

# 基于沙漠区二维数据拟三维层析静校正 技术研究及应用

王豆豆, 高厚强, 刘燕峰, 葛中慧

(中石化石油物探技术研究院有限公司, 南京 211103)

**摘要:** 在高大沙丘工区进行二维地震勘探存在比较严重的静校正问题, 常规的二维测线近地表速度建模技术利用数据信息较少, 速度建模不准确, 尤其在测线交点处缺乏纵向信息, 会导致测线交点处成像效果较差和测线之间不能做到闭合, 严重影响低幅构造解释。拟三维层析静校正技术将研究区内所有二维线合并视为拟三维数据体, 进行拟三维层析反演得到一个三维近地表模型, 然后求取二维测线的静校正量。通过研究发现, 采用拟三维层析静校正的叠加剖面比单独层析静校正的成像好, 尤其是在观测系统变化比较大的位置(炮偏、弯线)。由于拟三维层析静校正能够做到全区统一浮动基准面, 因此可以保证各个交点有比较小的闭合差, 便于后期解释工作的开展。

**关键词:** 沙漠工区; 静校正; 拟三维层析静校正; 统一浮动基准面

**中图分类号:** P631.4

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2025.01.04

## 0 引言

在地震勘探中, 反射波时距曲线为标准双曲线的假设条件<sup>[1-2]</sup>有两点: 接收点和激发点处在同一水平面、近地表速度横向没有变化且与深层速度接近, 显然复杂近地表不满足以上两个假设, 这就会带来比较严重的静校正问题。复杂地表引起的静校正问题对地震采集和数据处理都有严重的影响, 由于静校正问题的存在, 造成反射波的时距曲线扭曲畸变, 对速度建模、叠加构造成像等后续处理影响极大<sup>[3]</sup>, 降低资料的垂向分辨率<sup>[4]</sup>。著名地球物理学家 C. H. Dix 教授<sup>[1]</sup>曾说过: “解决好静校正就等于解决了地震勘探中几乎一半的问题。”静校正处理的目的是探讨不同地表因素对地震波时距曲线的影响, 通过行之有效的技术, 消除近地表因素对时距曲线的影响, 使时距曲线满足动校正的双曲线方程<sup>[5]</sup>。

目前常用的基准面静校正方法: 模型法静校正<sup>[6]</sup>、高程静校正、折射层析静校正<sup>[6-8]</sup>、初至波层析静校正等<sup>[9-11]</sup>。模型法静校正受制于微测井的密度, 控制点较少, 不能准确地控制全工区的近地表低降速带的分布情况, 不能得到比较可靠的静校正量以解决静校正问题; 高程静校正不考虑低降速带的影响, 将炮检点校正到同一水平面上, 地表高程以上基准面高程以下填充为替换速度<sup>[12]</sup>, 高程静校正计算简单, 易于实现, 但是只适用近地表条件比较简单的区域, 目前高程静校正剖面常作为参考剖面; 基于折射理论的静校正需要满足近地表低降速带折射层比较稳定并且地震记录上能够拾取折射波, 然而复杂地表的折射层不稳定、折射波不易识别, 拾取比较困难, 同时建立速度模型也与折射层数有关系<sup>[13]</sup>, 这些因素影响了基于折射理论建立的近地表速度模型精度; 基于反射波理论发展起来的静校正方法主要应用的是反射波信息, 然而实际地震数据的反射波

收稿日期: 2023-10-18

基金项目: 中国石化科技部基金项目(P21071-1)

第一作者: 王豆豆(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震反演和信号处理研究, E-mail: wdd\_up@163.com。

信噪比低、能量弱,尤其是西北沙漠地区的资料,巨厚沙漠对地震波能量的吸收<sup>[14]</sup>,接收到的信号比较弱而且形态严重畸变,影响静校正问题的解决。上述静校正方法中都有它们的适用性条件,目前生产上应用比较广泛的是初至层析静校正,该方法能充分利用各类型波的初至信息,可以得到相对比较准确、稳定、符合射线理论的近地表速度模型;该方法能够进行小网格近地表速度建模<sup>[15]</sup>,可以得到比较复杂的、高分辨率的近地表速度模型,受限因素较少,适用性比较好;该方法对初始速度模型依赖性不强并且基于速度模型计算得到的静校正量更为稳定,可以比较好的解决长波长静校正问题<sup>[16]</sup>。

