

# 库车坳陷阿瓦特地区高精度地震成像技术及应用

罗虎志, 裴家定, 袁燎, 高现俊, 庄秋晓

(中国石油东方地球物理勘探有限责任公司, 涿州 072751)

**摘要:** 阿瓦特区块位于塔里木盆地库车坳陷克拉苏冲断带西段, 地表高程变化大、起伏剧烈, 地下构造极其复杂。受地表及地下地质条件的影响, 地震资料叠前深度偏移处理准确成像困难。笔者针对该区特殊的地质特征, 通过近真地表叠前深度偏移技术、高精度浅表层速度建模技术、特殊岩性体速度精细刻画技术、多方位网格层析成像技术等系列高精度地震成像技术的应用, 大幅度提升了该区地震资料的叠前深度偏移成像品质, 为后续地质解释及油气勘探开发奠定了坚实的数据基础。

**关键词:** 高精度地震成像; 近真地表叠前深度偏移; 浅表层; 特殊岩性体; 多方位网格层析

**中图分类号:** P631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.06.08

## 0 引言

阿瓦特区块位于塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带, 东南为拜城凹陷与秋里塔格冲断带的交接并消失的位置, 西部是乌什凹陷, 西南部则是新生代处于稳定期的温宿古凸起。该区石油地质条件优越, 具有良好的生储盖条件。主要发育三叠系和侏罗系烃源岩, 具有分布广、厚度大、类型好的特点。白垩系发育巴什基奇克组、舒善河组、亚格列木组多个优质储层。同时, 白垩系地层上覆的古近系膏盐层又能对油气起到很好的封盖。随着阿瓦3井在白垩系巴什基奇克组见良好气测显示, 进一步揭示了该区巨大的勘探潜力<sup>[1-2]</sup>。

阿瓦特地区地表条件及地下地质结构复杂。工区海拔在1 400 m~4 600 m之间, 地形起伏剧烈, 沟壑纵横、断崖林立, 局部高差可达数百米。按地形起伏程度可以将其细分为高陡山体区、一般山体区、冲积扇区及河道农田村庄4种类型, 其中高陡山体区所占比例最大。工区表层结构复杂, 低速带厚度及速度横向变化大。地表出露多种岩性, 工区东

部阿瓦特冲积扇体区发育第四系砾岩。阿瓦特区块处于乌什凹陷和拜城凹陷等多个构造区的衔接部位, 地质结构非常复杂, 横向变化剧烈、断片多、断层接触关系复杂, 构造埋深差异大, 总体表现为4-6排区带, 上覆巨厚不规则膏岩层, 且纵横向影响范围广<sup>[3]</sup>。

地表地下双复杂特征以及砾岩、膏盐岩等特殊岩性体发育给该区地震资料叠前深度偏移处理的准确成像带来了极大的挑战。为此, 笔者针对该区特殊的资料特点, 从近真地表叠前深度偏移、高精度浅表层速度建模、特殊岩性体速度精细刻画、多方位网格层析等方面进行研究, 形成了一套适用于该区叠前深度偏移处理的高精度地震成像技术, 并取得了较好的应用效果。

## 1 技术方法

### 1.1 近真地表叠前深度偏移技术

叠前深度偏移最理想的情况是在真实地表上进行偏移, 偏移基准面越接近地表, 越能准确描述地震波在近地表中的传播情况。阿瓦特地区地表起伏剧

收稿日期: 2023-06-25

第一作者: 罗虎志(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震资料处理技术研究, E-mail: luohuzhi@cnpc.com.cn。

烈,以传统大平滑的 CMP 面作为偏移基准面所得到的射线路径与实际射线路径会产生较大误差,影响偏移成像精度。由于资料处理实践中很难获得完全准确刻画近地表变化特征的速度模型来实现真实地表上的偏移,因此笔者采用了对真实地表高程进行尺度为半径 500 m 平滑后的地表小圆滑面(图 1)作为偏移基准面<sup>[4]</sup>,并对偏前道集进行高频道间时差校正,将数据校正到保留更多地形特征的小圆滑地表面,从而实现在近真地表开展叠前深度偏移处理,提高偏移成像精度。

