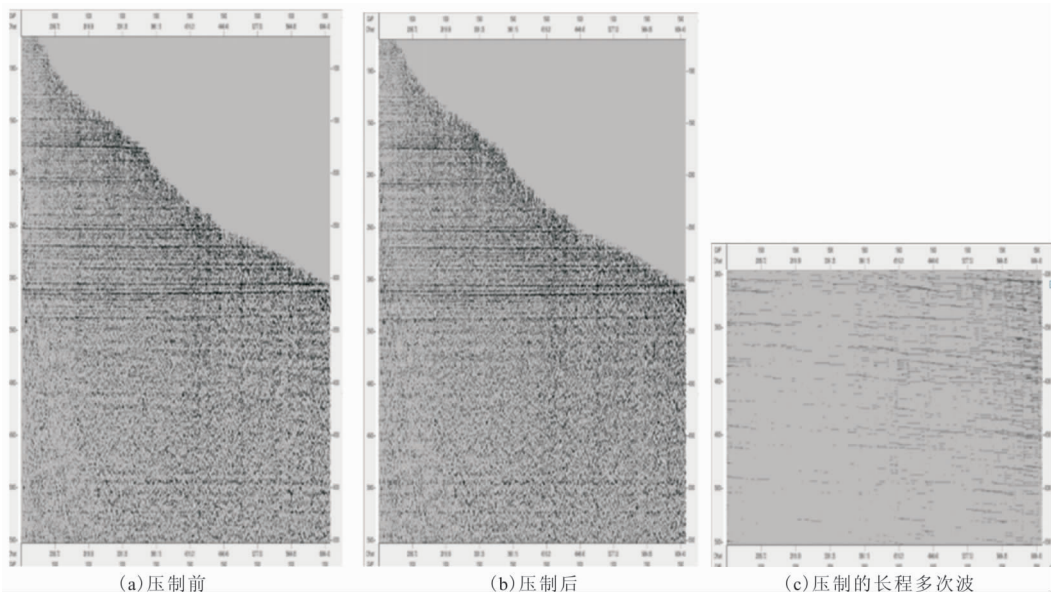


图 7 长程层间多次波压制

Fig. 7 Long-time internal multiple elimination

间多次波采用扩展层间多次波预测并压制,该方法基于共炮道与共检波点道卷积,相关过程是通过拾取产生多次波的层位时间做时延,再累加所有贡献道集,预测出层间多次波,再自适应相减(图 8)。压制后的道集采用同样的参数偏移生成 CRP 道集(图 9),多次波得到较好压制,波组特征更加清楚,便于后期拾取剩余时差,提高网格层析可靠度,为深度域精准建模奠定基础。

4 超深目的层全层系高精度建模技术

塔里木盆地奥陶系碳酸盐埋藏超过 6 000 m,基于井控和层控得到相对精准的初始速度模型应用了 9 口井,11 个层位控制,起始面用小平滑面,浅层镶嵌近地表,中深层基于层位约束,应用 VSP 和声

波速度构建初始速度模型,重点针对火层岩优化速度,形成全层系高精度建模技术。极浅层覆盖次数低,反射波共偏移距道集道数少,剩余时差拾取精度低,速度更新量不可靠,目前行业有两种解决方法:①用角道集替换共偏移距道集,增加浅层反射波数据剩余时差拾取精度;②利用初至走时反演的近地表速度模型经过平滑后进行镶嵌^[9]。

前面已提到,小道距微测井约束的层析静校正方法利用走时信息,能够比较精准地刻画沙丘纵横向速度,故笔者选用近地表镶嵌为全层系深度域建模提供可靠的浅层速度。该方法在高程小平滑面以下,高速层顶以上,嵌入大炮初至反演的沙丘表层模型。通过研究,优选接收线距作为小平滑面的平滑半径。