本论文的研究区在沙漠腹地,存在巨大沙丘、信噪比低、高程起伏大、地表条件复杂、观测系统变化大等问题,因此采用层析静校正的方法处理静校正问题<sup>[17-18]</sup>。然而常规的二维测线层析静校正处理流程中,分别对每条线单独进行反演、建立近地表速度模型、计算静校正量、计算生成浮动基准面,这样就会带来三个问题:①全区统一处理面的问题,常规二维测线单线层析静校正存在每条线的浮动基准面有差异,不能做到全区统一浮动基准面处理,影响处理效果;②测线之间存在闭合差的问题,不同测线施工因素差异,二维层析静校正方法的局限,在测线相交部位反演的地表模型不一致,不能解决相交测线的闭合问题,人工调整闭合差可能引起假构造;③二维宽线的层析静校正成像质量不好,二维宽线近地表初至折射波是在三维空间传播的,采用常规二维层析精校正的方法与实际情况不相符合。针对常规二维测线层析静校正存在的问题,在前人的研究基础上<sup>[19-22]</sup>,笔者研究和应用了基于沙漠工区的拟三维层析反演静校正(联合二维层析反演静校正),该方法全区统一近地表建模、统一数据库、统一高低频分离建立浮动基准面,很好地解决了全区统一浮动基准面的问题,同时层析反演时采用拟三维的层析反演算法,充分考虑观测系统变化处和测线交点处的横向信息,改善了观测系统变化处和交点处的成像。

## 1 拟三维层析静校正

静校正问题解决的好坏对处理成果影响很大,它直接影响地震资料的信噪比和垂直分辨率<sup>[4]</sup>。层析静校正就是在层析反演得到近地表速度模型后计算静校正量并在地震数据上进行应用的静校正方

法,因此层析静校正主要分两步:第一步层析反演得到近地表速度模型;第二步计算静校正量。常规二维线层析静校正处理是单条线进行反演和计算静校正量,利用每条线的静校正量进行高、低频量分解得到浮动基准面,该方法存在的问题是全区二维线的处理浮动基准面不统一,影响处理效果,尤其是交点处的静校正成像和闭合问题。针对常规二维层析静校正存在的问题,笔者研究并应用了拟三维层析静校正,新方法在测线的交点处由于运用了多个方向的信息得到的近地表速度模型更真实精确,也更适用于测线变观处。全区统一网格、近地表速度统一反演、静校正量统一求取,高、低频静校正量统一分离,形成全区统一浮动基准面,真正统一浮动基准面处理。

在本文中拟三维层析静校正技术主要包括以下 8 个步骤:

1) 初至波拾取质量直接决定层析质量,也是层析静校正的基础,在拾取过程中要识别出噪音,避免噪音的干扰,提高拾取初至的精度。

2) 修改二维测线的桩号使所有数据不存在重复的桩号,并将所有二维数据进行合并形成一个三维数据体。

3) 根据近地表调查结果建立初始速度模型的极浅层,极浅层之下的速度模型是随着深度增加而增加线性速度模型,并将模型离散化。

4) 利用 snell 定律射线追踪技术计算旅行时。地震波的初至时间是射线路径和介质慢度(速度倒数)的积分,可以表示为:

$$t(r_d, r_s) = \int_L S(x, z) dl \quad (1)$$

其中  $t$  为初至时间,  $r_d$  为检波点坐标,  $r_s$  为炮点坐标,  $L$  为地震波传播路径,  $S$  为地下介质的慢度函数。(1)式可以用矩阵的形式表达为:

$$AB = T \quad (2)$$

其中  $A$  为射线路径矩阵,与地下介质和偏移距有关,  $B$  是地下介质的慢度场,  $T$  为初至时间矩阵。

5) 计算初至时残差并在(2)式中引入初至时残差,可建立层析反演方程为:

$$A \Delta B = \Delta T \quad (3)$$

式中  $\Delta B$  是地下介质慢度场的更新量,  $\Delta T$  是初至时间与真实初至时间的残差。

6) 解层析反演方程(3)得到慢度更新量  $\Delta B$ ,更新速度模型。

7) 利用更新后的近地表速度计算炮点、检波点静校正量:

$$st(j) = -\frac{h_j}{v_j} + \frac{E_d - E_j + h_j}{v_0} \quad (4)$$

其中  $st(j)$  为第  $j$  个检波点或者炮点的静校正量,  $h_j$  为第  $j$  点位置处的低降速带厚度,  $v_j$  为第  $j$  点位置处的低降速带速度,  $E_d$  为处理基准面高程,  $E_j$  为第  $j$  个检波点或者炮点的高程,  $v_0$  为处理替换速度

8) 全区统一定义网格, 以二维主测线方向为 inline 方向, 以二维联络测线方向为 crossline 方向, 进行全区定义网格坐标, 并进行静校正量高低频分离<sup>[23]</sup>得到统一处理浮动面。

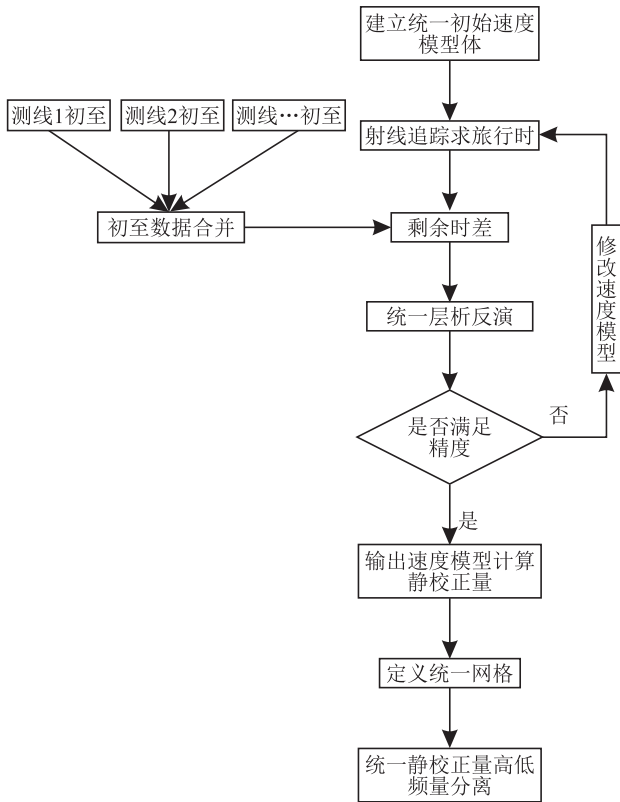


图 1 拟三维层析静校正流程图

Fig. 1 Flow chart of pseudo 3D tomostatics correction

## 2 实际数据应用分析

### 2.1 实际数据分析

研究区内的地表高程在 1 100 m~1 250 m 之间, 地势为东南高西北低, 工区内地表以沙丘为主, 主要是北东向和南北向的陇状沙丘, 部分蜂窝状或不规则的波浪状, 检波点高差在 10 m~130 m, 由于存在比较厚的低降速带及大沙丘, 造成比较严重的静校正问题, 图 2 为原始单炮记录, 从图中可以看到初至波扭曲比较严重, 静校正问题突出。

图 3 为本研究区的部分测线炮检点位置局部放

大图, 蓝色的为检波点, 红色的是炮点位置, 图中紫色区域为图 6 剖面所示位置、绿色区域为图 7 剖面所示位置、灰色区域为图 8 剖面所示位置。从整体看测线为二维测线, 但由于近地表条件复杂造成炮线与检波线并不是在同一条直线上, 并且分布的很不均匀, 因此采用拟三维层析静校正更符合观测系统的实际情况。

