

复杂山地水—陆混采地震资料高精度表层速度建模与应用

秦龙, 王川, 郑多明, 李文燕, 徐仲博

(中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 库尔勒 841000)

摘要: 塔里木盆地 ZQX 区块石油地质条件优越, 并首次开展了水域空气枪激发、拖缆接收采集, 但其近地表结构非常复杂, 分布有农田、村庄、山体、戈壁砾石、水库等地表类型。针对水—陆混采资料的特殊性, 笔者提出了水—陆混采初至起跳点拾取与双约束层析反演新方法。先拾取出不同激发接收模式下准确的初至波波峰时间, 利用高信噪比道计算波峰到起跳点的时差, 再通过插值解决低信噪比道波峰时间转初至时间的空变时差校正问题。以此为基础, 采用水速硬约束和微测井软约束的层析反演方法, 解决了 ZQX 区块水库—山地水—陆混采三维高精度近地表速度建模问题, 叠加剖面及深度偏移成像质量明显提升, 取得了较好的应用效果。

关键词: 水—陆混采; 波峰转起跳; 双约束; 层析反演; 静校正

中图分类号: P631.44

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.05.05

0 引言

ZQX 工区地表有农田村庄、戈壁砾石区、山体区、水域区等多种表层结构类型。工区整体呈南高北低趋势, 海拔在 1 067 m~2 000 m。工区北部山前带戈壁区发育洪积扇, 厚度可达 60 m。克孜尔水库位于工区东南角, 水深在 20 m 以内。南部山区地形高陡、断崖林立、表层结构复杂。工区地貌如图 1 所示。工区陆地部分采用井炮激发, 加速度检波器接收。水库区采用空气枪激发, 拖缆压电式双检接收(水检和陆检)。

复杂近地表结构下的水—陆混采地震资料表层速度建模面临诸多挑战。一是工区采用气枪和炸药两种震源, 水检和陆检两种检波器, 原始数据振幅、频率和相位存在一定差异, 保证初至拾取一致性、可靠性是本区高精度表层建模和静校正量计算的关键。

同时, 山前戈壁区、山体区初至波场复杂, 干扰严重, 初至波信噪比低, 拾取困难; 二是水库区速度稳定, 如何在反演过程中保持水深和水速合理, 对初

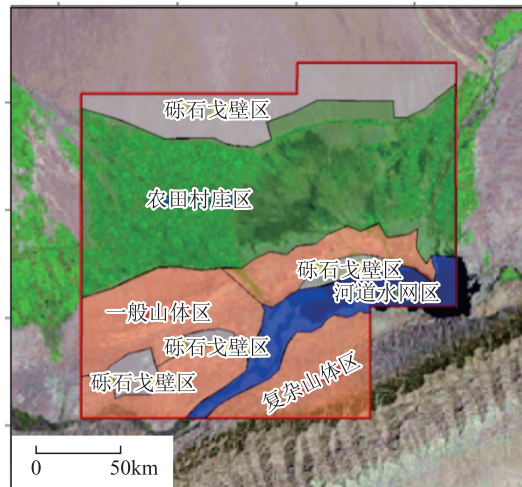


图 1 工区地貌图

Fig. 1 Geomorphologic map of the seismic survey

收稿日期: 2023-05-29

第一作者: 秦龙(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震资料处理研究和生产工作, E-mail: qinlong-tlm@petrochina.com.cn。

至层析反演提出了新的要求;三是如何应用好多种表层结构条件下的微测井资料约束,也是能否获得全区高质量表层速度模型的重点。

初至层析反演方法能够适应地层介质速度的纵横向变化^[1-3],是目前工业界应用最为广泛,应用效果最好的一类表层建模方法。在实际应用过程中多信息融合约束的反演方法不断受到重视,可以充分利用近地表调查信息与初至层析反演的优势,提高近地表速度建模精度^[4-5]。