图 10 展示的是沙丘镶嵌过程和效果。10(a)是

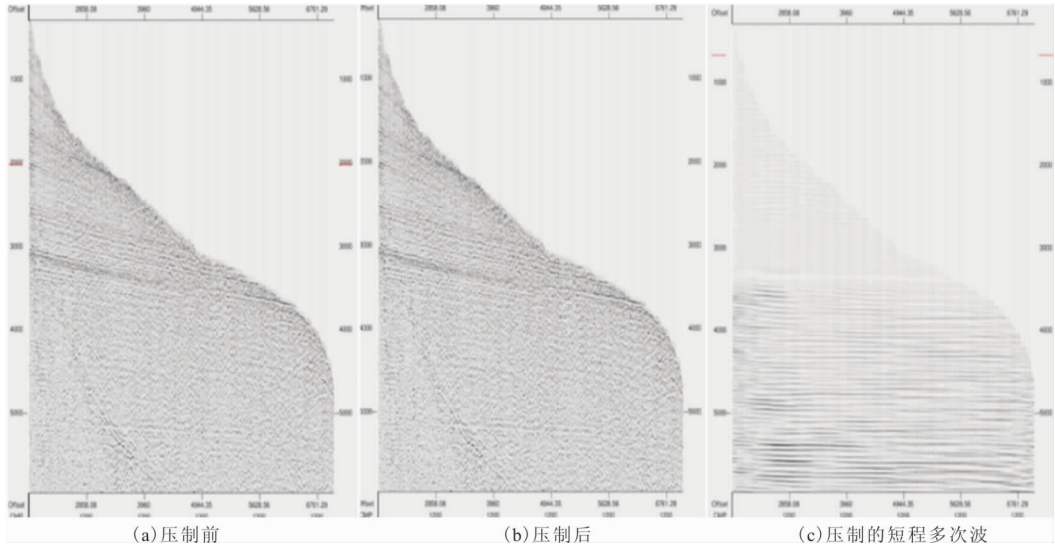


图 8 短程层间多次波压制

Fig. 8 Shot-time internal multiple elimination

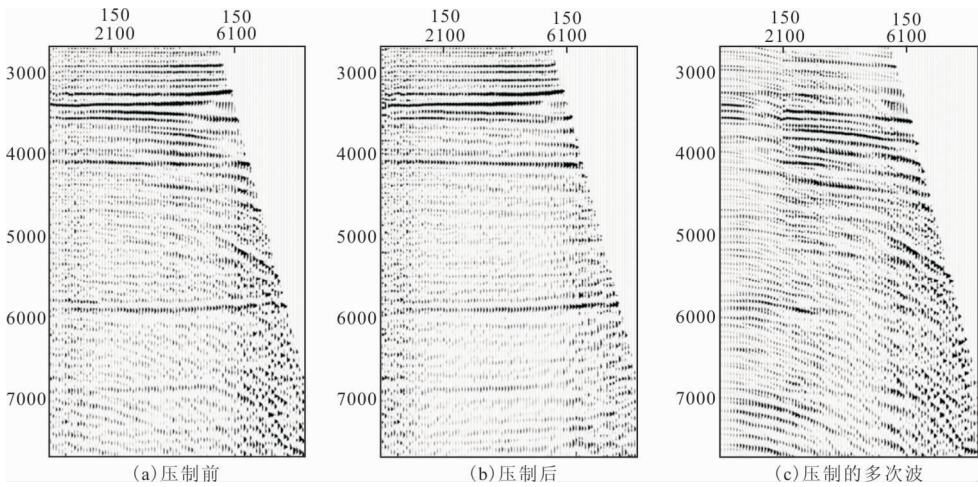


图 9 多次波压制前后 CRP 道集

Fig. 9 Comparison of CRP gather of multiple elimination

初至信息反演的近地表模型,其中蓝色线代表小平画面,红色线是高速层顶,高速层以 1 900 m/s 作为门槛值限定。图 10(b)是初始速度模型,其构建方式可以是时间域均方根速度插值,通过时深转换而得,也可以是 CVI 反演而得,笔者利用井多的优势,基于井控和层控得到相对精准的初始速度模型。图 10(c)为镶嵌了沙丘表层的初始速度模型,具体做法是在深度域高速层顶以上填充图 10(a)所示的近地表模型,高速层顶以下保留根据井控建立的初始速度模型,高速层顶附近再做小尺度的平滑处理。图 10(c)和图 10(d)分别是沙丘模型镶嵌前后的偏移成像效果,镶嵌之后沙丘速度精度更高,使得浅层整体成像更优,尤其是红色方框和箭头处,同相轴连续

