

引用格式:杨帆,蓝加达,孟庆利,等.井约束旅行时恒定层析成像技术在南川地区的应用[J].油气藏评价与开发,2021,11(4):514-520.
YANG Fan, LAN Jiada, MENG Qingli, et al. Application of well-constrained travel time preserving tomography technology in Nanchuan area[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(4): 514-520.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.04.006

井约束旅行时恒定层析成像技术在南川地区的应用

杨帆,蓝加达,孟庆利,薛野,李彦婧,赵苏城,俞若水,纪明,姜岸,任俊兴

(中国石化华东油气分公司勘探开发研究院,江苏南京210019)

摘要:川东南地区地形高差大,地表条件复杂,同时地层倾角大,地下条件复杂,精确成像难。该地区前期处理资料在页岩气勘探开发支撑中存在井震波组产状不一致、断层假象及井震预测误差的问题。针对该地区存在的问题,研究了井控各向异性叠前深度偏移方法,并应用于上述三维工区,通过提高速度模型精度从而提高复杂褶皱区的地震成像精度,对指导后期的井位部署及水平井导向,提高优质页岩钻遇率起到重要的作用。从各向同性和各向异性两个方面对偏移速度模型精度进行了精细刻画,通过高精度网格层析速度建模、井约束旅行时恒定层析成像技术(TPT)、TTI(具有倾斜对称轴的横向各向同性介质)各向异性成像技术的深入研究及实践,逐步健全了川东南地区地震精确成像的关键技术系列,提高了井震产状吻合度,缩小了井震深度预测误差,消除了地震剖面的断层假象,为后续页岩气勘探开发部署提供了重要技术支撑。

关键词:网格层析;各向异性;TPT;TTI各向异性成像;南川地区

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Application of well-constrained travel time preserving tomography technology in Nanchuan area

YANG Fan, LAN Jiada, MENG Qingli, XUE Ye, LI Yanjing, ZHAO Sucheng, YU Ruoshui, JI Ming, JIANG An, REN Junxing

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: The southeastern Sichuan region has large elevation differences, complex surface conditions, large stratum dip, and complex conditions underground, so that the accurate imaging is difficult. In the support of shale gas exploration and development, there are problems of inconsistent well seismic wave group occurrence, false faults and well seismic prediction errors for the pre-processed data in this area. Aiming at these problems, the well-control anisotropic pre-stack depth migration method is proposed and applied to the above three-dimensional work area. By improving the accuracy of the velocity model, the seismic imaging accuracy of the complex fold area is improved, and it plays an important role in guiding the later well position, and improving the high-quality shale drilling rate. In this paper, the accuracy of the migration velocity model is finely characterized from two aspects: isotropy and anisotropy. Through the deep research and practice of high-precision grid tomography velocity modeling, travel (TPT) and TTI (transverse isotropic media with axial inclined symmetry), the key technology series of seismic precision imaging in southeast Sichuan is gradually improved to enhance the well seismic yield consistency, reduce the well earthquake depth prediction error, eliminate the fault illusion of seismic profile, and provide important technical support for subsequent exploration and development of shale gas deployment.

Keywords: grid tomographic, anisotropy, TPT, TTI anisotropic imaging, Nanchuan area

收稿日期:2020-11-19。

第一作者简介:杨帆(1987—),男,助理研究员,从事物探地震资料处理及方法研究工作。地址:南京市建邺区江东中路375号金融城9号楼,邮政编码:210019。E-mail:672513900@qq.com

基金项目:国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061);中国石化科技部项目“常压页岩气地球物理评价技术研究”(P21087-3);中国石化华东油气分公司科研项目“阳春沟地区高陡构造成像研究”(HDF/KJ2021-24)。

主流的各向异性速度建模方法有各向异性参数迭代(VTI)、TTI等。THOMSEN^[1]提出了利用3个各向异性参数 ϵ 、 δ 、 γ 来表示各向异性速度;TSVANKIN^[2]提出了通过地震资料数据求解以上的Thomsen参数从而获取各向异性速度。常规的各向异性参数迭代思路是通过反复迭代更新速度模型、Delta(用来校正近、中偏移距,控制地层的垂向变化的参数)、Epsilon(控制地层的横向变化,用来校正道集远偏移距的参数),最后通过偏移验证参数的合理性。2019年通过该方法在南川地区的应用,参与约束井周边小范围数据得到了一定校正,成像归位准确度有所提高,但在波场复杂、低信噪比、无井控制等区域效果欠佳,难以达到由点到面的转变。

