

doi: 10.13745/j.esf.2016.05.019

柴达木盆地东部石炭系地震层速度求取方法的研究

曾庆猛¹, 刘成林^{1,*}, 张贵斌², 毛智慧³

1. 中国地质科学院 地质力学所, 北京 100081

2. 中海油田服务股份有限公司 测井中心, 河北 廊坊 065201

3. 北京中油瑞飞信息技术有限公司, 北京 100007

ZENG Qingmeng¹, LIU Chenglin^{1,*}, ZHANG Guibin², MAO Zhihui³

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

2. Well-Log Center of China Oilfield Services Limited, Langfang 065201, China

3. Beijing Richfit Information Company, Beijing 100007, China

ZENG Qingmeng, LIU Chenglin, ZHANG Guibin, et al. Calculation of Carboniferous seismic interval velocity in Eastern Qaidam Basin. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(5): 176-183

Abstract: Seismic interval velocity is an important parameter for the Carboniferous exploration in Eastern Qaidam Basin. Interval velocity can be applied to time-depth conversion, and to reflect lithological, structural and formation-pressure information. Seismic section is closely related to seismic velocity. Because of Carboniferous data shortage in Eastern Qaidam Basin, seismic velocity has long been a problem, and the velocity error in the time-depth conversion was large. To solve these problems, a new approach to calculate interval velocity was presented based on the previous work, thus improved the velocity accuracy and better understood the tectonic and geological characteristics in Eastern Qaidam Basin. Seismic stack velocity was converted into root mean square velocity based on the single well velocity analysis and multiple-picking of two-dimensional seismic stack velocity, and then was converted into interval velocity using constrained Dix inversion based on the single-well velocity trend model, at last the fitting curve of the average velocity field was done. Then, the seismic average velocity was corrected by well logging velocity as the control points, so as to establish a more reasonable interval velocity model. The new depth structure converted by the new interval velocity model is more reasonable than previous one. The new velocity model for calculating interval velocity is more accurate than the previous results, more in line with the single-well velocity trend and is consistent with the geological cognition.

Key words: Qaidam Basin; target process; stack velocity; trend model; Dix formula; velocity inversion; Carboniferous; velocity field

摘要:在柴达木盆地东部石炭系地震勘探过程中,地震层速度是一个重要的参数。层速度不仅仅可以应用于时深转换,还可以应用于反映地层岩性、构造和地层压力等方面的信息,地震剖面与地震速度也密切相关。柴达木盆地东部石炭系由于资料所限,速度问题一直未能很好地解决,时深转换过程中速度误差较大。因此,为了解决研究过程中速度误差较严重的问题,文章在前人工作基础上,探索性地提出了一种新的层速度求取方法,以提高柴达木盆地东部石炭系地震勘探过程中层速度的精度,从而更好的认识本区的构造和地质特征。通过对单井速度分析和二维地震叠加速度多次拾取,保证了速度谱拾取的精度,然后将地震叠加速度换算成均方根速度,进而利用基于单井速度趋势模型约束 Dix 反演层速度技术将均方根速度转换成层速度,拟合出全区的平均速度场。同时在拟合后,以井上测井速度为控制点,对平均速度进行了合理校正,从而建立比较合

收稿日期:2015-10-15;修回日期:2016-05-15

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“柴达木盆地古生代油气资源调查评价”(1212011120964)

作者简介:曾庆猛(1977—),男,博士后,主要从事地震方面研究。E-mail:441069661@qq.com

* 通讯作者简介:刘成林(1970—),男,博士,研究员,博士生导师。E-mail:851887838@qq.com

理的研究区层速度模型。利用新建立的层速度模型,对原来的构造重新进行时深转换,取得了较好的效果。新的改进 Dix 公式层速度求取方法求取的速度模型与前人成果相比较,利用了单井速度约束 Dix 公式进行速度反演,因而比前人成果更精确,更符合单井速度趋势,因而更符合地质认识规律。

关键词:柴达木盆地;目标处理;叠加速度;趋势模型;Dix 公式;速度反演;石炭系;速度场

中图分类号:P534.45 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2016)05-0176-08

0 引言

柴达木盆地石炭系具有油气资源前景,是我国油气勘探重要的接替领域^[1-2]。德令哈凹陷位于柴达木盆地东部南祁连和东昆仑造山带之间,区内石炭系广泛出露。整体来讲,柴达木盆地东部包括德令哈凹陷石炭系勘探程度较低,需要进一步加强研究工作^[3-5]。

地震波的速度是地震勘探中一个重要的参数,是地震波的运动学特点之一。地震剖面与地震速度的关系非常紧密。在通常地震资料解释中,速度不仅仅可以应用在计算供时深转换的层速度上,还可以应用于反映地层岩性、构造和地层压力等方面的信息。因此,速度问题是个很重大的问题^[6]。

地震层速度的求取是地震解释中的难题之一,特别是针对勘探区块,单井资料较少的情况下,如何求取层速度,前人做过很多这方面的工作。为了获取准确的层速度场,最常用确定速度的方法是利用在道集上按照动校正公式(道集中双曲线被拉平认为 CMP 道集叠加速度解释合理)求取的叠加速度来确定均方根速度。然后,再用 Dix 公式计算层速度。常规层速度求取的基本概念和公式由 Dix 正式提出,Dix 公式建立在水平层状介质与倾角变化幅度小的地层及速度横向上无变化的假设上^[7]。