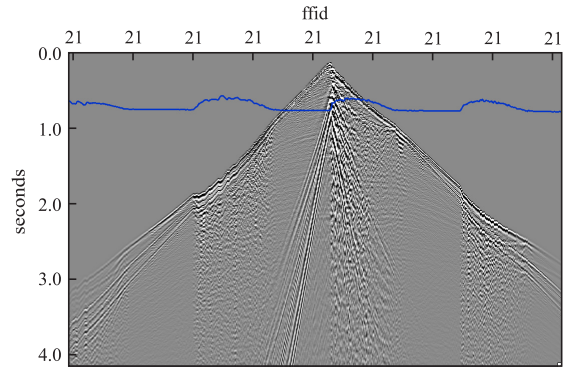


图 2 单炮记录

Fig. 2 Shot record

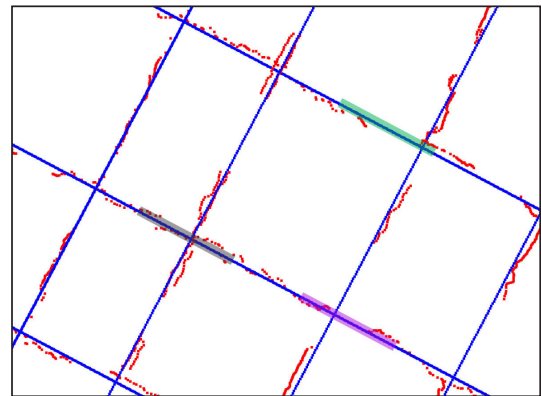


图 3 炮检点分布图

Fig. 3 Location distribution of shots and detections

### 2.2 实际数据应用效果分析

采用拟三维层析静校正方法计算的静校正量对实际数据进行静校正处理, 图 4(a)和图 4(b)、图 5(a)和图 5(b)为将静校正量应用到单炮数据进行对比。从图中可以看出通过拟三维层析静校正后单炮初至波扭曲形态得到明显改善, 在静校正问题比较严重区域的弱有效信号双曲线特征得到显现, 便于识别出低信噪比区的有效信号。

图 6(a)和图 6(b)、图 7(a)和图 7(b)为常规二维层析静校正和拟三维层析静校正的部分叠加剖面对比。从叠加剖面上能够看出, 拟三维层析静校正的效果相较于二维测线层析静校正的效果同相轴的