相较于主流的各向异性速度建模方法,井约束旅行时恒定层析成像技术处理流程最大不同点在于:①解矩阵方程过程中旅行时 Δt 保持不变,因此,无论如何更新速度模型或是各向异性参数,由于旅行时恒定,各向异性叠前深度偏移数据在转换到时间域之后,波组成像的位置对比各向同性数据无较大构造变化;②各向异性参数Delta更新采用基于速度模型驱动,同时每轮迭代后同步输出实时更新的构造模型能够三维立体质控各向异性参数的变化趋势,其优势在于实际生产中可以及时将钻井信息应用到处理中,并且在不需要偏移处理及层位解释的情况下,输出新的构造模型,极大提高了各向异性速度建模效率及精度,也能及时有效地指导水平井导向工作。

1 工区概况及存在问题

川东南地区南川三维工区通过多轮次的处理解释基本查清了构造形态。后续多家单位陆续实施的TTI各向异性目标处理TTI-RTM(逆时叠前深度偏移)、TTI-PSDM(叠前深度偏移)局部改善了构造复杂区的成像效果。由于该地区波场复杂,偏移速度存在多解性,前期采用的各向异性速度建模方法在约束井所在平台后续水平井钻探中能够获得较好的效果,提高了优质页岩的钻遇率^[3],但在远离约束井的其他平台效果欠佳,并且依然存在较大的井震矛盾。

通过研究井约束旅行时恒定层析成像技术,旨在提高全区模型精度及成像准确性,特别是在无井

控制范围可减少或者消除井震矛盾,为指导后期井位部署及水平井导向、提高优质页岩钻遇率提供支撑^[4]。

工区完钻页岩气水平井多口。密集开发井网资料揭示,前期地震处理成果时间剖面(图1)存在以下问题:

1) 产状差异

在剖面上的特点是:目的层波组反射能量强、连续性较好,但是波组产状与水平井反馈的地层倾向相反,局部出现上凸或下凹形态。

2) 解释深度预测存在误差

在剖面上的特点是:目的层波组连续,但解释深度预测层位与实钻井轨迹存在一定的误差。

3) 断层假象

在剖面上的特点是:反射波组连续性变差、振幅变弱、频率突变。

2 井约束旅行时恒定层析成像技术

2.1 各向同性速度建模

为实现精确成像,并为后续的各向异性速度建模奠定基础,需要建立较高精度的深度域速度模型。首先,在各向同性深度域速度建模上采用多属性约束网格层析速度建模方法,将波组连续性、地层构造倾角、方位角等多种属性加入到速度模型的更新中,通过网格层析速度反演不断迭代调整,提高速度模型的反演精度,提高地震波组的成像质量^[5-6]。

深度域速度模型建立包括以下过程:

- 1) 初始速度模型建立;
- 2) 网格层析速度模型更新;
- 3) 模型层析速度模型更新。

区内速度纵向变化剧烈,为更好地开展下一步各向异性速度建模工作,在网格层析数据基础上利用解释层位信息进行模型层析速度建模方法研究^[7],

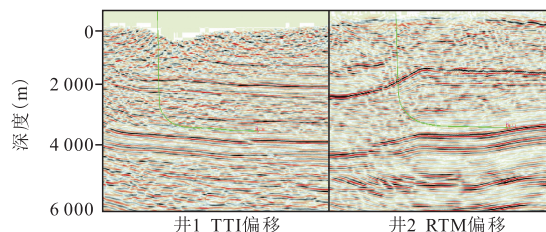


图1 井轨迹地震剖面

Fig. 1 Seismic section of well trajectory

目的是继续提高速度模型精度,勾画出速度模型沿层展布的趋势。速度反演过程同样遵循由浅至深逐层反演的思路,将地质认识融入模型优化的过程中^[8]。

反演更新后的速度模型横向上与构造形态基本吻合,纵向上速度的变化趋势与地层层速度变化基本一致,最终速度模型在空间变化与地质规律上更加吻合(图2)。更新后,各向同性速度模型及构造层位为后续各向异性建模提供了基础数据。