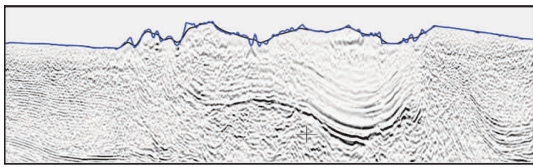


图 1 偏移基准面(黑色)与地表面(蓝色)

Fig. 1 The migration datum(black) and the earth surface(blue)

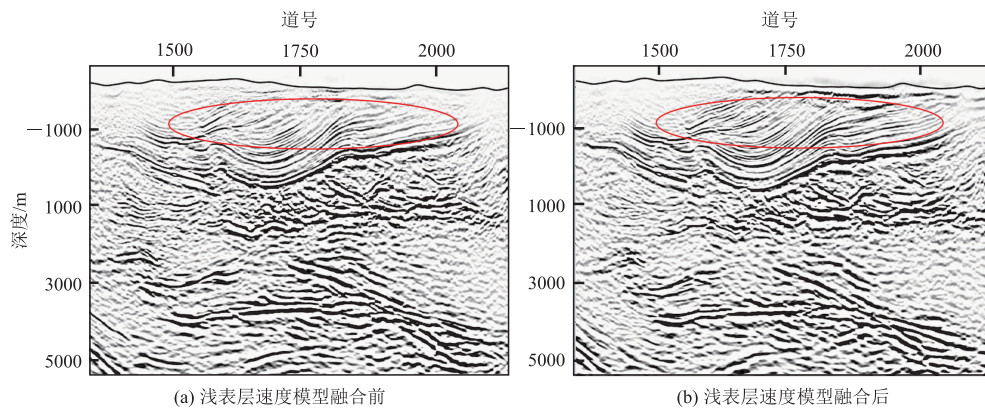


图 2 浅表层速度模型融合前后叠前深度偏移剖面对比

Fig. 2 Comparison of pre-stack depth migration profiles before and after merging the shallow surface velocity model

### 1.3 特殊岩性体速度精细刻画

1) 高速砾岩速度精细刻画。笔者对工区高速砾岩的精细刻画首先依据沉积相、地质露头及非地震等多种信息,联合确定砾岩区空间分布范围,主要集中在工区东部的阿瓦特冲积扇体区。然后调研区内及周边发育高速砾岩冲积扇的钻井速度资料,统计砾岩速度规律,确定工区范围内砾岩平均速度大致为 4 250 m/s~4650 m/s。最后,根据井速度及地质规律,通过勾绘砾岩控制层位速度平面图等值线,对砾岩区速度进行精细刻画。

2) 膏盐岩速度精细刻画。针对研究区膏盐岩塑性变形剧烈,厚度分布横向变化大的特征,笔者采用

### 1.2 高精度浅表层速度建模技术

利用微测井约束的初至层析方法反演出的表层速度模型更加逼近地下真实的表层速度变化规律,故这里的浅表层速度建模采用的是基于地表小圆滑面融合初至层析反演表层速度模型的方法<sup>[5-6]</sup>,由此解决无数据驱动情况下的浅表层速度精度不高的问题。具体做法是,参考层析反演射线密度图以及与 VSP 井速度的吻合情况等确定速度拼接面,拼接面以上将初至层析反演的表层速度模型直接嵌入初始速度模型,拼接面以下 200 m~300 m 左右作为过渡融合面进行表层速度模型与初始速度模型的过渡融合处理,最终得到浅表层速度精度较高的偏移速度场。

从浅表层速度模型嵌入前后的叠前深度偏移剖面对比来看(图 2),浅表层速度嵌入后偏移成像质量有较大改善。

以下针对性技术步骤:①充分调研与分析。根据以往研究成果(老速度,井资料等),调研本区膏盐岩空间分布及速度特征。区内膏盐岩不规则分布,整体非常发育,空间纵、横向变化大,厚度可达几千米。经分析,膏盐岩地层的速度大致在 3 800 m/s~4 300 m/s 之间。②盐内初始速度填充。处理解释一体化结合,首先利用实体构造模型对区内膏盐层空间位置进行精细描述,然后依据膏盐岩速度规律信息,对膏盐层速度进行背景速度填充。③盐内速度优化。井点附近区域,根据井点处 VSP 速度规律进行盐内速度优化;没有井的其他区域,根据地质规律,利用速度扫描等手段,结合道集拉平情况及偏移