连续性和信噪比有明显改善,尤其是在变观处,消除了剖面串相位的现象,同相轴更加连续。图 8(a)和图 8(b)为测线的交点位置处的成像效果,从图中可

以明显看出,由于在交点处拟三维层析静校正应用了纵向的信息进行反演,最终的成像效果优于二维层析静校正,避免产生假断层。

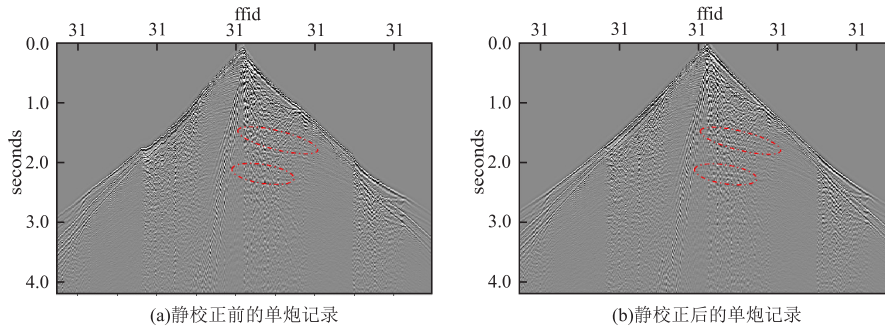


图 4 静校正前后的单炮记录  
Fig. 4 Shot record before and after static correction

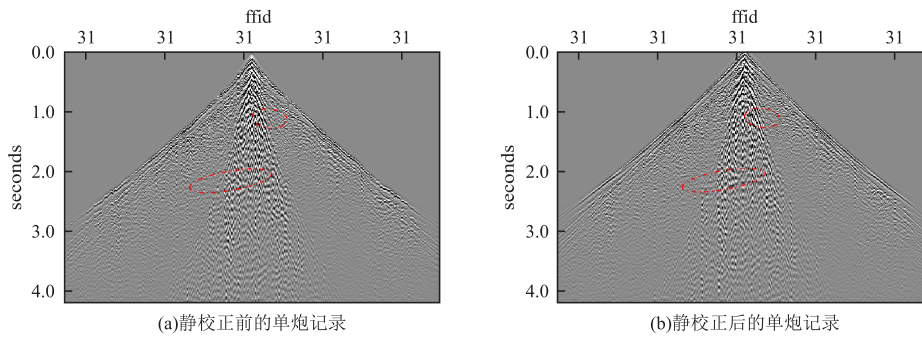


图 5 静校正前后的单炮记录  
Fig. 5 Shot record before and after static correction

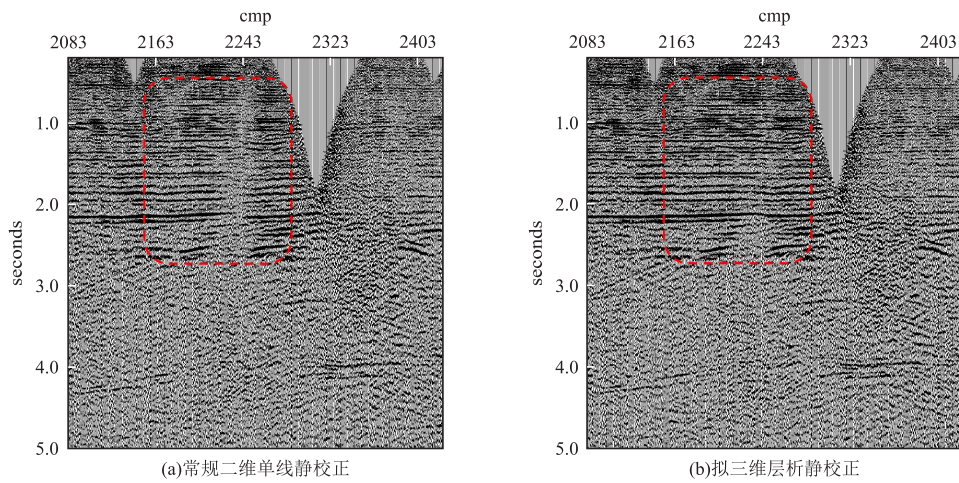


图 6 常规二维单线静校正和拟三维层析静校正

Fig. 6 Conventional two dimensional single line static correction and quasi-three-dimensional tomographic static correction

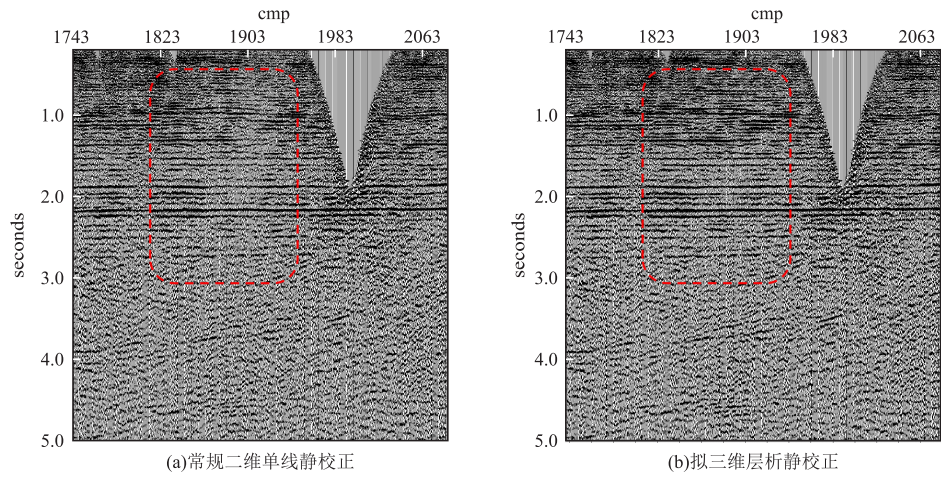


图 7 常规二维单线静校正和拟三维层析静校正

Fig. 7 Conventional two dimensional single line static correction and quasi-three-dimensional tomographic static correction