2.2 各向异性速度建模

2.2.1 井约束旅行时恒定层析成像技术(TPT)

1) 方法原理

各向同性速度建模方法对地下介质的认识较为简单,然而实际复杂构造的地下各向异性介质较为复杂,地震波向不同方向传播速度并不都是常数,CRP(共反射点道集)道集近偏移距成像较好,但远偏移距成像差。因此,需要进行各向异性介质速度建模^[9]。

在此次地震勘探中,采集偏移距较大。因此,各向异性的表现也变得尤为明显。CRP道集在近偏移距存在深度误差,远偏移距波组杂乱,同相轴无法被拉平。

该次井约束旅行时恒定层析成像技术采用射线追踪方法,充分考虑到速度的横向变化,采用全局优化方式进行多轮次层析成像迭代。该方法更新网格在水平方向上是规则的,在垂直尺寸上是不规则的。更新网格点在平面上位于构造模型上(图3)。

旅行时沿射线路径传播的时间误差与介质参数(速度、各向异性参数)扰动线性相关,相关公式如下:

$$\overline{\Delta t} = A_v \overline{\Delta v} + A_\delta \overline{\Delta \delta} + A_\epsilon \overline{\Delta \epsilon} + A_z \overline{\Delta z} \quad (1)$$

式中: $\overline{\Delta t}$ 为旅行时, s; A_v 为速度矩阵, m/s; $\overline{\Delta v}$ 为速度的路径, s; A_δ 为各向异性参数 δ 矩阵, m/s; $\overline{\Delta \delta}$ 为

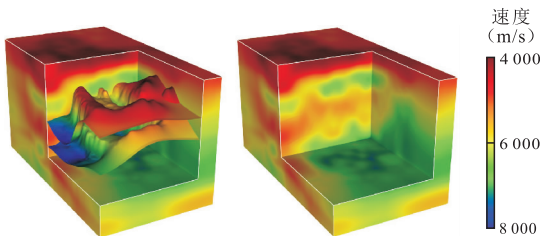


图2 三维深度域3D速度模型

Fig. 2 3D velocity model of 3D depth domain

各向异性参数 δ 的路径, s; A_ϵ 为各向异性参数 ϵ 矩阵, m/s; $\overline{\Delta \epsilon}$ 为各向异性参数 ϵ 的路径, s; A_z 为深度误差矩阵, m/s; $\overline{\Delta z}$ 为深度误差的路径, s。

2) 基本流程

首先在各向同性深度域偏移成果数据上,利用井分层信息求取井震误差(Mistie);然后结合各向同性速度共同建立 pencil(调用速度、层位等各项参数的数据库),并通过旅行时恒定层析运算求解方程,获取各向异性参数及构造层位;重复上述流程反复迭代优化各向异性参数(图4)。

2.2.2 初始各向异性参数求取

1) 搜集井信息

井的数量直接决定了 Mistie 的精准度,前期处理由于井数据少且分布不均匀,一定程度影响了最终处理效果。该次研究共搜集目标区内 65 口水平井资料,11 口导眼井资料,主要分布于工区东部背斜形态构造高部位,少量分布于工区西部背斜形态构造高部位,向斜及靠近高陡部位井较少。其中东北部密集,其余地区稀疏,分布均匀度能够满足该次处理方法研究。

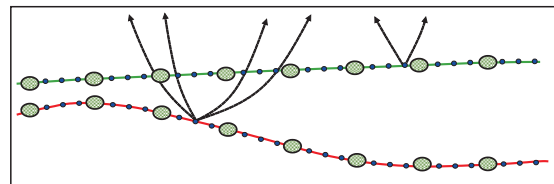


图3 井约束旅行时恒定层析成像技术更新网格

Fig. 3 Update grid of well-constrained travel time preserving tomography

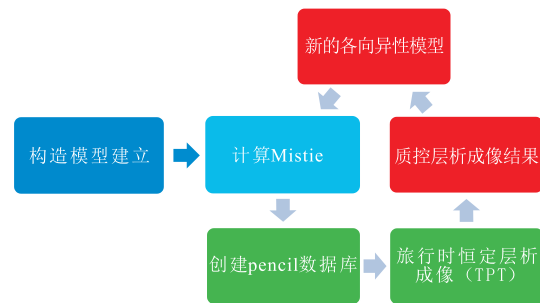


图4 井约束旅行时恒定层析成像技术流程

Fig. 4 Flow of well-constrained travel time preserving tomography

2) 各向异性参数求取

根据钻井分层信息及主要标志层解释层位求取井震误差(Mistie),然后与初始速度模型V0建立pencil数据库求取初始的Delta及Epsilon,求解该方程,同时获得新的速度模型V1及新的构造层位^[10]。