Clapp 等^[8]、中国学者叶勇^[9]针对 Dix 公式假设,提出了改进的约束 Dix 反演层速度的求取方法。Zvi^[10]、Watanabe^[11]及 Taylor^[12]等在地震速度模型建立方面提出了新的方法和看法。陈志宏等^[13]提出了基于指数渐进边界速度趋势模型(EAB)约束 Dix 层速度反演的技术。

本文在前人工作基础上,就层速度求取问题,作了一定的探索性工作,在实际工作中进行了运用,取得了较好的效果。在柴达木盆地东部石炭系地震资料二次处理过程中,重新拾取了地震叠加速度谱,在此基础上,利用单井速度趋势模型约束 Dix 反演层速度技术这种新的改进 Dix 公式层速度求取方法求取了盆地东部石炭系的层速度,从而大大提高了时

间域到深度域构造转换过程中的精度。

本文主要利用德令哈凹陷现有的地震资料,结合地质、测井等资料,分析研究柴东地区速度场分布情况,最后得出本区合理速度场分布。

1 地质背景

柴达木盆地东部地区位于盆地敦格公路以东的广大地区,西起锡铁山—大柴旦,东至牦牛山、沙利克山,北接宗务隆山,南至昆仑山前,包括德令哈凹陷、锡铁山—牦牛山隆起及霍布逊凹陷 3 个一级构造单元^[14-16],有利勘探面积约 3×10^4 km²。发育古生界(石炭系)、中生界(侏罗系、白垩系)和新生界(古近系、新近系和第四系)^[17-18]。发育侏罗系、石炭系两套烃源岩,以及侏罗系、第三系多套成藏组合^[19-22]。

柴东地区发育盆缘祁连山和盆内欧龙布鲁克山、绿梁山—锡铁山—埃姆尼克山等三大山系。地表地质图显示,柴东地区断裂体系平面上沿山体呈带状分布,自西向东走向由 NW 向逐渐转为 NWW 向,均是由三排冲断构造组成。研究区西部构造带较窄、东部构造带较宽,总体呈现由北西向东南方向撒开的“帚状”,在“帚状”构造体系的西部叠加 3 条近东西向的走滑断裂(图 1)。这种结构面貌通过断层、褶皱、山体及地层的走向展布表现出来,主要断裂一般都发育有数条断层,这些断裂对柴东地区隆坳相间的格局具有重要控制作用^[23-24]。

柴东地区表层地震条件复杂,岩性变化较大。地表主要为戈壁区、雅丹地貌区、盐沼区等。地表岩性多变,戈壁、雅丹地貌区岩性主要以砾石砂土为主,夹有泥层;山地区表层岩性主要为粒度较粗的砂砾以及坚硬的老地层,表层岩性干燥、疏松,能量吸收衰减严重,不利于地震波的激发与接收。盐沼区激发岩性主要为细沙和胶泥互层,地震波激发条件好^[25-26]。根据完成的表层结构调查数据,本区低速层速度在 400~700 m/s,降速层速度在 750~1 200 m/s,高速层速度在 1 650~2 850 m/s。低降速带厚度沼泽区一般在 2.5~10 m,戈壁雅丹区在 20~60 m (图 2)。