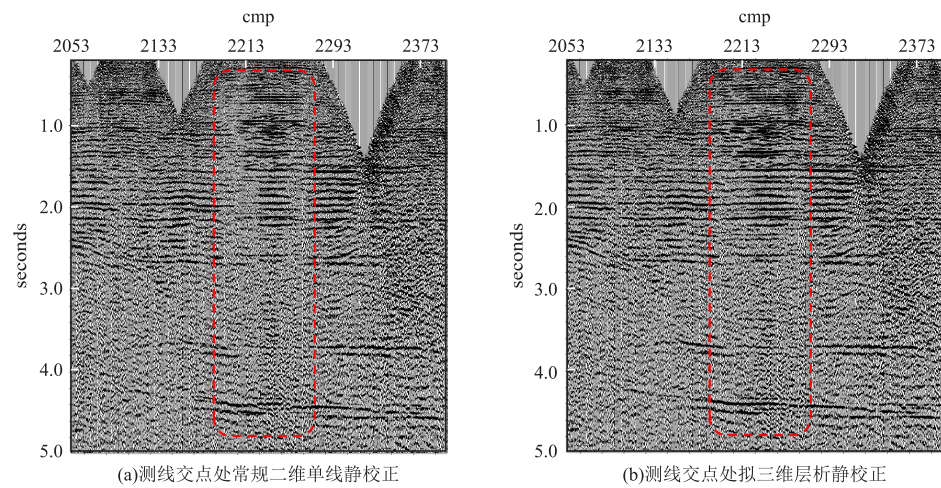


图 8 测线交点处常规二维单线静校正和拟三维层析静校正

Fig. 8 Conventional two-dimensional single line static correction and quasi-three dimensional tomographic static correction at intersection of survey lines

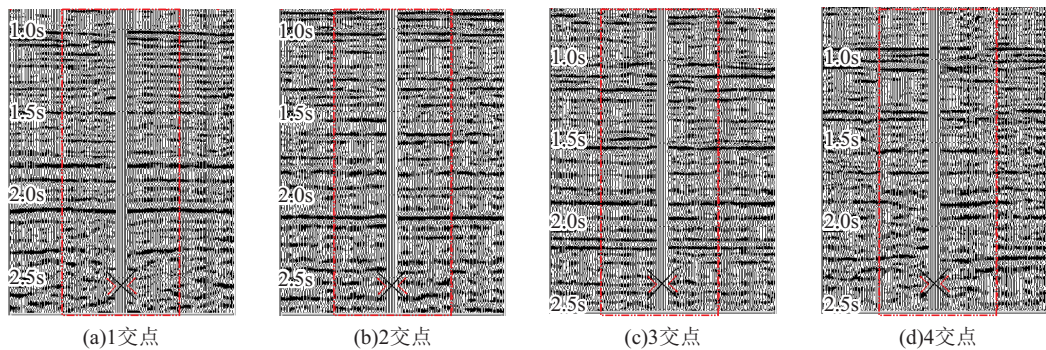


图 9 1-4 交点

Fig. 9 1-4 Intersection point

图 9 为部分交点的闭合情况展示,图中红色虚线为交点位置处,从图中可以看出测线的交点处同

相轴整体上闭合的,符合处理技术要求。由于在本研究区采用的是拟三维层析静校正、全区统一网格

确定浮动基准面,因此在交点处两条测线的浮动基准面是完全一致的,得到比较好的闭合剖面数据。

### 3 结论

1)由于近地表条件复杂造成观测系统变化处炮点与检波线不在一条直线上,拟三维层析静校正的层析反演射线追踪路径更符合观测系统的实际情况,建模精度更高,静校正量更准确避免出现假构造。

2)在测线交点处,拟三维层析静校正充分利用两个方向的初至信息进行近地表速度建模,更有利于解决交点处静校正问题,成像效果更好。

3)由于拟三维层析静校正是在测线交点处近地表速度模型一致,并进行全区统一浮动基准面处理,测线交点处闭合效果更好。

4)由于沙漠区近地表覆盖层类型比较单一,比较适用全区统一参数的拟三维层析静校正,如果研究区近地表覆盖层类型多样则需要进一步深入研究。层析静校正结果是基于数据驱动的,还需要近地表调查资料的约束才能更好地解决静校正问题。