2.2.3 各向异性参数迭代(VTI)

1) Delta场迭代

Delta是各向异性参数中最先求取也是最难求准的关键参数,Delta的准确度直接影响了井震产状差异的大小。由于区内波场复杂,测试发现Delta更新量过大,容易造成构造畸变,引起更大的井震矛盾问题。井约束旅行时恒定层析成像技术在迭代Delta的过程中只需用到速度模型及井信息,采用无地震数据驱动快速直接输出更新后的构造层位。因此,在Delta更新中使用了小更新量配合多次迭代计算,保障参数求取的准确度。

迭代过程中采用更新后的深度域层位统计更新后的井震误差得到新的Mistie,并将新的速度模型V1和Delta、Epsilon这3个参数通过TPT进行反演更新,获得新的速度模型V2及新的构造层位^[11]。重复上述步骤由浅至深逐个标志层进行网格层析迭代,直至所有层位的Mistie趋近于零。

实际应用中,Delta值在构造相对宽缓地区数值较小,在主体构造两翼倾角较陡部位较大,显示该区域的井震误差相对较大,需要不断测试平滑参数,求准并控制好全区Delta值的变化,保证偏移剖面波组不畸变,获取最终的Delta场模型(图5)。

通过对Delta值进行迭代更新,Mistie的变化逐步趋于收敛。Mistie的平面图能够在一定程度上反映出全区的井震吻合情况,同时利用该图进行质控,确保Delta值渐进式地更新到位(图6)。每轮迭代输出新的偏移速度与Delta更新值匹配,为下一轮的迭代及偏移验证做好准备。

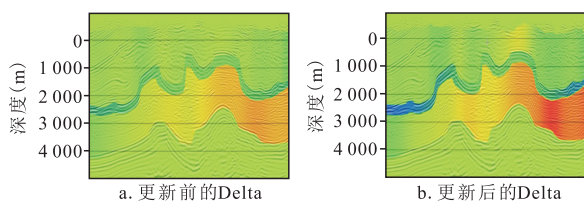


图5 Delta更新对比

Fig. 5 Comparison of Delta update

最后通过叠前偏移进行验证,剖面质控是最有效的质控方式,发现构造的畸变必须立刻返回检查,调整反演参数,控制反演趋势,确保偏移剖面的成像质量。当Delta值迭代更新结束后,输出的解释层位也同时完成更新。偏移剖面显示:偏移数据、层位和井数据吻合度提高,且目的层同相轴未发生畸变现象,Delta反演结束,可以继续进行Epsilon的迭代(图7)。

2) Epsilon场迭代

Delta迭代完成后再通过基于构造模型网格层析更新Epsilon场,继续提高偏移成像效果。处理中发现该区各向异性介质存在2个难点:①Delta更新后CMP道集局部信噪比明显下降,剩余速度的拾取难度增加;②由于构造位置在空间上出现了位移,远偏移距波组杂乱,各向异性参数更新难度提高。针对上述难点,在Epsilon的更新中:①首先对CRP道集进行了提高信噪比处理,确保剩余速度拾取的精度;②