成像质量,提高膏盐层速度模型精度。

通过特殊岩性体速度精细刻画后,区内砾岩及

膏盐岩空间速度规律更合理,与 VSP 井速度吻合度高,偏移成像质量得到明显提升,如图 3 所示。

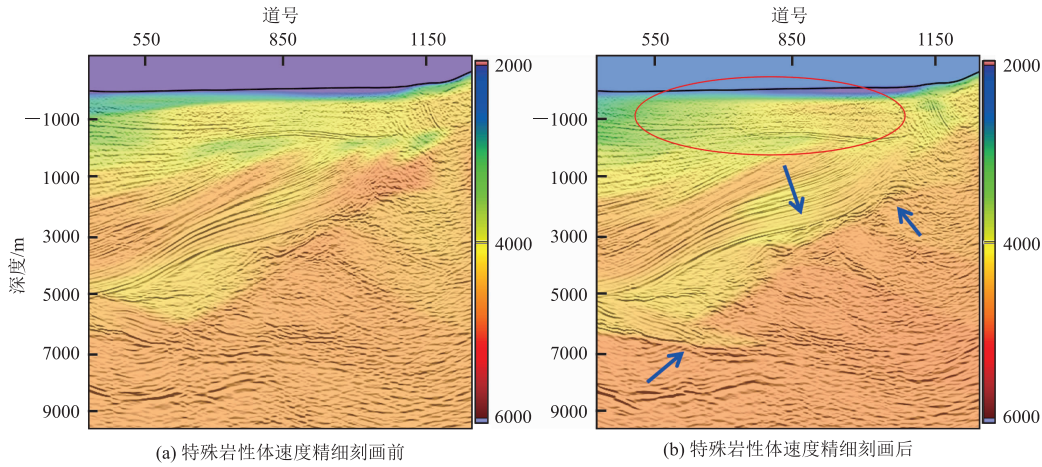


图 3 特殊岩性体速度精细刻画前后叠前深度偏移速度场与剖面叠合图对比

Fig. 3 Comparison of velocity field and profile of pre-stack depth migration before and after high-precision velocity characterization of special lithology body

#### 1.4 多方位网格层析成像技术

多方位网格层析速度建模技术是以网格层析技术为基础,充分利用不同方位道集射线信息,综合进行射线追踪与反演,有利于提高深度域速度建模精度。

若把地下划分为许多具有速度信息的立方体小格<sup>[7]</sup>,则可以得到一个矩阵(式(1))。

$$\begin{bmatrix} \delta t_1 \\ \delta t_2 \\ \delta t_3 \\ \vdots \\ \delta t_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{10} & D_{11} & \cdots & D_{1n} \\ D_{20} & D_{21} & \cdots & D_{2n} \\ D_{30} & D_{31} & \cdots & D_{3n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ D_{m0} & D_{m1} & \cdots & D_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta s_0 \\ \delta s_1 \\ \delta s_2 \\ \vdots \\ \delta s_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $\delta t_i$ 表示 CMP 道集中第  $i$  道的走时误差; $D_{ij}$ 表示 CMP 道集中第  $i$  道在第  $j$  个网格中的射线路径长度; $\delta s_j$ 表示第  $j$  个网格中的慢度误差。

每个网格中的传播速度建模方法都是基于射线的,一般称其为“层析成像反演”或“层析成像”。一般情况下,如果介质具有 VTI 性质或者宽方位地震数据的任意给定的方位角范围内,在进行速度分析和动校正处理时,可以不考虑 HTI 介质各向异性影响,纵波的旅行时方程可以表示为式(2)形式。

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v_{nmo}^2} - \frac{2\eta x^4}{v_{nmo}^2 [t_0^2 v_{nmo}^2 + (1+2\eta)x^2]} \quad (2)$$

其中: $t$ 为纵波旅行时; $x$ 为炮检距; $v_{nmo}$ 为纵波动校正速度; $\eta$ 为纵波各向异性参数,可以通过双参数扫描速度分析方法求取。