针对山地探区初至波信噪比低,外源干扰发育,初至拾取困难的问题,国内外学者已经提出多种初至波拾取方法^[6-11],这些方法多以波峰拾取为主,拾取精度较高。然而,ZQX 区块由于激发接收条件的差异,波峰时间并不一致。笔者在初至波优化基础上,提出先拾取波峰,并采用高精度空变时移波峰时间转起跳时间的方法,将初至拾取时间校正到真

正的起跳时间,保证了拾取精度和效率。为确保工区内水库区水深、流速合理,提升极浅层速度模型的反演精度,提出了流速和微测井双约束层析反演方法,为静校正量计算及起伏地表叠前深度偏移奠定了坚实的基础。

1 水—陆混采地震资料初至识别与拾取

ZQX 区块是塔里木盆地首块在水域采用空气枪激发、拖缆接收的工区。以往水域部分为空炮、空道设计,导致地震资料大面积空白,影响圈闭识别和评价。通过对比分析,水域部分水检记录(压力信息)信噪比优于陆检记录(加速度信息)。如图 2 所示,水检资料背景噪音弱于陆检资料,更有利于开展高精度初至拾取。从叠加剖面上看,水检记录优势更加明显。

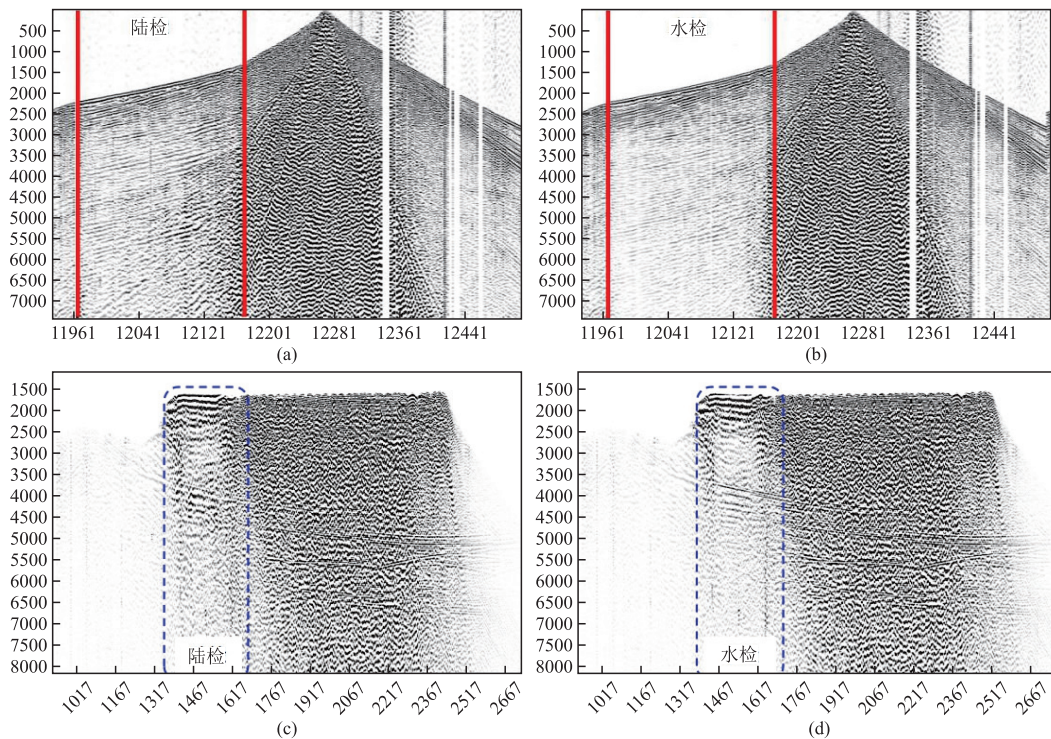


图 2 原始单炮与叠加剖面陆检记录与水检记录对比

Fig. 2 Comparison picture of velocity and pressure geophone records for the same shot and stacked section