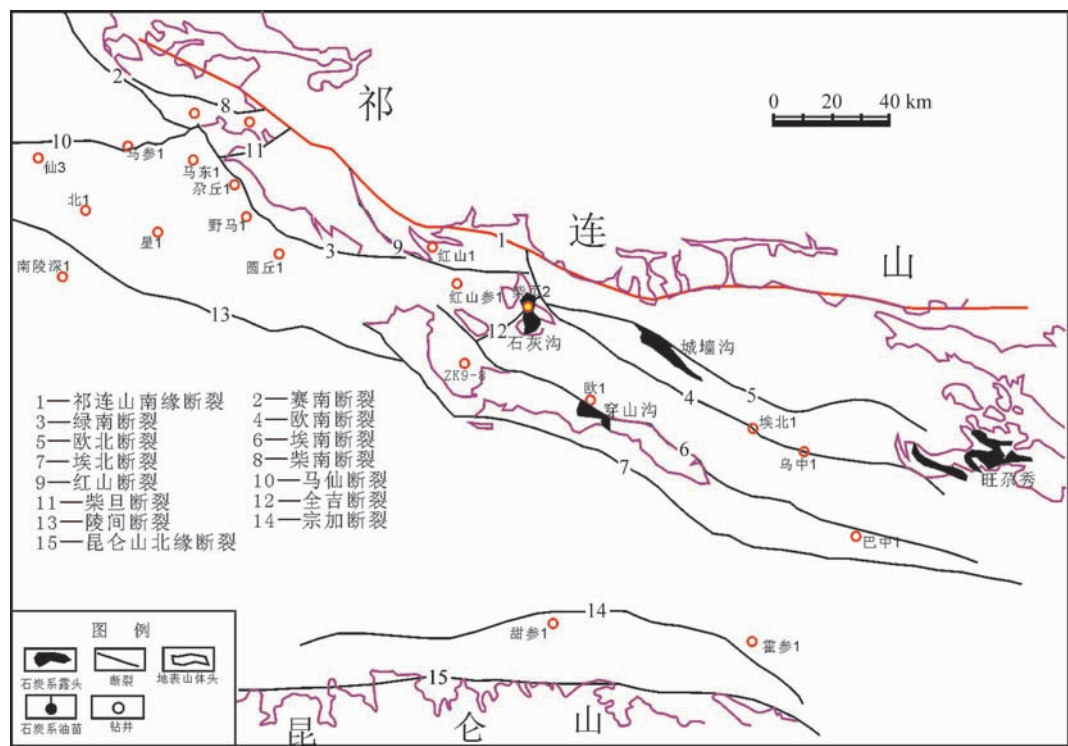


图 1 柴东地区断裂体系图
Fig. 1 Fault system in Eastern Qaidam Basin

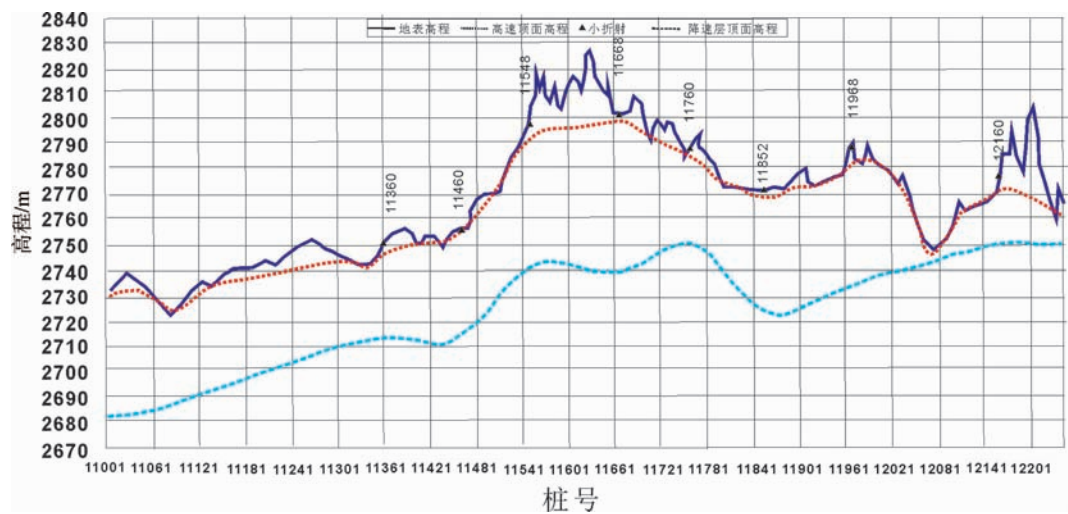


图 2 柴东地区北西-南东向 1220EE 测线低速带厚度图
Fig. 2 Low velocity layer thickness map across Line 1220EE (NW-SE) in Eastern Qaidam Basin

2 讨论

速度谱分析可以为层位对比和岩性的研究提供新的途径,地震剖面在时间域可以给出构造形态特征,而速度谱不仅可以提供叠加速度方面的信息,还可以根据反映地震波动力学特征的叠加速度能量团的收敛、发散以及强、弱提供构造方面的信息。通过

速度谱分析,可以获得叠加速度,进而求取均方根速度、层速度。这为层位对比、岩性研究提供了新的途径和资料。

2.1 层速度

沉积岩中速度分布规律的特点之一,是速度在剖面上的成层分布,即一个地层剖面从浅到深一般可以分为多个速度层,各层之间在波速上存在较明显差别。在地震勘探中把某一速度层的波速叫做这

一层的层速度。在地质条件有利的地区,通常用层速度来划分岩性、岩相,预测油气藏等地质问题。

为了简化研究,认为地层是平行的水平层状均匀介质,在这种情况下,地层层速度等于地层的平均速度。

2.2 由均方根速度计算层速度(平均速度)

层速度(平均速度)是一种对地震资料进行地质解释很有用的资料。通过地震测井和声波测井得到层速度(平均速度),特别是声速测井可以得到细致、精确的层速度(平均速度)资料。但是,测井资料毕竟还是很少的,如果能利用地震勘探的成果资料,换算出大量的层速度(平均速度)资料将是很有意义的。

利用叠加速度,经过倾角校正可得均方根速度。在地层水平情况下由均方根速度可以利用下面的公式(1)换算出层速度。

$$v_{\text{层}} = \sqrt{\frac{v_{\text{均}}^2 t_{02} - v_{\text{均}}^2 t_{01}}{t_{02} - t_{01}}} \quad (1)$$

Dix 公式建立在水平层状介质与倾角变化幅度小的地层及速度横向上无变化的假设上。

2.3 各种求取方法比较讨论

针对 Dix 公式中以速度的平方为自变量时,层速度与均方根速度的关系就由非线性关系方程变为线性方程。

陈志宏等^[13]提出了基于指数渐进边界速度趋势模型(EAB)约束 Dix 层速度反演技术。它假定层速度随深度的变化是指数形式的,并趋向于一个边界。时间域的指数渐进边界约束函数形式如下:

$$v_o(\exp(t)) = \frac{v_a v_{\infty}}{v_a + \Delta v \exp\left(-\frac{k_0 t v_{\infty}}{\Delta v}\right)} \quad (2)$$