采用双参数速度分析的方法,就是同时扫描

$v_{nmo}$ 和 $\eta$ 两个参数。在每个时刻,选择一定的参数范围和参数间隔,计算每组参量对应的能力值,得到一个随双参数变化的能量曲面,曲面上能量最高点对应的参数即为介质的速度参数。

如果岩石中的各向异性是由一组定向垂直裂缝引起的,那么根据地震波传播理论,纵波平行或者垂直于裂缝传播时,具有不同的旅行速度。平行裂缝传播时,以快波速度传播;垂直裂缝传播时,以慢波速度传播。当纵波通过裂缝介质时,对于固定的炮检距,期方位速度与裂缝方位满足式(3)。

$$v = v_0 + \alpha \cdot \cos 2\beta \quad (3)$$

式中: $v$ 为纵波方位速度; $v_0$ 为方位速度平均值; $\alpha$ 为方位速度有关的调制因子; $\beta = -\phi$ ,为激发点到检波点观测方位; $\phi$ 为裂缝走向方位。

理论上,方程(3)只要知道了3个方位或者3个以上的方位速度就可以解该方程的 $v_0$ 、 $\alpha$ 以及 $\beta$ 这3个参数,从而得到方位速度椭圆方程<sup>[8]</sup>。

多方位网格层析成像基于上述理论进行速度模型建立,具体实现过程:首先将偏前 CMP 道集分成3~6个子方位角道集并利用现有速度模型分别进行叠前深度偏移,然后在各自的叠前深度偏移结果上进行剩余时差、反射层倾角、同相轴连续性等属性的拾取与优化。将不同方位得到的属性数据作为多方位网格层析反演过程的输入,通过交互射线追踪等方式选择合适的参数建立和求解矩阵,并最终得到一个更新后的速度模型。若新速度模型能使 CRP 道集平直且符合地质规律,则可以将其作为深

度偏移最终速度模型。反之,再进行新一轮多方位网格层析工作。按照这种方法一致迭代下去,直到新速度模型满足要求<sup>[9-10]</sup>。

## 2 应用效果

通过系列针对性技术的应用,该区资料叠前深

度偏移成果品质较以往处理成果有了大幅度的提升。无论从工区主测线还是联络线上看,新处理的叠前深度偏移剖面信噪比改善明显,主要目的层古近系、白垩系反射同相轴能量更加聚焦,波阻特征更好;标志层古近系膏盐岩顶界面同相轴连续可追踪,盐下阿瓦 1、阿瓦 3 等构造反射特征及接触关系清楚,更加符合地质认识(图 4、图 5)。

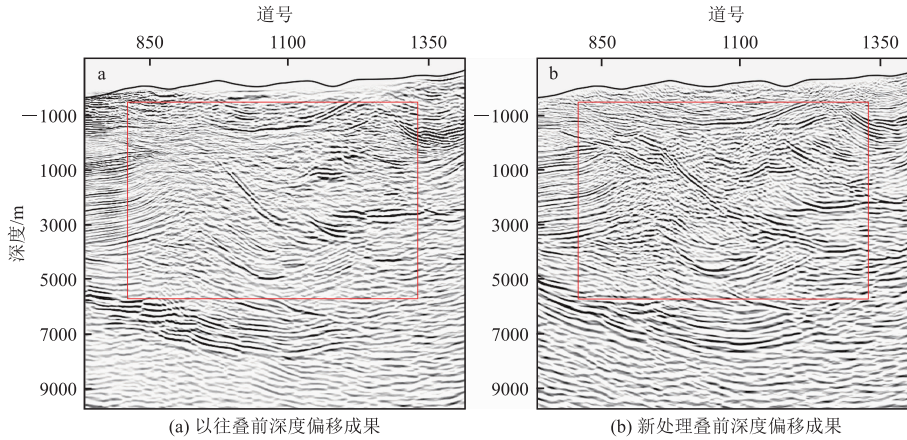


图 4 以往叠前深度偏移成果与新处理叠前深度偏移成果对比(主测线)

Fig. 4 Comparison of previous results of prestack depth migration with new ones(inline)