性更强,波组特征更清晰。

火成岩精准速度建模,是塔里木超深层碳酸盐岩全层系建模第二个关键因素。首先火成岩与围岩速度相差大,达到 1 000 m/s,火成岩速度为 5 000 m/s,围岩为 4 000 m/s。其次火成岩横向变化剧烈,地震响应特征分为杂乱相和平行相,杂乱相对下伏地层成像影响巨大。通常采用网格层析速度反演技术在三维立体网格内进行射线追踪,通过共成像点道集上的深度残差方程求解更新速度模型,提高速度模型精度^[10]。通过攻关,推荐基于层控+井控建立较精准的初始速度,利用 200 m × 200 m 的小网格层析反演火成岩速度细节。从偏移成像效果来看(图 11),火成岩速度细节得以精细刻画之后,内

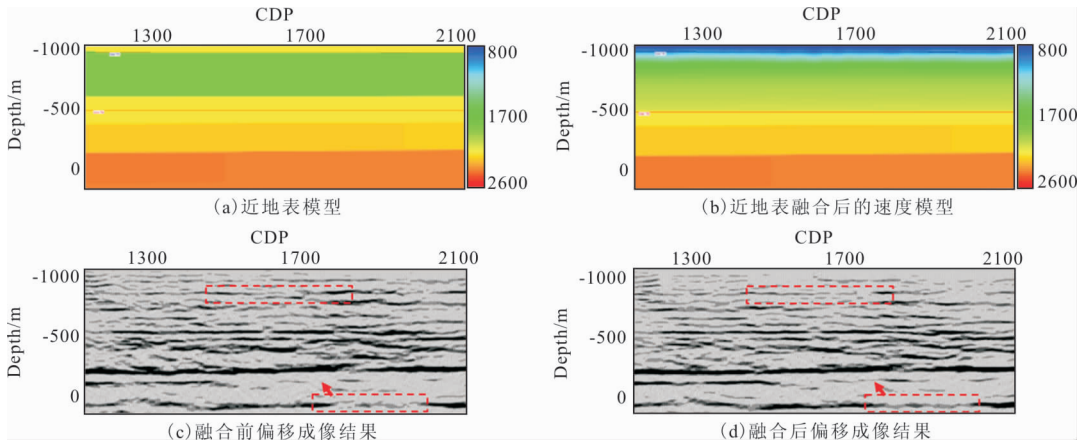


图 10 近地表模型镶嵌
Fig. 10 Near surface model fusion