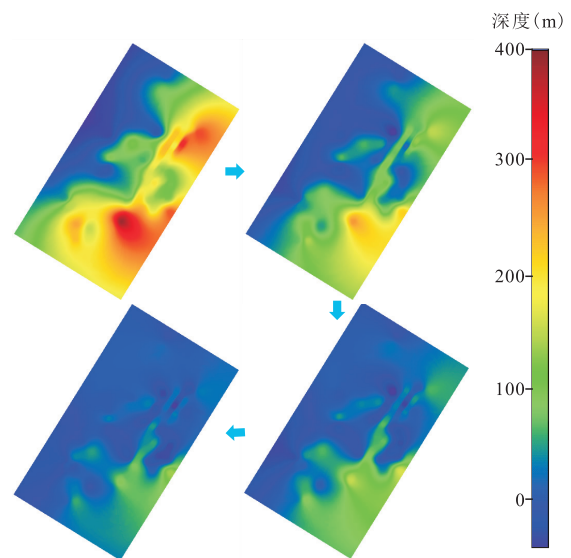


图6 Mistie更新对比

Fig. 6 Comparison of Mistie update

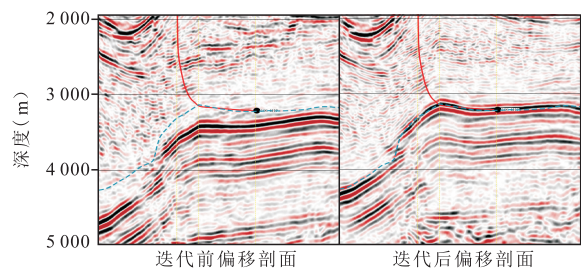


图7 Delta场更新前后沿水平井轨迹偏移剖面

Fig. 7 Offset profile along horizontal well trajectory before and after Delta field update

增加迭代次数,确保Epsilon更新到位;③利用机器自动识别配合人工修改对剩余速度进行评价工作,筛查不合理拾取点,并进行删除,提高拾取精度;④目标线滚动选取,采用错开线号进行目标偏移,并且逐步加密,最终网格点由原先的横纵向各5条线加密到各1条线,持续提高计算精度。

通过上述方法的应用及Epsilon参数的控制逐步拉平远偏移距道集信息。随着Epsilon的迭代更新,CRP道集的波组信噪比、连续性逐步得到提高,远偏移距弱有效信息得到校正^[12](图8)。

通过多轮次的层析成像迭代,速度模型、Delta场、Epsilon场更新量趋于收敛。更新后的各向异性速度模型通过与偏移剖面进行层叠对比(图9)显示:各向异性速度模型在横纵向刻画出速度变化趋势,偏移剖面成像质量与准确度得到提高。

2.2.4 TTI各向异性参数求取

通过VTI介质各向异性偏移后的数据精度得到提高,但在构造较陡或是构造变化剧烈部位成像精度仍有提高空间。VTI介质的地层是水平的,而TTI介质的地层能够倾斜,因此,TTI介质的特点适用于该地区。TTI与VTI介质的主要差异是增加了2个描述TTI介质的特有参数——地层的倾角(θ)和方位角(Φ)。因此,TTI介质一共有5个参数,分别是: Epsilon、Delta、各向异性速度、TTI介质地层的倾角和

方位角^[13-18],其中,倾角和方位角在计算过程中发挥约束作用。

利用pencil数据库将构造模型、速度模型及VTI参数进行融合以及平滑,并从VTI介质偏移数据体中提取出倾角及方位角属性,再通过三维立体显示可以看出:该工区地层构造较为复杂,局部甚至可能出现直立地层(图10),精确成像难度大。在VTI各向异性参数的基础上通过倾角体、方位角体2个参数的约束控制,求取的TTI介质参数能够继续提高成像精度^[19-23]。

通过深度偏移质控发现,相较于VTI介质,TTI介质偏移效果显示构造形态、目的层成像深度未发生较大变化,剖面上波组信噪比有一定提升。井轨迹剖面(图11)显示:在倾角陡、疑似断层位置附近,TTI介质效果更优,特别是在水平井末段,原先杂乱的波组特征得到改善,同相轴的连续性提升,最终实现井、地震、构造的吻合,更准确地展示地质细节。

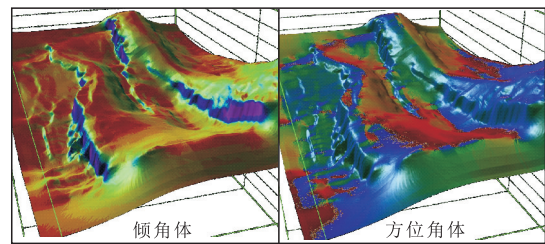


图10 TTI介质:倾角体、方位角体
Fig. 10 TTI medium: obliquity and azimuth

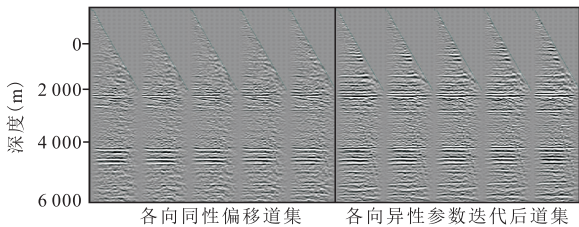


图8 Epsilon场迭代更新前后CRP道集
Fig. 8 CRP gathers before and after iterative update of Epsilon field