式(2)中: v_a 为层速度反演起始界面的瞬时速度; k_0 为瞬时速度同样位置上的梯度变化率; v_{∞} 是深度无穷大上的趋势速度; Δv 为给定的瞬时速度范围。

在实践过程中,层速度随深度的变化并不一定是指数形式的,也有可能是其他形式的函数。

在柴达木盆地东部石炭系速度研究过程中,由于单井测井资料能够较为精确的反应地层层速度(平均速度)随深度变化趋势,因此,结合本研究区的地震叠加速度谱资料和单井测井资料,本次研究应用基于单井速度趋势模型约束 Dix 反演层速度技术进行计算。过程如下:(1)导入控制点、层位,并确定最小层厚;(2)在层位的控制和最小层厚的约束下,

按照等分模式划分小层并调整控制点以匹配小层;(3)利用单井速度约束 Dix 反演层速度方法将各控制点处的叠加速度转化为层速度;(4)对控制点的层速度(平均速度)值进行单井拟合校正;(5)插值,获得光滑的层速度体。

新的改进的 Dix 公式求取目的层速度采用单井速度趋势模型的约束 Dix 层速度反演技术,而不是指数渐进边界速度模型(EAB),因为层速度(平均速度)随深度的变化可以通过单井速度分析确定趋势,因而比 EAB 模型具有更高的精度。

新的改进的 Dix 公式时间域的约束函数的形式与指数渐进边界速度模型(EAB)不同,它不再是指数形式,而是一个函数:

$$F(v_o(t)) = \frac{v_a v_{\infty}}{v_a + \Delta v F\left(-\frac{k_0 t v_{\infty}}{\Delta v}\right)} \quad (3)$$

式(3)中: v_a 为层速度反演起始界面的瞬时速度; k_0 为瞬时速度同样位置上的梯度变化率; v_{∞} 是深度无穷大上的趋势速度; Δv 为给定的瞬时速度范围; F 为单井约束速度随深度变化函数。

新的改进的 Dix 公式层速度求取步骤为:(1)地震处理过程中,多种方式拾取速度谱,保证速度谱拾取的精度;(2)把拾取的叠加速度转换成均方根速度,便于下一步的计算;(3)利用单井测井资料,进行单井速度综合分析,得出速度随深度变化趋势,构建趋势函数;(4)构建层速度(平均速度)反演的网格;(5)利用获得的趋势函数,进行速度反演,可获得当前 CMP 点下,每个速度反演网格点处的层速度值;(6)再次利用单井测井速度为控制点,对速度反演成果进行校正;(7)进行速度平滑。

3 新方法的应用

3.1 速度谱拾取

地震资料解释的最终成果是构造成图,速度资料是精细解释工作的一个重要基础资料、其精度的高低决定着层位解释的可靠性和成果图件的精度。

速度分析过程中,主要采用模型层析法,这是利用射线传播理论,以地震波自激自收为切入点,在建立 t_0 及速度场空间地质模型的基础上,对曲面 X、Y 方向求导,得出折射点的出射角和反射点偏离入射点的空间偏移量,利用射线传播理论,求取各层的层速度和确定反射界面;解决了倾斜地层和速度倒转

等问题。利用模型层析法求取层速度,在计算出层速度和反射界面的同时,也计算出了反射点偏离入射点的水平距离,也就是空间偏移量。从而可以由反射界面和时间模型求出反射层之上的平均速度,即在已知第 $n-1$ 层的层速度和反射界面时,通过迭代求取第 n 层的层速度和确定第 n 个反射界面,最终建立工区的各反射层位控制的平均速度场。

在利用模型层析法建立速度场前,需要首先整理欧南凹陷新施工处理的速度谱资料。对原始速度数据完全不可信的或部分畸变的数据点进行剔除,对于数据点个别不可信的,进行数据平滑,使速度数据能较好地反映速度场的纵、横向变化规律,并且符合地质变化规律。最后将整理好的速度数据入库,建成可以运用的叠加速度谱对于信噪比较高的地区,提高速度分析精度的手段可以应用小面元技术,使速度谱能量团能真正的反映该位置地下速度信息。

利用滤波、增益、去噪等手段提高速度谱的质量和精度。对速度变化大的速度线进行细致的速度扫描分析达到最佳效果,常速扫描求取叠加速度的方法是将一定范围的 CMP 叠加结果按速度大小递增顺序排列起来,按时间对所需同相轴产生最佳叠加响应的原则选择速度,从常速叠加剖面中选出叠加速度。通过去噪、切除、增益等手段进一步提高速度谱质量。

在柴东地区共进行 5 次叠加速度分析。原始资

料加道头速度分析,用于球面扩散振幅补偿应用,速度分析 CMP 间隔 1 000 m;反褶积后速度分析,用于剩余静校正处理,速度分析 CMP 间隔 500 m;全区剩余静校正处理进行 3 次速度分析,速度分析 CMP 间隔 500 m。