空气枪激发与炸药震源激发子波相近,均为一瞬间的能量释放,即空气枪激发的陆检信号与炸药震源激发的陆检信号一致性较好,频率稍有差异。由于水检资料 and 陆检资料接收的信息不同,存在 90° 相位差^[12]。如图 3 陆检记录波峰拾取的初至投到水检数据上明显偏离波峰。图 4 陆检记录起跳点

拾取的初至投到水检记录上仍然为起跳点。

炸药震源与空气枪震源的真实初至时间均为振幅“从无到有”的起跳时间,生产中常常以波峰拾取代替起跳点拾取,主要是因为起跳点容易受到干扰,准确拾取困难。然而,由于水检陆检子波存在差异,波峰时间不一致。因此,为了保证拾取理论的正确,

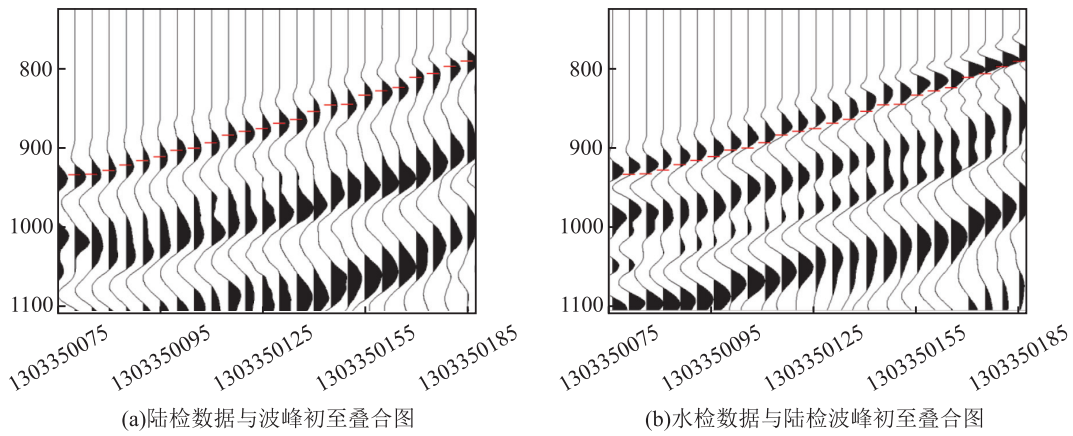


图 3 地震剖面与波峰初至叠合图
Fig. 3 Overlapping map of seismic records with first-arrival peak

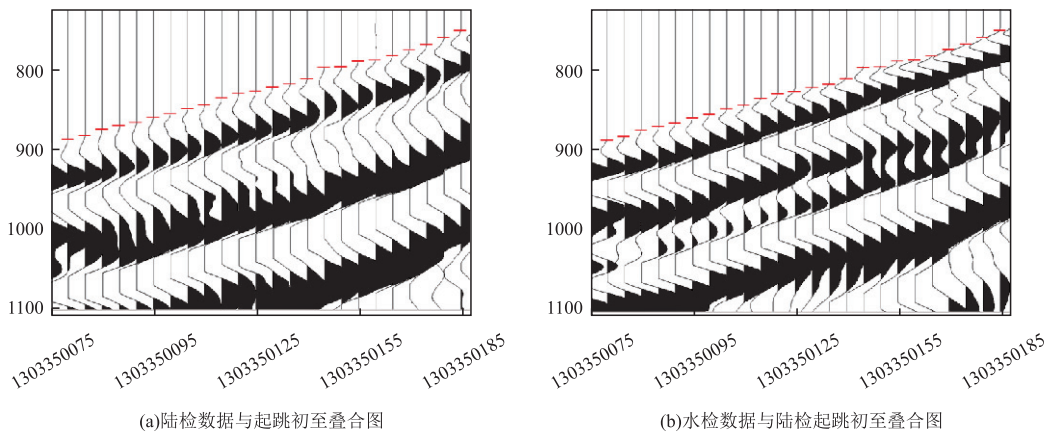


图 4 地震剖面与起跳初至叠合图
Fig. 4 Overlapping map of seismic records with first-arrival take-off