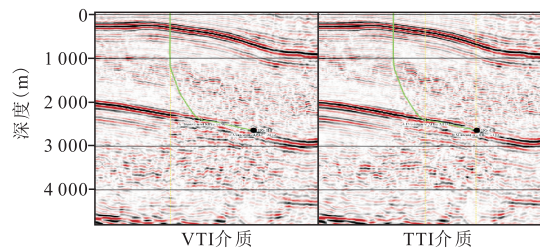


图11 水平井方向偏移剖面
Fig. 11 Direction offset profile of horizontal wells

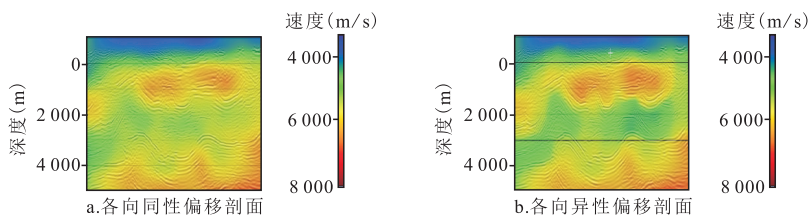


图9 各向同性、各向异性偏移速度模型与偏移剖面叠合
Fig. 9 Superimposed display of isotropic and anisotropic migration velocity model and migration profile

3 效果分析

该次处理最终获得了较高品质的地震成果资料。成果剖面(图12)整体信噪比、分辨率较高,构造特征清晰,断点明确。

各向异性成果偏移剖面三维叠合显示,井控旅行时恒定层析成像技术的应用极大的提高了速度模型精度,配合采用TTI各向异性成像技术提高了偏移成像效果,最终实现了井、地震、构造的吻合(图13)。

通过引入网格层析速度建模技术、井约束旅行时恒定层析成像技术、TTI各向异性成像技术等多项前沿技术,不仅解决了约束井的问题,同时指导了后期的井位部署及水平井钻探导向。通过与实钻井轨迹进行叠合显示,并与前期处理资料进行对比发现,成果地震资料在深度域的产状与参与约束水平井的轨迹更加吻合,构造成像的准确性得到提高,井震误差小于1%(图14)。

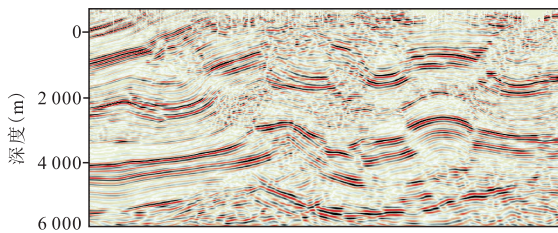


图12 TTI各向异性叠前深度偏移剖面

Fig. 12 Prestack depth migration profile of TTI anisotropic

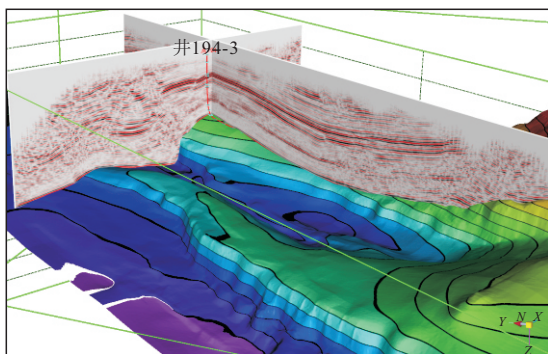


图13 井轨迹与各向异性偏移剖面、 O_{3w} (奥陶系五峰组)层位叠合显示

Fig. 13 Superimposed display of well trajectory, anisotropic migration profile and O_{3w} layer