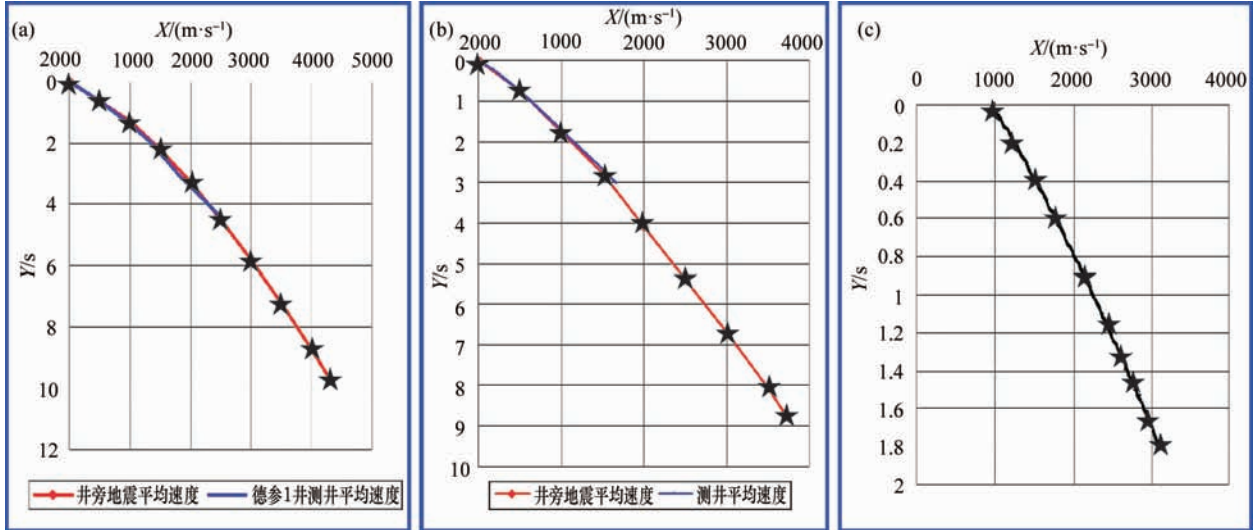
对构造变化大的地区进行速度点加密,使速度与地下构造更加吻合。构造复杂带,速度往往存在多解性,这就要求处理中与解释人员结合,了解地下的速度分布特点,结合本区速度场的整体变化趋势,判断构造走势,识别速度,保证速度的准确拾取。

3.2 新的改进的 Dix 公式求取层速度

速度是构造成图的基础,因此本次对速度资料予以了足够重视。首先从单井测井速度分析入手,拟合出井上测井层速度(平均速度)曲线,得到反射时间与层速度(平均速度)的函数关系,为求得全区综合层速度(平均速度)设立种子点(图 3)。

在单井速度分析的基础上,对地震速度谱进行合理解释,将叠加速度换算成均方根速度,进而利用单井速度模型约束 Dix 反演层速度方法转换成层速度(平均速度),以拟合出全区的层速度(平均速度)曲线(图 4)。在拟合过程中,以井上测井速度为控制点,对地震速度进行了合理校正。

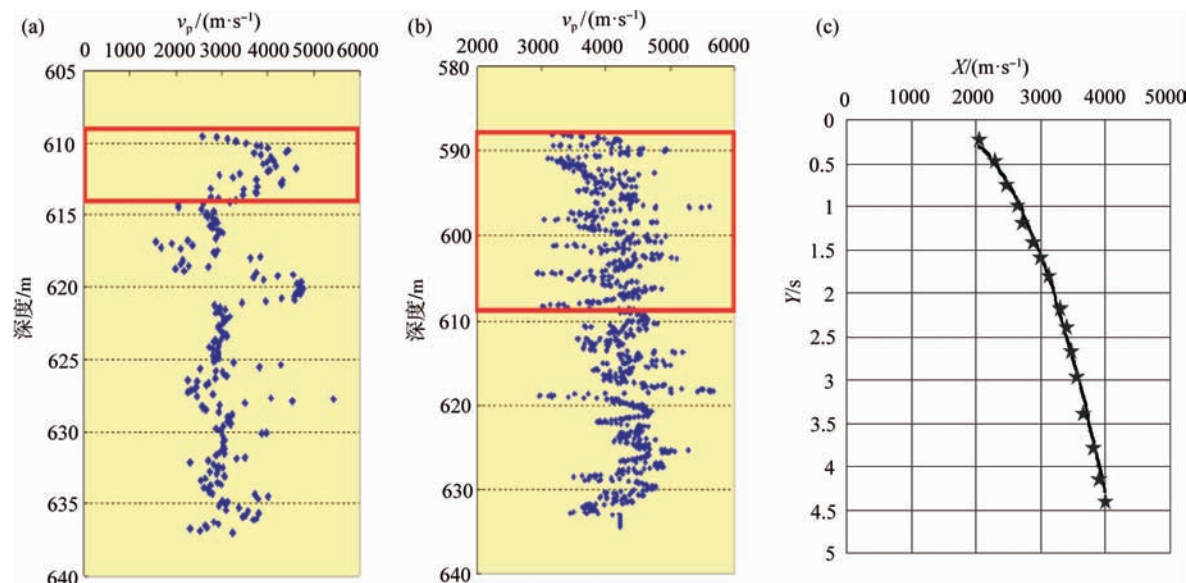
为了分析和掌握速度在平面上的变化规律,从全区层速度(平均速度)场中提取了石炭系顶界沿层平均速度,编制了速度平面图,并与前人成果进行了对比(图 5、图 6)。