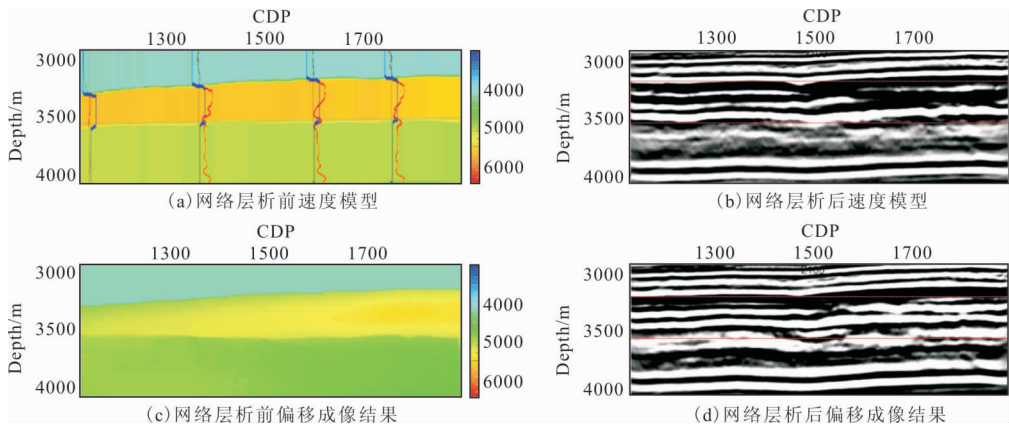


图 11 火成岩速度优化
Fig. 11 Velocity optimization of igneous layer

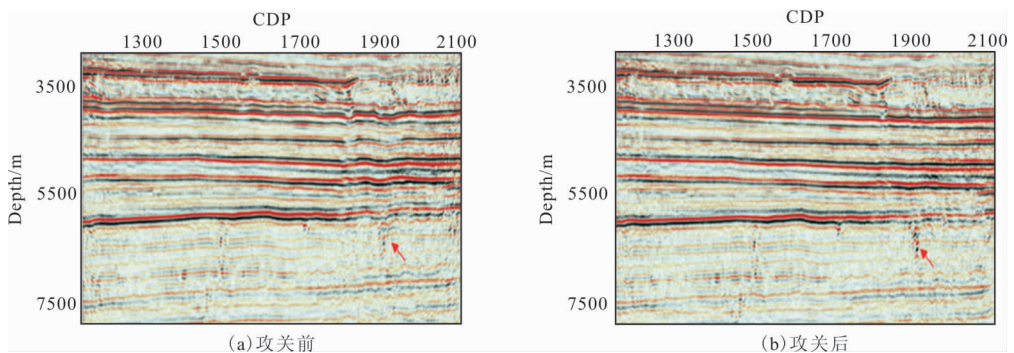


图 12 缝洞成像对比
Fig. 12 Slit hole imaging canparison

幕成像更加清晰,反射之间接触更加清楚,分辨率明显提高。

5 应用效果

研究区域位于塔克拉玛干沙漠边缘,地表为蜂

窝状沙丘和条带状沙丘,奥陶系碳酸盐岩埋深大于 6 000 m,上覆二叠系火成岩。前期油田统计分析表明,缝洞体储层主要受控于走滑断裂破碎带,多分布在距主断裂一定范围之内。从缝洞和走滑断裂成像剖面(图 12)和(图 13)来看,攻关剖面解决了时间、频率和振幅一致性,压制多次波提高剩余时差拾取