同时保证水—陆混采资料的初至时间匹配,采取先拾取波峰,通过多道统计变时移波峰转起跳,实现高效高精度初至起跳点拾取(图 5)。实现步骤如下:

1)通过常规初至拾取手段拾取初至波波峰,并进行人工复核,确保波峰拾取准确。

2)拾取初至趋势线(可简单由偏移距除以一个常速度获得),保证初至趋势线在初至波上方并尽可能贴近初至波。

某道的初至趋势线可表示为:

$$t_i = s_{offset} / v_0 \tag{1}$$

式中, t_i 表示第*i*道的初至趋势线时间, s_{offset} 为该道偏移距, v_0 为初至波近似速度(本工区选择 5 000 m/s)。

3)计算初至波单道信噪比,将初至线以下 1 s~2 s 时窗长度内(有效信号)的均方根振幅值与初至线以上时窗内(噪音)的均方根振幅值之比定义为初

至波单道信噪比。

某道初至波信噪比可近似表示为:

$$R_{S/N} = \sqrt{\sum_{j=n}^{n+m} A_j^2} / \sqrt{\sum_{k=0}^n A_k^2} \tag{2}$$

式中, $R_{S/N}$ 为单道初至波信噪比, A_j/A_k 为某道第*j*、*k*毫秒振幅,*n*、*m*分别为初至趋势线时间和初至波分析时窗底时间。

4)实际数据测试表明, $R_{S/N}$ 大于 10(该值可根据工区实际情况测试调整)的地震道起跳干脆、波形清晰稳定,波峰初至向上搜索第二零点即为起跳时间。

5)获得高信噪比道初至校正时差后,分区分偏移距统计时差,将较低信噪比道的校正时差进行内插,并在邻近几道内进行统计平滑增强抗干扰性,得到全区的初至起跳时间。

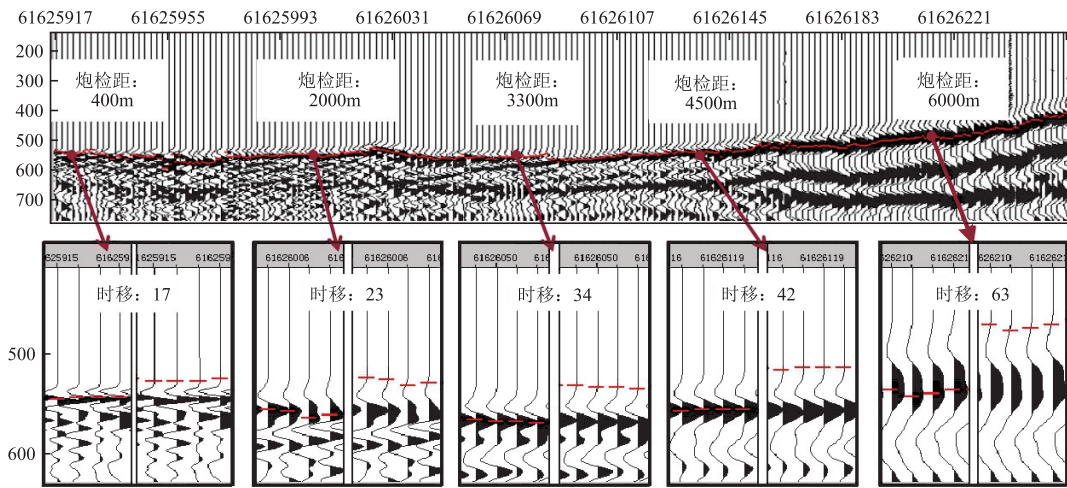


图 5 变时移实现波峰转起跳实例

Fig. 5 The first-arrival time shifting peak to take-off point

2 水域速度与微测井信息双约束初至层析反演

在工区内,水域部分的水速通过空气枪激发点到水底检波器的距离与传播时间进行计算,经过实测计算,水域地震波传播速度为 1 450 m/s。水深通过拖缆上的定位器实测,最深处为 19.2 m。将此