a—德参 1 井测井平均速度与井旁地震平均速度曲线;b—德科 1 井测井平均速度与井旁地震平均速度曲线;c—霍参 1 井 VSP 测井平均速度曲线。

图 3 柴东地区测井平均速度与井旁道平均速度对比图

Fig. 3 Contrast map of log average velocity and near-well trace seismic average velocity



a—HB9 井测井平均速度曲线;b—HB14 井测井平均速度曲线;c—柴东地区综合平均速度曲线。

图 4 柴东地区单井平均速度和综合平均速度曲线

Fig. 4 Single well and synthetic average velocity curve in eastern Qaidam Basin

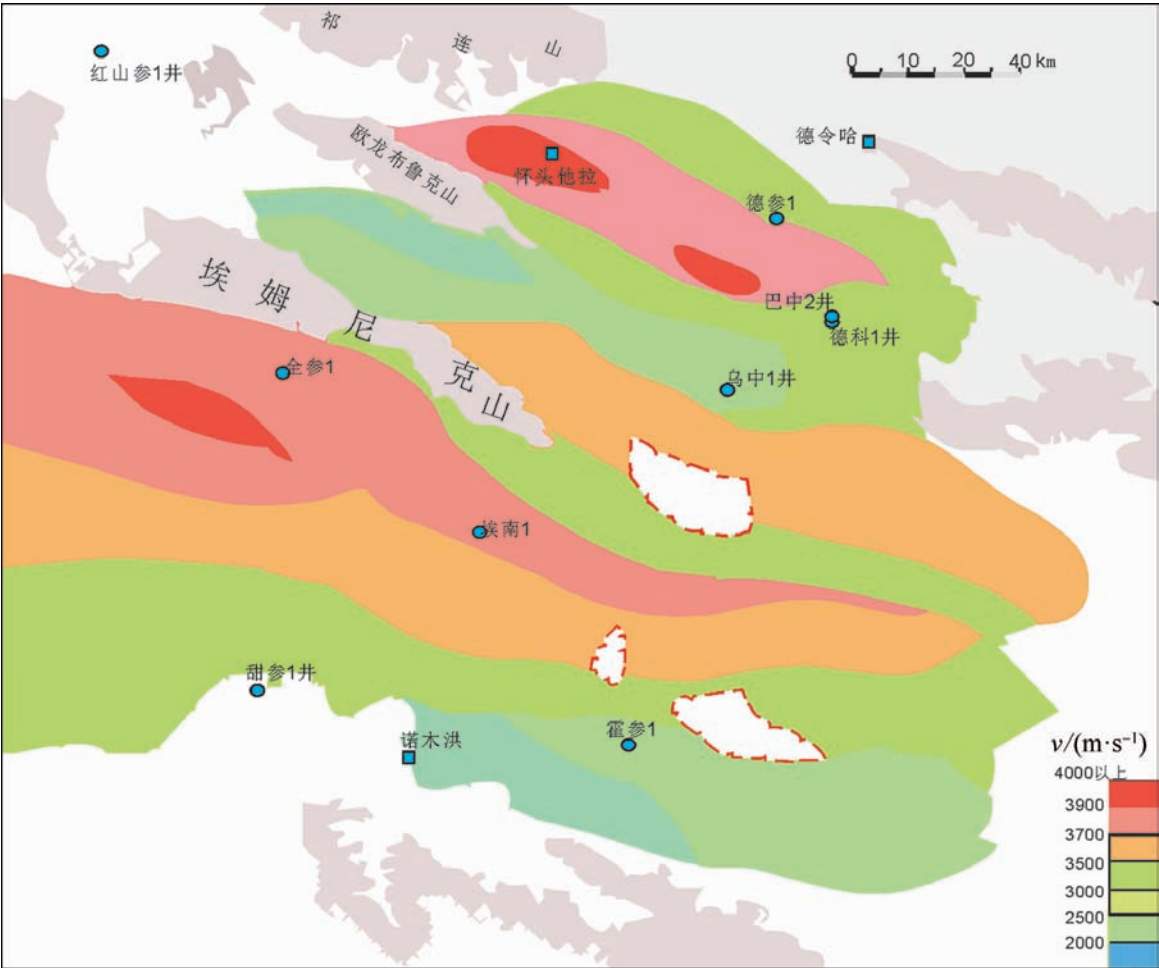


图 5 柴东地区石炭系顶界(T_M)沿层平均速度图(新)

Fig. 5 Mean velocity map(New) along Carboniferous top layer(T_M) in Eastern Qaidam Basin