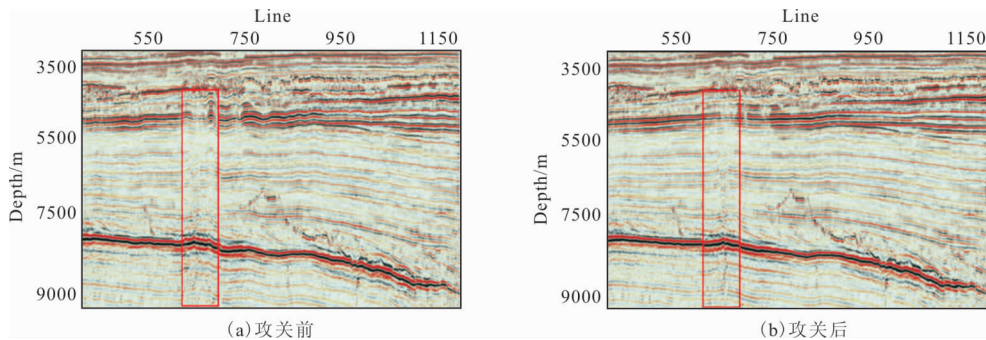


图 13 走滑断裂成像对比

Fig. 13 Comparison of imaging of strike-slip fault

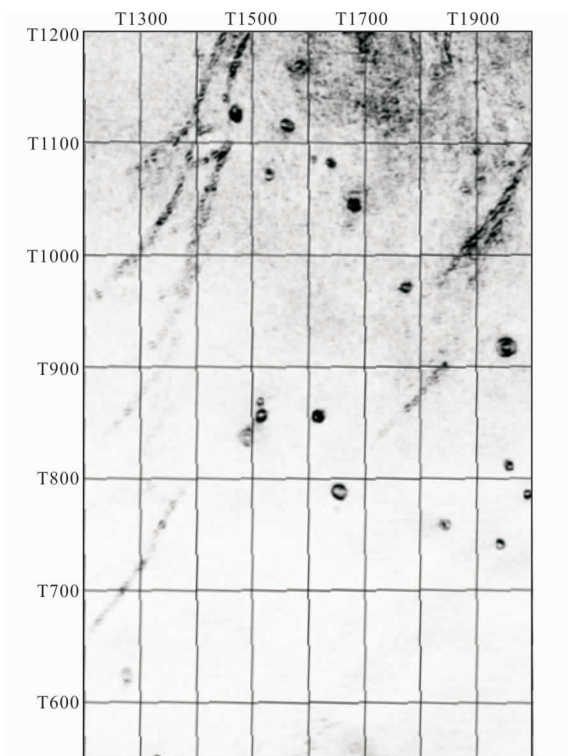


图 14 碳酸盐岩相干属性平面图

Fig. 14 Coherent attribute plane of carbonate

精度,在近地表镶嵌+井控+层控的初始速度模型基础之上,利用网格层析提高火成岩在内的全层系速度精度,成像精度得到较大幅度的改善。分析相干属性平面图(图 14),看出奥陶系走滑断裂和缝洞分布特征清晰,可为油田奥陶系缝洞储层高效开发提供支撑。

6 结论及建议

笔者提出的沙漠区超深碳酸盐岩地震资料处理技术较好地解决了静校正和多次波问题,拓宽了超深层主频,建模精度高,确保了成像品质,能更清晰

地刻画缝洞和走滑断层。

1) 大沙漠区沙丘速度横向变化剧烈,静校正问题严重,微测井约束层析能较好反演沙丘表层结构,通过对比分析,低降速带剥蚀到 1 900 m/s 能更好解决时间一致性问题。

2) 建议应用近地表 Q 补偿解决地震波穿过沙丘产生的能量衰减和速度频散,提高深层资料分辨率,为后续奥陶系偏移成像提供优质预处理道集。

3) 推荐采用 VSP 上行波和井震联合识别多次波,基于最小二乘拉冬变换和扩展层间多次波压制,为剩余时差精准拾取奠定基础。

4) 深度域建模和速度优化方面,基于小滑面,浅层镶嵌沙丘地表,利用 VSP 和声波速度建立精准初始模型,针对火成岩精细刻画,提高超深目的层全层系建模精度,确保缝洞和走滑断裂高精度成像。

参考文献:

- [1] 杨威,周刚,李海英,等. 碳酸盐岩深层走滑断裂成像技术[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 246-252.
YANG W, ZHOU G, LI H Y, et al. Seismic imaging technology for deep strike slip faults in carbonate reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 246-252. (In Chinese)
- [2] 江同文,昌伦杰,邓兴梁,等. 断控碳酸盐岩油气藏开发地质认识与评价技术—以塔里木盆地为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 1-9.
JIANG T W, CHANG L J, DENG X L, et al. Geological understanding and evaluation technology of fault controlled carbonate reservoir development: a case study of the Tarim basin [J]. Nature Gas Industry, 2021, 41(3): 1-9. (In Chinese)
- [3] 张波,郭平,高树生,等. 高分辨率处理技术在辽河雷家地区碳酸盐岩储层中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(增刊): 43-50.
ZHANG B, GUO P, GAO S S, et al. High-resolution techniques applied for carbonate reservoirs in Lei-