#### 参考文献:

- [1] 熊翥. 地震数据数字处理应用技术[M]. 北京:石油工业出版社,1993.  
XIONG Z. Application technology of digital processing of seismic data [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993. (In Chinese)
- [2] 渥伊尔马滋. 地震数据处理[M]. 黄绪德,袁明德,等译. 北京:石油工业出版社,1993.  
OYILMAZ. Seismic Data Processing[M]. Translated by HUANG X D, YUAN M D, et al. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993. (In Chinese)
- [3] 杨晨莹,刘沛然,彭仁艳. 龙门山前带多信息约束层析静校正技术研究[J]. 石油物探,2021,60(1):102-109.  
YANG C Y, LIU P R, PENG R Y. Study on static correction technology of multi-information constrained chromatography in front of Longmen Mountain [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(1): 102-109. (In Chinese)
- [4] 杨文军,段云卿,姜伟才,等. 层析反演静校正[J]. 物探与化探,2005,29(1):41-43.  
YANG W J, DUAN Y Q, JIANG W C, et al. Static correction of tomographic inversion [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(1): 41-43. (In Chinese)
- [5] 王建立,王真理,敬朋贵,等. 川东北复杂山地三维静校正应用及实例分析[J]. 地球物理学进展,2010,25(2):555-561.  
WANG J L, WANG Z L, JING P G, et al. A statics solution in CBD hilly areas [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(2): 555-561. (In Chinese)
- [6] 林伯香,孙晶梅,徐颖,等. 几种常用静校正方法的讨论[J]. 石油物探,2006,45(4):367-372.  
LIN B X, SUN J M, XU Y, et al. Static correction approaches being frequently applied [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(4): 367-372. (In Chinese)
- [7] TANER M T, WAGNER D E, BAYSAL E, et al. A unified method for 2-D and 3-D refraction statics [J]. Geophysics, 1998, 63(1): 260-274.
- [8] 王海燕,高锐,马永生,等. 若尔盖盆地-西秦岭造山带结合部位深反射资料的静校正和去噪技术[J]. 地球物理学进展,2007,22(3):743-749.  
WANG H Y, GAO R, MA Y S, et al. Static correction and noise removal for deep seismic reflection data from the contact zone of the Zoigê and the west Qinling orogen [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(3): 743-749. (In Chinese)
- [9] 肖盈,居兴国,齐玉涛,等. YE地区低信噪比复杂地表资料的静校正处理技术[J]. 山东国土资源,2017,33(11):72-77.  
XIAO Y, JU X G, QI Y T, et al. Application of processing technique of static correction in complex surface structure with low S/N in YE area [J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(11): 72-77. (In Chinese)
- [10] 杨晶,徐维秀,宋建国. 基于大炮初至的近地表层析反演方法研究及应用[J]. 物探与化探,2011,35(4):499-504.  
YANG J, XU W X, SONG J G. The application of the near surface tomography inversion method based on the first arrival [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(4): 499-504. (In Chinese)
- [11] 尚新民. 时延地震处理中的近地表静校正技术[J]. 物探与化探,2014,38(1):162-166.  
SHANG X M. Static correction in time-lapse seismic data processing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(1): 162-166. (In Chinese)
- [12] 豆霜. 油气勘探中常用静校正方法探讨[J]. 地下水,2015,37(1):254-255.  
DOU S. Discussion on common static correction methods in oil and gas exploration [J]. Ground Water, 2015, 37(1): 254-255. (In Chinese)
- [13] 李浙龙. 层析静校正技术在复杂地表厚黄土区中的应用[J]. 煤矿开采,2017(1):15-17.  
LI X L. Application of tomographic static correction technique in complex surface with thick loess layer [J]. Coal Mining Technology, 2017(1): 15-17. (In Chinese)
- [14] 李鼎民. 塔里木盆地沙漠区地震采集技术与应用[D]. 成都:西南石油大学,2015.  
LI D M. Seismic acquisition technology and its application in desert area of Tarim basin [D]. Chengdu:

- Southwest Petroleum University, 2015. (In Chinese)
- [15] ZHU T F, CHEADLE S, PETRELLA A, et al. First-arrival tomography: Method and application [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000. Society of Exploration Geophysicists, 2000.
- [16] 秦亚玲, 王彦春, 王睿祥, 等. 一种适合沙漠地区的静校正方法[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1873-1879.
- QIN Y L, WANG Y C, WANG R X, et al. A method of static correction suitable to the desert area[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6): 1873-1879. (In Chinese)
- [17] 赵锐锐, 周强, 彭更新, 等. 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[J]. 物探化探计算技术, 2023, 45(6): 717-725.
- ZHAO R R, ZHOU Q, PENG G X, et al. Fine processing technology of seismic data of ultra-deep carbonate rocks in desert area of Tarim Basin[J]. Computing techniques for geophysical and geochemical exploration, 2023, 45(6): 717-725. (In Chinese)
- [18] 张向权, 刘之的, 刘永雷, 等. 巨厚黄土塬近地表正演模拟及约束层析反演[J]. 物探化探计算技术, 2022, 44(5): 9.
- ZHANG X Q, LIU Z D, LIU Y L, et al. Near-surface forward modeling and constrained tomography inversion of thick loess tableland[J]. Computing techniques for geophysical and geochemical exploration, 2022, 44(5): 9-17. (In Chinese)
- [19] 苏贵仕, 黄莉莉, 赵明秋. 伪三维层析反演静校正技术及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(1): 111-114.
- SU G S, HUANG L L, ZHAO M Q. Pseudo 3-D tomographic inversion static corrections and application [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(1): 111-114. (In Chinese)
- [20] 吕景峰, 周冰峰, 邸江伟. 库车复杂地表区伪三维表层建模与静校正技术[J]. 物探化探计算技术, 2015, 37(6): 773-777.
- LV J F, ZHOU B F, DI J W. Complex surface area pseudo 3D near-surface modeling and static correction techniques in Kuqa[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 37(6): 773-777. (In Chinese)
- [21] 杨文君, 王学刚, 伊鸿斌, 等. 拟三维层析反演技术在鄂尔多斯盆地黄土山地区研究与应用 [C]. 2018IFEDC 油气田勘探与开发国际会议.
- YANG W J, WANG X G, YI H B, et al. Research and application of simulated 3D tomographic inverse in the Loess Hills of Ordos Basin [C]. 2018 International Field Exploration and Development Conference. (In Chinese)
- [22] 周齐刚, 李斐, 黄研, 等. 黄土塬二维拟三维层析静校正技术研究与应用 [C]. 南京: SPG/SEG 国际地球物理会议, 2020.
- ZHOU Q G, LI F, HUANG Y, et al. Research and application of two-dimensional quasi-three-dimensional tomographic static correction technology in loess tableland [C]. Nanjing: SPG/SEG International Geophysical Conference, 2020. (In Chinese)
- [23] 林伯香, 孙晶梅, 刘起弘, 等. 关于浮动基准面概念的讨论 [J]. 石油物探, 2005, 44(1): 94-97.
- LIN B X, SUN J M, LIU Q H, et al. Discussion to the concept of the floating datum [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(1): 94-97. (In Chinese)

## Research and application of quasi-three-dimensional tomographic static correction technology based on two-dimensional data in the desert area

WANG Doudou, GAO Houqiang, LIU Yanfeng, GE Zhonghui  
(Sinopec Geophysical Research Institute Co., Ltd, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** A serious static correction problem exists in two-dimensional seismic exploration in the high-altitude sand dune work area. The conventional single-line near-surface velocity modeling techniques use limited data information, resulting in inaccurate velocity modeling, especially at the intersection points of measurement lines, which leads to poor imaging effect and inability to achieve closure between measurement lines, seriously affecting the interpretation of low amplitude structures. The pseudo-three-dimensional tomographic static correction technique combines all two-dimensional lines in the study area as pseudo-three-dimensional data volumes, performs pseudo-three-dimensional tomographic inversion to obtain a three-dimensional near-surface model, and then calculates the static correction amount of the two-dimensional measurement lines. Research has found that stacked profiles using pseudo-3D tomographic static correction perform better than those using separate tomographic static correction, especially in locations with significant changes in the observation system (shot deviation, curved lines). Because the quasi-three-dimensional tomographic static correction can genuinely achieve a unified floating reference plane for the entire area, it can ensure that each intersection point has a relatively small closure error, which is convenient for the later interpretation work.

**Keywords:** desert research area; static correction; quasi-three-dimensional tomographic static correction; unified floating datum plane