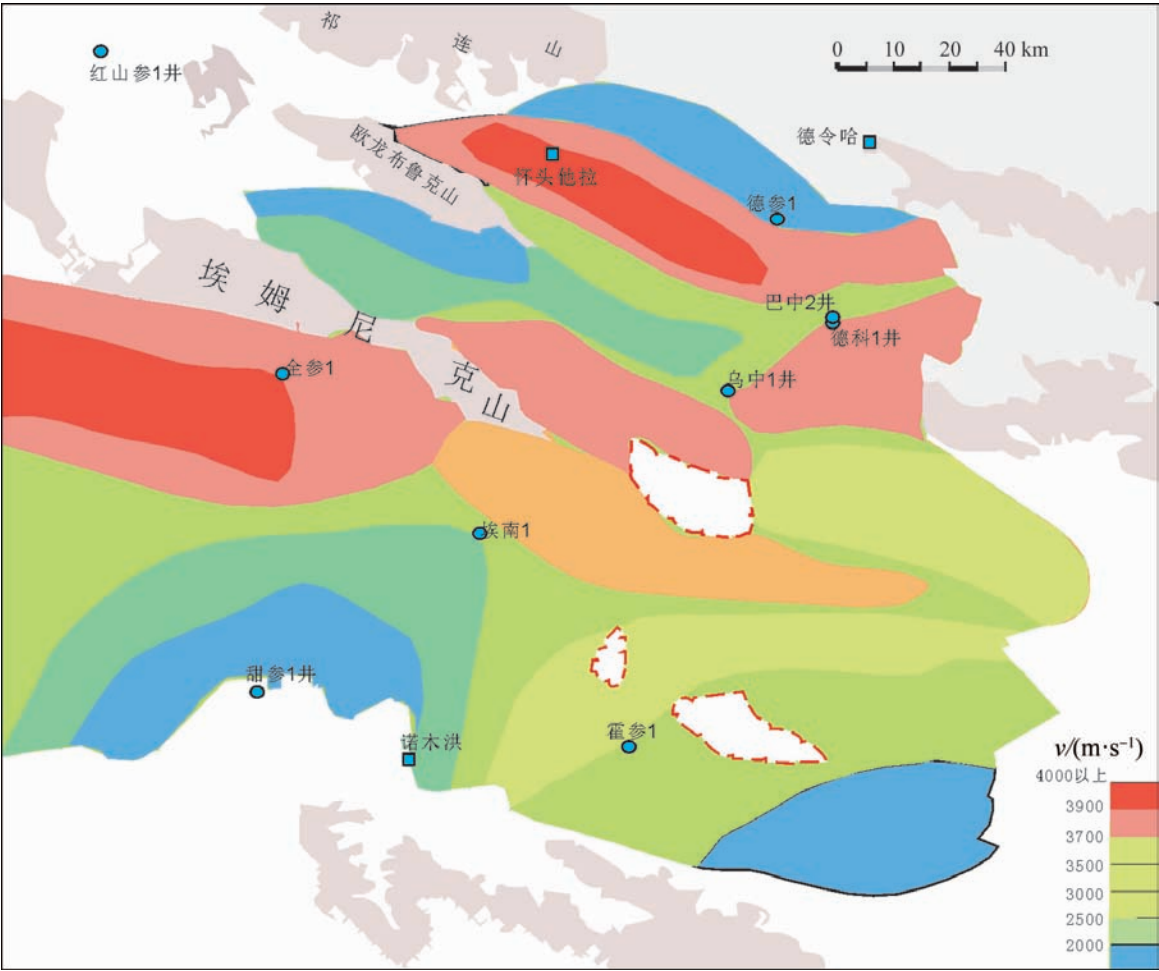


图 6 柴东地区石炭系顶界(T_M)沿层平均速度图(旧)
Fig. 6 Mean velocity map(Old) along Carboniferous top layer(T_M) in Eastern Qaidam Basin

分析得知,速度变化趋势与构造变化规律基本一致,反映出控制沿层平均速度的主要因素是地层埋深。平面上,欧龙布鲁克凸起一带地层倾角较大,速度变化较快;南部霍布逊坳陷地层形态相对简单,速度横向变化较为平缓。受地层埋深的影响,石炭系顶底沿层平均速度最大值主要集中在德令哈凹陷以及埃姆尼克山以南、北霍布逊湖以东,分别达到 3 900 m/s 与 4 000 m/s;而乌兰、宗家构造以及诺木洪北面斜坡地层抬升较高,埋藏较浅,速度最低,分别在 2 500 m/s 与 2 800 m/s 以下^[27-28]。

4 结论

在地震勘探过程中,地震速度的求取是一个非常重要的方面。地震速度不仅仅可以应用于将时间域构造图转换为深度域构造图,还可以应用于反映

地层岩性、构造等多方面的地层信息。柴达木盆地东部石炭系由于钻井、测井、VSP 等资料缺乏,速度问题一直困扰研究过程。为了解决研究过程中速度误差较严重的问题,本文在前人工作基础上,提出了一种新的层速度求取方法,提高了柴达木盆地东部石炭系地震勘探过程中层速度求取的精度。

在此研究过程中,采用新技术和新方法,利用地震叠加速度谱资料建立了速度模型,取得了比较好的成果,主要表现在如下几方面。

(1) 本文在前人工作基础上,就层速度求取问题,采用新的改进的 Dix 公式求取层速度。在求取过程中采用单井速度趋势模型约束 Dix 层速度反演技术,而不是指数渐进边界速度模型(EAB),因为层速度(平均速度)随深度的变化可以通过单井速度分析确定趋势,因而比 EAB 模型具有更高的精度。