作为水库区域速度的约束条件。同时,将陆地部分微测井测量速度内插,建立极浅层的速度场,并作为近地表速度的约束条件。在进行初至层析反演时,这两种约束条件与旅行时残差一起构成目标函数,利用最小二乘法求解目标函数的极小值点,并得到近地表速度模型。在此近地表速度模型中,其浅层受到极浅近地表速度的约束,弥补了只用大炮初至进行层析反演时,丢失极浅层速度信息的不足。

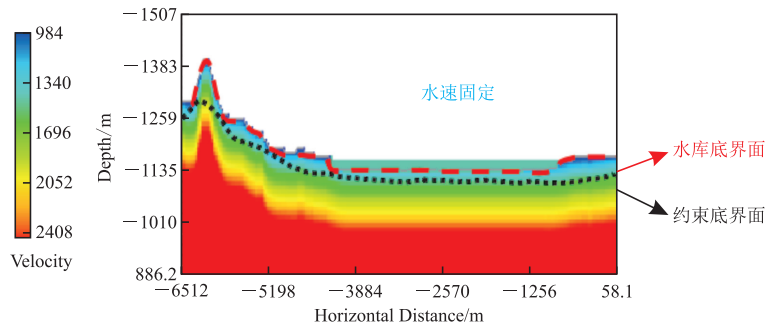


图 6 水域和微测井双约束界面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of water area and uphole dual constraint

在约束层析反演中,采用拉格朗日最优约束,该方法是一种将先验信息和数据信息相结合的技术,可以在保持约束条件信息的同时提升整体速度模型的精度和稳定性,其目标函数可表示为:

$$\xi(\Delta S) = (B\Delta S - H)^T (B\Delta S - H) + \lambda (C\Delta S - F)^T (C\Delta S - F) \quad (3)$$

式中, A 、 ΔS 和 ΔT 分别是 Jacobi 矩阵、慢度修正量和旅行时残差, C 是约束方程矩阵, F 约束方程组右端向量, λ 是权重值。当目标函数取最小值时,有

$\nabla \xi(\Delta S) = 0$, 由此可得到的 ΔS 就是最优解。从目标函数中可看出,当 $\lambda = 0$ 时,相当于没有约束, λ 越大,相当于约束方程在目标函数中所占权重越大,约束越强。水域部分速度稳定、精度高,采用硬约束。微测井控制部分由于进行了速度内插,速度精度略低,采用软约束。