- jia Area, Liaohe [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(S1):43-50. (In Chinese)
- [4] 宋智强,刘斌,陈吴金,等. 沙漠区表层 Q 值求取及补偿方法研究[J]. 油气藏评价与开发, 2013, 3(4):8-11. SONG Z Q, LIU B, CHEN W J, et al. Research on calculation methods of Q value in desert area surface [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013, 3(4):8-11. (In Chinese)
- [5] 蒋立,陈勇,肖艳玲,等. 地表过渡带近地表补偿与地表一致性反褶积处理效果对比研究[J]. 石油物探, 2018, 57(57):870-877. JIANG L, CHEN Y, XIAO Y L, et al. A comparison of near-surface Q compensation and surface-consistent deconvolution in the near-surface transition zone [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(57):870-877. (In Chinese)
- [6] 杜增利,施泽进,田军,等. 新疆沙漠地区低降速带品质因子计算[J]. 大庆石油学报, 2006, 30(6):20-23. DU Z L, SHI Z J, TIAN J, et al. Calculation of quality factor of LVL in Tarim Basin [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006, 30(6):20-23. (In Chinese)
- [7] 徐颖,刘晨,吕秋玲,等. 多域组合去噪技术在塔中奥陶系低信噪比资料处理中的应用[J]. 石油物探, 2015, 54(2):172-179. XU Y, LIU C, LV Q L, et al. Application of multi-
- domain composite denoising technology for the processing of Ordovician low SNR seismic data in Tazhong Area [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(2):172-179. (In Chinese)
- [8] 陈泓竹,王彦春. 频率域拉东变换加权约束反演压制层间多次波[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(4):666-673. CHEN H Z, WANG Y C. Peg-leg multiple suppression with the weight-constrain inversion of Radon transform in the frequency domain in Song Liao Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(4):666-673. (In Chinese)
- [9] 赵玲芝,谷跃民,张建中,等. 多信息融合的近地表速度建模技术及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(1):34-41. ZHAO L Z, GU Y M, ZHANG J Z. Multi-information fusion near-surface velocity modeling technology and its application [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(1):34-41. (In Chinese)
- [10] 肖艳玲,范旭,王晓涛,等. 网格层析速度反演技术在齐古背斜叠前深度偏移中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(2):98-105. XIAO Y L, FAN X, WANG X T, et al. Application of grid tomography velocity inversion technique in depth migration of Qigu anticline prestack [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(2):98-105. (In Chinese)

Application of high-precision seismic processing technology for ultra-deep carbonate reservoir in the great desert area, Tarim basin, NW China

ZHAO Ruirui¹, ZHOU Qiang², PENG Gengxin¹, HU Xiaoya², SUN Haijun¹,
CHEN Li², LI Zhong², WANG Long², WANG Yuhua²

(1. Tarim Oilfield Company, Petro China, Korla 841000, China;

2. BGP Inc., Petro China, Chengdu 610213, China)

Abstract: The ultra-deep marine carbonate formation of The Great Desert, Tarim Basin Area, NW China, hosting great potential reservoirs, is a prospective target for petroleum exploration. However, there are several challenges remain in ultra-deep desert seismic data processing: ① Loose structures of near-surface in desert regions can bring severe seismic energy absorption, showing distinct low-frequency characteristics, which will eventually affect the reconstruction of signals; ② The differences between interlayer multiple wave and primary wave in travel time and velocity are relatively small in desert area. Therefore, it is much more challenging to identify and suppress interlayer multiple waves; ③ The relatively low-resolution seismic data in ultra-deep area (depth > 7500 m) due to energy absorption and wavelet deformation cannot meet the requirement of high-precision imaging; ④ The drastically varying velocity medium under the influence of lithology, primarily consisted of Permian igneous rocks and Calcareous limestone, causes excellent difficulties in velocity model building. We attempt to achieve high-precision exploration progress in Tarim basin: ① We use microlog data to constrain the near-surface model building; ② The multiple suppression technology we are applying this paper can provide more accurate pre-stack data; ③ We adopt near-surface Q filtering and migration for high-frequency compensation to improve the seismic resolution; ④ We build the initial velocity model based on VSP data, update the initial velocity model with tomography, finally obtain high-precision imaging of ultra-deep carbonate.

Keywords: desert; ultra-deep carbonate; Q filtering; multiple suppression; velocity model building; seismic data processing