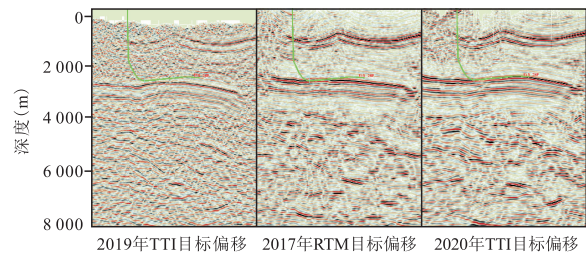


图14 井3(验证井)沿水平井方向偏移剖面

Fig. 14 Well-3(the verification well) offset profile along horizontal well

4 结论

1) 按照处理解释一体化的思路,通过构造解释建立的层位模型,进行全区模型层析速度反演建模(层控),提高了速度模型反演精度,使三维速度体更加符合地质规律,改善了复杂构造带低信噪比资料成像效果,是解决深度域地层波组产状与实际地层不一致问题的关键。

2) 通过井控各向异性叠前深度速度建模,最终获取一个与地下地质结构保持高度一致的准确速度模型(井控),有效提高了构造成像准确性。通过与水平井钻井轨迹对比,处理成果数据与井资料吻合较好,基本解决了井震深度预测误差、倾角产状差异及断层假象等问题。同时,该方法能够快速随钻更新层位信息,从而指导后期的井位部署及水平井轨迹导向,提高了水平井优质页岩钻遇率。

3) 使用井约束旅行时恒定层析成像技术以及TTI各向异性成像技术,是实现复杂构造带高精度地震成像的关键,成果剖面显示地震波组在保证一定信噪比、连续性的基础上真实反映了地下构造的形态,有效解决了前期资料存在的各类问题,为南川页岩气勘探开发提供了更准确的三维地震数据体。

参考文献

- [1] THOMSEN L. Weak slastic anisotropy[J]. Geophysics, 1986, 51: 1954-1966.
- [2] TSVANKIN T. Nonhyperbolic reflecton moveout in anisotropic media[J]. Geophysics, 1994, 59: 1290-1304.
- [3] 李录明,罗省贤,赵波. 初至波表层模型层析反演[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(5): 559-564.
LI Luming, LUO Xingxian, ZHAO Bo. Tomographic inversion of first break in surface model[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2000, 35(5): 559-564.
- [4] 王成彬. TTI各向异性逆时偏移技术及应用[J]. 石油物探, 2017, 56(4): 534-542.