通过上述层析反演得到的 ZQX 区块高精度近地表速度模型如图 7、图 8 所示,反演结果较好保持了水库区的速度,同时,趋势上与近地表地质情况吻合。

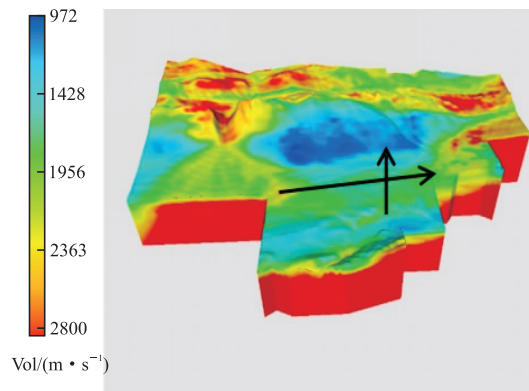


图 7 ZQX 区块高精度近地表速度模型

Fig. 7 High precision near surface velocity model of ZQX survey

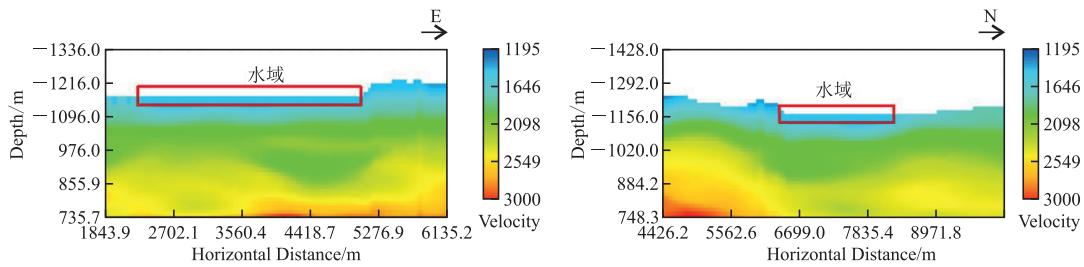


图 8 ZQX 区块过水域区东西向和南北向近地表速度剖面

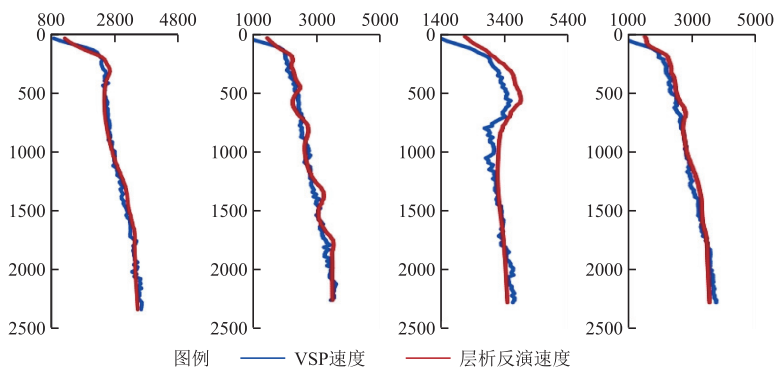
Fig. 8 Near surface velocity profiles in the east-west and north-south directions of the ZQX block in the water area

为定量检查反演速度模型的精度,用本区的 4 口 VSP 速度与层析反演结果对比,如图 9 所示,从左至右,两者的吻合率分别为 96%、93%、91%和 94%。

基于双约束反演得到的表层速度模型,计算静校正量,叠加剖面对比如图 10 所示。其中,图 10 (a)是应用高程静校正量的叠加剖面,图 10(b)是应用层析静校正量的叠加剖面,不难看出,后者同相轴

的连续性得到了明显改善。

同样,将层析反演速度模型用于起伏地表叠前深度偏移速度建模,偏移剖面的质量也明显提升。图 11 中 A、B 界面分别是地表平滑面和速度融合界面,图 11(a)是未融合层析反演速度,直接采用构造建模的深偏速度场,图 11(b)界面 B 以上是融合层析反演结果后的深偏速度场。



蓝色曲线为 VSP 速度;红色曲线为层析反演速度

图 9 ZQX 区块层析反演速度与 VSP 速度对比图

Fig. 9 Comparison chart of ZQX block tomographic inversion velocity and VSP velocity

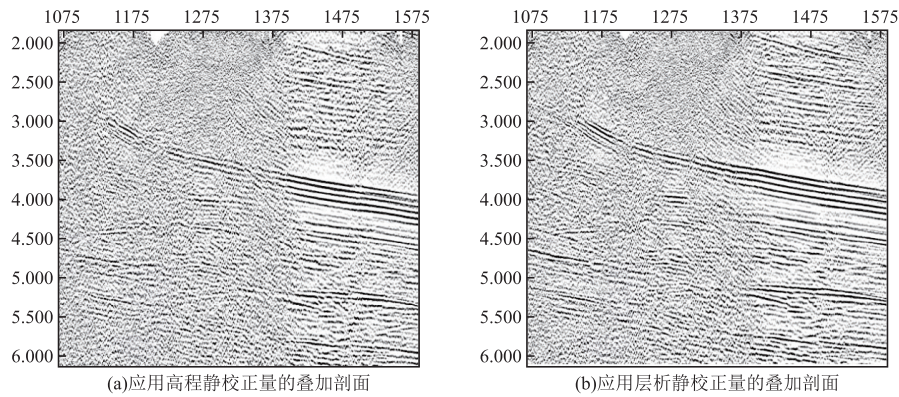


图 10 应用高程静校正量的叠加剖面和应用层析静校正量的叠加剖面

Fig. 10 Comparison between elevation static and tomographic static stacked profile