(2) 采用单井速度趋势约束的方法反演地层速

度场,保证速度场在合理的范围内,确保了速度场的地质意义(因为单井确定的速度基本是可信的)。在单井速度分析的基础上,对地震速度谱进行合理解释,将叠加速度换算成均方根速度,进而利用单井速度趋势约束反演层速度方法转换成层速度(平均速度)。在此过程中,以井上测井速度为控制点,对地震速度进行了合理校正。

(3)通过对速度场的分布研究,对搞清柴达木盆地东部石炭系的构造、地质等方面的特征具有重大意义。通过多次速度反演和速度场分布的分析研究,我们可以得出速度变化趋势与构造变化规律基本一致。因此,搞清楚柴达木盆地东部石炭系层速度分布规律,对研究本区地层岩性、构造和地层压力等方面具有重大作用。

参考文献

- [1] 马寅生,尹成明,刘成林,等. 柴达木盆地石炭系油气资源调查评价进展[J]. 地球学报, 2012, 33(2): 135-144.
- [2] 汤良杰,金之钧,戴俊生,等. 柴达木盆地及相邻造山带区域断裂系统[J]. 地球科学, 2002, 27(6): 676-682.
- [3] 马金龙,李凤君,贾庆军. 柴达木盆地北部碰撞构造与盆地改造变形[J]. 石油实验地质, 2002, 24(4): 291-295.
- [4] 张守仁,曹代勇,戴俊生,等. 柴达木盆地北缘块断带的扭动构造与阿尔金构造体系的关系[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(3): 218-223.
- [5] 周炎如,李相博,袁剑英. 祁连—柴达木构造域盆地—造山带耦合构造体系[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(5): 387-390.
- [6] 尹成明,王财富,马寅生,等. 柴达木盆地石炭系地球物理特征及解释[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 1869-1876.
- [7] Dix C H. Seismic velocities from surface measurements[J]. Geophysics, 1955, 20(1): 68-77.
- [8] Clapp R, Sava P, Claerbout J F. Interval velocity estimation with a null space[J]. Stanford Exploration Project Report, 1998, 97(5): 147-156.
- [9] 叶勇. 三维约束 Dix 反演层速度方法及其应用研究[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(4): 443-446.
- [10] Zvi K. Constrained velocity inversion[J]. Geophysics: Journal of the Society of Exploration Geophysicists, 2005, 12(4): 2289-2292.
- [11] Watanabe T. A new method for calculating seismic velocities in rocks containing strongly dimensionally anisotropic mineral grains and its application to antigorite-bearing serpentinite mylonites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 391(6): 24-35.
- [12] Taylor R L. Seismic velocity modelling of the Carboneras Fault Zone, SE Spain[J]. Tectonophysics, 2015, 646(4): 20-35.
- [13] 陈志宏. 基于改进 Dix 公式层速度求取方法应用研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 30(12): 7840-7843.
- [14] 张建良,钟建华,李亚辉,等. 柴达木盆地东部石炭系石油地质条件及油气勘探前景[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2): 144-149, 153.
- [15] 商琳,戴俊生,王彤达,等. 基于新钻井对柴达木盆地东部石炭系分布及控制因素的再认识[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 25-31.
- [16] 葛岩,刘成林,谢英刚,等. 柴达木盆地石炭系油气勘探前景[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(2): 57-61.
- [17] 任收麦,邱海峻,尹成明,等. 柴达木盆地油气资源及勘探开发潜力分析[J]. 中国西部油气地质, 2006, 12(5): 168-174.
- [18] 李守军,张洪. 柴达木盆地石炭系地层特征与分布[J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 1-4.
- [19] 万传治,乐幸福,陈迎宾. 柴达木盆地东部地区石炭系分布规律与生烃潜力评价[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(5): 663-667.
- [20] 于会娟,刘洛夫,赵磊. 柴达木盆地东部地区古生界烃源岩研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(4): 24-29, 7.
- [21] 刘洛夫. 柴达木盆地东部地区烃源岩的生源与沉积环境[J]. 古地学报, 2001, 34(3): 82-91.
- [22] 刘成林,马寅生,周刚,等. 柴达木盆地石炭系生烃证据[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 925-931.
- [23] 戴俊生,叶兴树,汤良杰,等. 柴达木盆地构造分区及其油气远景[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 291-296.
- [24] 袁剑英,陈启林,陈迎宾,等. 柴达木盆地油气地质特征与有利勘探领域[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(5): 640-644.
- [25] 牛永斌,钟建华,段宏亮,等. 柴达木盆地石炭系沉积相及其与烃源岩的关系[J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 140-149.
- [26] 王大华,林武,李军亮,等. 柴东石灰沟地区上石炭统烃源岩评价及潜力分析[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(8): 17-20.
- [27] 方世虎,赵孟军,张水昌,等. 柴达木盆地北缘构造控藏特征与油气勘探方向[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 132-138.
- [28] 王训练,高金汉,张海军,等. 柴达木盆地北缘石炭系顶、底界线再认识[J]. 地学前缘, 2002, 9(3): 65-72.