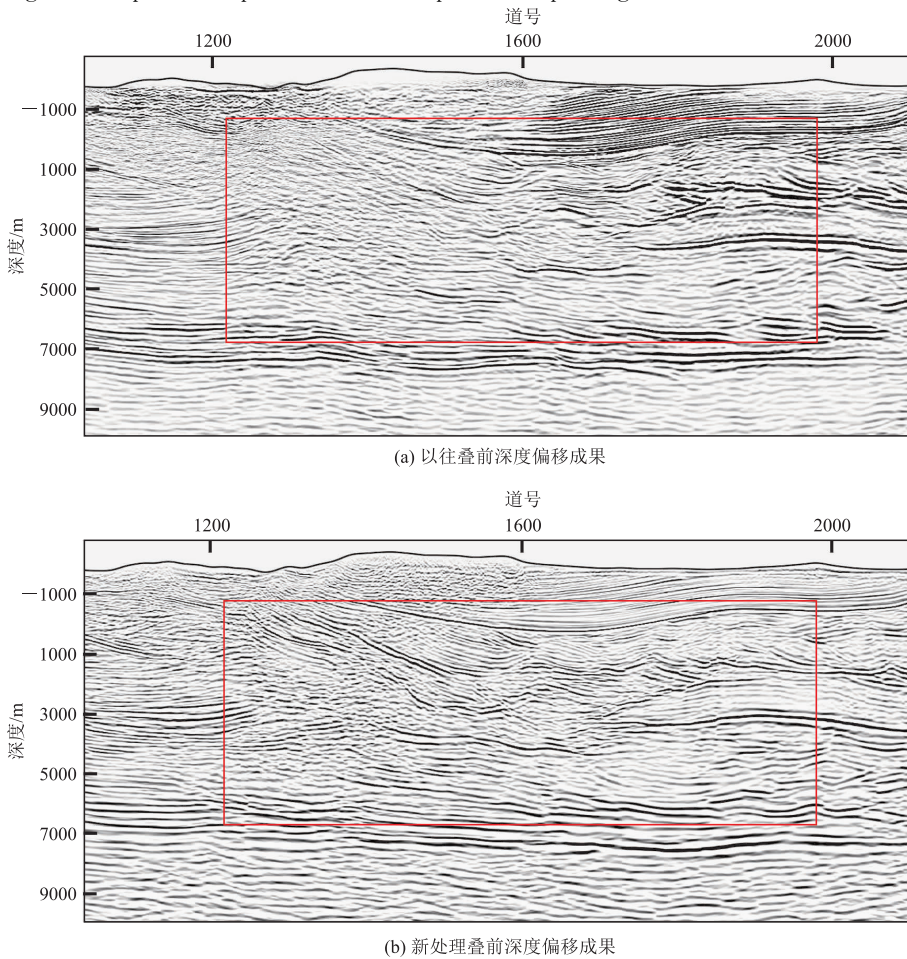


图 5 以往叠前深度偏移成果与新处理叠前深度偏移成果对比(联络线)

Fig. 5 Comparison of previous results of prestack depth migration with new ones(crossline)

### 3 结论

针对阿瓦特地区具有地表起伏剧烈、地质结构复杂、砾岩及膏盐岩发育等特点,本次研究形成了近真地表偏移、高精度浅层建模、特殊岩性体刻画、多方位网格层析驱动等配套技术方案,有效解决了该区准确成像难的问题,并得到以下 3 点认识:

1)理论上,偏移基准面越接近地表,越能准确描述地震波在近地表中的传播情况,但是目前技术手段不能完全准确刻画近地表速度变化特征,近真地表叠前深度偏移技术仍然是复杂山地偏移成像的首选。