- WANG Xianbin. Anisotropic reverse time migration technique in TTI media and its application[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017, 56(4): 534-542.
- [5] 李慧,成德安,金婧. 网格层析成像速度建模方法与应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(S1): 12-16.
- LI Hui, CHENG Dean, JIN Jing. Velocity model building based on grid tomography[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2013, 48(S1): 12-16.
- [6] 黄兆辉,刘洪雷,唐必锐,等. 高陡构造地区勘探失误分析及速度建模改进方法——以云安10井为例[J]. *石油物探*, 2008, 47(3): 301-305.
- HUANG Zhaohui, LIU Honglei, TANG Birui, et al. Prospecting defect analysis and improving technology for velocity modeling in high-steep structure area: case study of Yun'an10 well[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2008, 47(3): 301-305.
- [7] 何希鹏,何贵松,高玉巧,等. 渝东南盆缘转换带常压页岩气地质特征及富集高产规律[J]. *天然气工业*, 2018, 38(12): 1-14.
- HE Xipeng, HE Guisong, GAO Yuqiao, et al. Geological characteristics and enrichment laws of normal-pressure shale gas in the basin-margin transition zone of SE Chongqing[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(12): 1-14.
- [8] 马德堂,朱光明. 横向各向同性介质中的初至波旅行时计算[J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(1): 26-31.
- Ma Detang, Zhu Guangming. Computation of traveltimes of seismic first breaks in transversely isotropic medium[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2006, 41(1): 26-31.
- [9] 李源,刘伟,刘微,等. 各向异性全速度建模技术在山地地震成像中的应用[J]. *石油物探*, 2015, 54(2): 157-164.
- LI Yuan, LIU Wei, LIU Wei, et al. Application of anisotropic full velocity modeling in the mountainous seismic imaging[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2015, 54(2): 157-164.
- [10] 白海军,孙赞东,王学军. 基于波前构建法的TTI介质射线追踪[J]. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(S1): 1-6.
- BAI Haijun, SUN Zandong, WANG Xuejun. Raytracing in TTI media using wavefront construction[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2011, 46(S1): 1-6.
- [11] 周巍,王鹏燕,杨勤勇,等. 各向异性克希霍夫叠前深度偏移[J]. *石油物探*, 2012, 51(5): 476-485.
- ZHOU Wei, WANG Pengyan, YANG Qinyong, et al. Research on Anisotropic Kirchhoff pre-stack depth migration[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2012, 51(5): 476-485.
- [12] 裴云龙,王立歆,邬达理,等. 井控各向异性速度建模技术在YKL地区的应用[J]. *石油物探*, 2017, 56(3): 390-399.
- PEI Yunlong, WANG Lixin, WU Dali, et al. The application of well-controlled anisotropy velocity modeling in YKL region[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017, 56(3): 390-399.
- [13] 秦海旭,吴国忱. TTI介质弹性波随机边界逆时偏移的实现[J]. *石油物探*, 2014, 53(5): 570-578.
- QIN Haixu, WU Guochen. The implementation of elastic reverse time migration in TTI media based on random boundary[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2014, 53(5): 570-578.
- [14] 杨勤勇,郭恺,李博,等. 各向异性地震成像技术及其在页岩气勘探中的应用[J]. *石油物探*, 2019, 58(6): 882-889.
- YANG Qinyong, GUO Kai, LI Bo, et al. Application of TTI anisotropic seismic imaging in shale gas exploration[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(6): 882-889.
- [15] 查树贵,刘利平,廖朋,等. 水平井地震地质导向技术及其在涪陵页岩气田的应用[J]. *石油物探*, 2018, 57(3): 369-377.
- ZHA Shugui, LIU Liping, LIAO Peng, et al. Seismic geo-steering technology of horizontal well and its application in Fuling shale gas field[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(3): 369-377.
- [16] JONES I F. 3-D prestack depth migration and velocity model building [J]. *Geophysics*, 1998, 63(4): 1177-1183.
- [17] 刘玉柱,王光银,董良国,等. VTI介质多参数联合走时层析成像方法[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(10): 3402-3410.
- LIU Yuzhu, WANG Guangyin, DONG Liangguo, et al. Joint inversion of VTI parameters using nonlinear traveltime tomography[J]. *Chinese Journal Of Geophysics*, 2014, 57(10): 3402-3410.
- [18] 戴海涛,成剑冰,王红博,等. 复杂地表浅层速度建模技术研究及应用[J]. *石油物探*, 2020, 59(3): 336-343.
- DAI Haitao, CHENG Jianbing, WANG Hongbo, et al. A shallow velocity modeling technique for complex surfaces[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(3): 336-343.
- [19] 张在金,陈可洋,范兴才,等. 井控与构造约束条件下的网格层析速度建模技术及应用[J]. *石油物探*, 2020, 59(2): 208-217.
- ZHANG Zaijin, CHEN Keyang, FAN Xingcai, et al. Seismic wave velocity modelling through grid tomography inversion constrained by well logging and structural modeling[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(2): 208-217.
- [20] 姚晓龙,张永升,齐鹏,等. 面向复杂山前带的平滑地表TTI各向异性速度建模[J]. *石油物探*, 2020, 59(4): 539-550.
- YAO Xiaolong, ZHANG Yongsheng, QI Peng, et al. TTI anisotropic velocity modeling based on a smoothed surface for a piedmont zone[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(4): 539-550.
- [21] 聂法健. 基于地震层位约束的速度建模技术在普光气田的应用[J]. *非常规油气*, 2017, 4(2): 1-7.
- NIE Fajian. Application of velocity modeling technology based on seismic horizon constraint in Puguang Gas Field[J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2017, 4(2): 1-7.
- [22] HE Y, CAI J. Anisotropic tomography for TTI and VTI media [C]// Paper SEG- 2011- 3923 presented at the 2011 SEG Annual Meeting, San Antonio, Texas, September 2011.
- [23] ZHOU H B, PHAM D, GRAY S, et al. Tomographic velocity analysis in strong anisotropic TTI media[J]. *Expanded Abstracts of 74th Annual Internat SEG Mtg*, 2004: 2347-2351.

(编辑 李青)