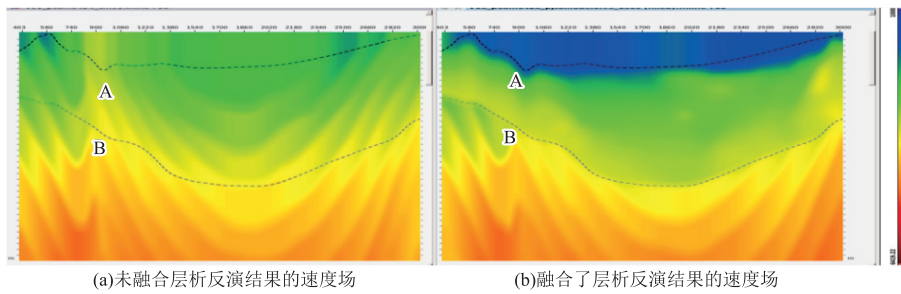


图 11 未融合层析反演结果的速度场和融合了层析反演结果的速度场

Fig. 11 The velocity field without fused tomographic inversion results and the velocity field with fused tomographic inversion results

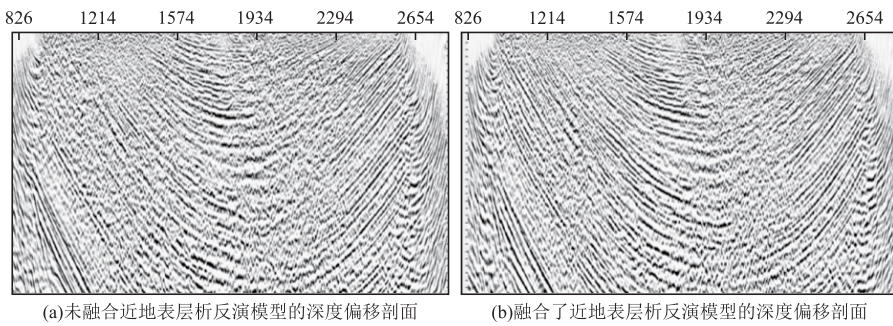


图 12 采用未融合与融合了近地表层析反演模型的深度偏移剖面

Fig. 12 Depth migration profiles using unmerged and fused near surface tomographic inversion models

采用上述两种速度场进行叠前深度偏移, 偏移剖面对比如图 12 所示。其中, 图 12(a) 是采用未融合近地表层析反演模型的深度偏移剖面, 图 12(b) 是融合了近地表层析反演模型的深度偏移剖面。融合表层模型后, 深度偏移剖面成像效果更好, 连续性明显提升, 说明高精度的初至层析反演模型有利于高精度的叠前深度偏移成像处理。

3 结论

ZQX 区块水—陆混采地震工区高精度表层速

度建模的实践探索, 有三点认识:

- 1) 针对地震混合采集工区, 保持初至时间匹配十分重要, 是高精度表层建模与静校正量计算的基础。
- 2) 结合已知条件和地质认识, 将先验信息作为约束条件应用于表层速度建模, 可建立更高精度的近地表速度模型。
- 3) 利用高精度近地表速度模型可提升浅表层反射空白区深偏速度模型精度, 提升深偏成果质量。

参考文献:

- [1] 秦宁,李振春,杨晓东,等.自动拾取的成像空间域走时层析速度反演[J].石油地球物理勘探,2012,47(3):392—398.
QIN N, LI Z C, YANG X D, et al. Image domain travel-time tomography velocity inversion based on automatic picking [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 392—398. (In Chinese)
- [2] 孙福利,王真理,郝天珧,等.南海南部深部结构的复杂构造地震成像[J].地球物理学报,2011,54(12):3210—3216.
SUN F L, WANG Z L, HAO T Y, et al. Seismic imaging of complicated deep structures in southern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3210—3216. (In Chinese)
- [3] 桑运云,李振春,张凯.抛物旅行时插值最短路径射线追踪[J].石油地球物理勘探,2013,48(3):403—409.
SANG Y Y, LI Z C, ZHANG K. Shortest path ray tracing based on parabolic traveltimes interpolation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(3): 403—409. (In Chinese)
- [4] 赵玲芝,谷跃民,张建中.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. Near-surface model building with multi-discipline information fusion [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(1): 34—41. (In Chinese)
- [5] 金昌昆,王延光,尚新民,等.微测井与方位加权插值精细近地表速度建模技术[J].石油地球物理勘探,2020,55(2):257—265.
JIN C K, WANG Y G, SHANG X M, et al. Near-surface velocity modeling based on micro-log and azimuth-weighted interpolation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(2): 257—265. (In Chinese)
- [6] GELCHINSKY B, SHTIVELMAN V. Automatic picking of first arrivals and parameterization of traveltimes CURVES [J]. Geophysical Prospecting, 1983, 31(6): 915—928.
- [7] COPPENS F. First arrival picking on common-offset trace collections for automatic estimation of static corrections[J]. Geophysical P
- [8] CHEN Z L, STEWART R. Multi-window algorithm for detecting seismic first arrivals[A]. CSEG National Convention, 2005
- [9] SABBIONE J I, VELIS D. Automatic first-breaks picking: New strategies and algorithms [J]. Geophysics, 2010, 75(4): V67—V76.
- [10] 李辉,戴旭初,葛洪魁,等.基于互信息量的地震信号检测和初至提取方法[J].地球物理学报,2007,50(4):1190—1197.
LI H, DAI X C, GE H K, et al. Seismic signal detection and first arrival pickup based on mutual information[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(4): 1190—1197. (In Chinese)
- [11] 潘树林,高磊,周熙襄,等.基于单道边界检测和样条插值的初至波自动拾取[J].石油物探,2006,45(3):245—249.
PAN S L, GAO L, ZHOU X X, et al. Automatic method of first break picking based on edge detection and spline interpolation [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(3): 245—249. (In Chinese)
- [12] 任立刚,张光德,杨德宽,等.速度检波器与压电检波器相位差异分析及应用[J].地球物理学进展,2015,30(1):454—459.
REN L G, ZHANG G D, YANG D K, et al. Analysis and application of phase difference between velocity geophone and piezoelectric geophone [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 454—459. (In Chinese)

High-precision near-surface velocity modeling and application in complex mountainous water-land mixed seismic survey

QIN Long, WANG Chuan, ZHENG Duoming, LI Wenyan, XU Zhongbo

(Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oil field Company, Petro China, Korla 841000, China)

Abstract: The ZQX seismic work area has favorable petroleum geological conditions, but its near-surface is very complex with farmlands and villages, mountains, gobi gravel, reservoirs, etc. And for the first time, we adopted air gun excitation and streamer reception for seismic acquisition in the water area. In order to establish a high-precision velocity model for the water-land mixed seismic survey, we have proposed to pick a take-off point and double-constrained inversion with water and uphole. First, pick up the accurate first break peak time under different excitation and reception modes. Next, calculate the time difference from peak to jump using high signal to noise ratio channels. Finally, interpolation solves the transition time from peak to jump in low S/N trace. On this basis, a tomographic inversion method is adopted using water velocity hard constraint and uphole soft constraint and solved the problem of high-precision near-surface velocity modeling in the ZQX survey, which has resulted in a much better image.

Keywords: water-land mixed seismic acquisition; turning peak time to first-arrival time; double constraint; tomographic inversion; static correction