2)精细刻画特殊岩性体(砾岩、膏盐岩)需要加强处理解释一体化结合,充分利用沉积相、非地震资料、测井资料等信息,才能有效解决异常体分布范围及速度精度问题。

3)双复杂区具有典型的方位走时差异,优选多方位网格层析技术优势更加明显,速度模型细节刻画更清楚,有效提高了叠前深度偏移成像质量。

本次研究在双复杂区叠前深度偏移高精度成像方面具有推广应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 吴超,谢会文,李勇,等.库车坳陷吐孜阿瓦特区块的地质构造特征与物理模拟[J].天然气工业,2012,32(5):19-24.  
WU C, XIE H W, LI Y, et al. Geological and structural characteristics and physical simulation of the Tuziawat Block, Kuqa Depression of the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(5): 19-24. (In Chinese)
- [2] 吴珍云,杨秀磊,尹宏伟,等.库车坳陷西段阿瓦特构造转换带盐构造演化特征及影响因素[J].地球科学,2023,48(4):1271-1287.  
WU Z Y, YANG X L, YIN H W, et al. Characteristics and influencing factors of salt structure evolution in awate transfer zone, western kuqa depression[J]. Earth Science, 2023, 48(4): 1271-1287. (In Chinese)
- [3] 韩耀祖,谷永兴,刘军,等.塔里木盆地克拉苏构造带西段构造成因及油气远景展望:以阿瓦特地区为例[J].天然气地球科学,2016,27(12):2160-2168.  
HAN Y Z, GU Y X, LIU J, et al. Tectonic origin and

the prospect of oil gas in west kelasu structural belt: A case study of awate segment[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(12): 2160-2168. (In Chinese)

- [4] 王建华,谢俊法,邵喜春,等.近似真地表叠前深度偏移在复杂山地的应用[C].中国石油学会2019年物探技术研讨会论文集,2019:293-297.  
WANG J H, XIE J F, SHAO X C, et al. Application of near-real surface prestack depth migration in complex mountain [C]. Proceedings of 2019 Geophysical Exploration Technology Seminar of China Petroleum Society, 2019: 293-297. (In Chinese)
- [5] 秦龙,王川,郑多明,等.复杂山地水-陆混采地震资料高精度表层速度建模与应用[J].物探化探计算技术,2024,46(5):537-543.  
QIN L, WANG C, ZHENG D M, et al. High-precision near-surface velocity modeling and application in complex mountainous water-land mixed seismic survey [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 46(5): 537-543.
- [6] 赵玲芝,冯许魁,祖云飞,等.复杂地表区叠前深度偏移近地表速度应用技术研究[J].地球物理学进展,2018,33(3):1176-1183.  
ZHAO L Z, FENG X K, ZU Y F, et al. Applied research of the complex near-surface velocity in the depth migration[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(3): 1176-1183. (In Chinese)
- [7] LAN F, JONES. An Introduction to Velocity Model Building[J]. The Leading Edge, 2010(11): 325-370.
- [8] 黄跃,马昭军,甘其刚,等.基于HTI介质理论的纵波速度分析方法[J].成都理工大学学报(自然科学版),2011,38(4):476-480.  
HUANG Y, MA Z J, GAN Q G, et al. P wave velocity analysis method based on the HTI media theory [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2011, 38(4): 476-480. (In Chinese)
- [9] CORDSEN A, GALBRAITH M. Narrow- versus wide-azimuth land 3D seismic surveys[J]. The Leading Edge, 2002, 21(8): 764-770.
- [10] 方勇,温铁民,李虹,等.多方位网格层析成像技术及应用效果[J].物探化探计算技术,2016,38(5):677-680.  
FANG Y, WEN T M, LI H, et al. The application of multi-azimuth grid tomographic imaging technology [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 38(5): 677-680. (In Chinese)

## High precision seismic imaging technology and application in Tuziawat area of Kuqa Depression

LUO Huzhi, PEI Jiading, YUAN Liao, GAO Xianjun, ZHUANG Qiuxiao

(BGPINC., China National Petroleum Corporation, Zhuozhou 072751, China)

**Abstract:** The tuziawat area is located in the western section of the Kelasu thrust belt in Kuqa Depression, Tarim Basin. The surface elevation changes greatly, the drastic fluctuation, and the underground structure is highly complicated. Due to the influence of surface and underground geological conditions, it is difficult to get accurate seismic imaging result with prestack depth migration. Aiming at the unique geological characteristics of the Tuziawat area, this paper proposes an innovative workflow to improve the seismic imaging result quality with prestack depth migration. The proposed workflow consists of a series of technologies, such as near-real surface prestack depth migration, high-precision shallow surface velocity modeling, high-precision velocity characterization of particular lithology body and multi-azimuth grid tomography. The workflow application improves the quality of the seismic imaging result with prestack depth migration, which lays a solid data foundation for subsequent geological interpretation and oil and gas exploration and development.

**Keywords:** high precision seismic imaging; near-real surface prestack depth migration; shallow surface; special lithology body; multi-azimuth grid tomography