

地震初至波速度层析成像技术 在南黄海盆地崂山隆起的应用

刘俊^{1,2,3}, 吴淑玉^{2,3}, 陈建文^{2,3}, 施剑^{2,3}, 何玉华^{2,3}

(1 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

2 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071)

摘要:崂山隆起位于南黄海盆地的中部, 新生代地层沉积薄, 其底部存在高速屏蔽层, 加上中—古生代地层经历了多期构造运动, 导致中—古生界地震有效反射信号弱、成像效果较差, 地震处理中采用常规速度谱拾取不能准确获得高速屏蔽层下的地层速度, 给叠前时间偏移和叠前深度偏移的速度建模工作带来很大困难。近几年, 青岛海洋地质研究所在南黄海崂山隆起采集了大容量震源长电缆地震数据, 获得了来自中—古生界的初至波信息。采用初至波层析成像方法来揭示高速屏蔽层下中—古生界速度变化信息, 主要通过拾取初至波时间, 建立初始速度模型, 经过不断迭代反演得到最终速度模型。结果表明, 高速屏蔽层下地层速度横向变化剧烈, 存在速度为 3 500~4 000 m/s 的低速层, 预测为碎屑岩; 速度为 5 100~5 500 m/s 的高速层, 预测为碳酸盐岩地层。

关键词:南黄海; 崂山隆起; 高速屏蔽层; 初至波; 层析成像

中图分类号: P631.443

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2016.10003

地震波在地下介质中传播过程中主要遵循惠更斯(Huygens)原理和费马(Fermat)原理, 斯奈尔(Snell)定理描述了射线穿过界面时波的传播规律, 地震波的走时包含了传播介质丰富的速度信息^[1, 2]。地震初至波是指从激发点出发, 经过在介质中传播, 最先到达接收点的地震波, 初至波包含直达波、回转波连续折射波、折射波或者多个

层折射波的组合^[3]。在地震所有波场中初至波较易获得, 其能量比较强, 易于识别和追踪, 因此, 初至波层析成像广泛应用于近地表速度调查、速度建模和叠前深度偏移等领域^[4, 5]。初至波层析成像方法主要有 4 类: ①基于高频近似射线理论的最短路径方法; ②基于程函方程的数值解方法; ③基于惠更斯原理的波前构建法; ④基于频率域波动方程方法^[3, 6]。

崂山隆起位于南黄海盆地的中部, 平均水深为 50 m, 新生界沉积薄, 厚约 600~1 000 m, 新生界与下伏中—古生界具有差异较大的阻抗差, 新生界底部存在强阻抗界面。中—古生代经历了多期构造运动, 地层结构复杂, 导致有效反射信号较弱, 加之多次波干扰影响, 对有效反射信号的识别变得更加困难, 地震处理中通过常规的速度谱拾取不能够准确获得地层速度, 无法建立较准确的

收稿日期: 2016-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(41406080); 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室基金(MRE201318, MRE201121); 国家海洋局海底重点实验室基金(KLSG1603); 南黄海油气资源调查(DD20160512); 南黄海前第三系油气前景研究(XQ-2005-01); 南黄海水域油气资源普查(GZH200800503); 南黄海崂山隆起和滩海区海相地层油气资源战略选区(XQ-2009-15)

作者简介: 刘俊(1978—), 男, 在读博士, 高级工程师, 主要从事海洋地球物理方面的研究工作。E-mail: vnjlj@163.com

速度模型,给叠前时间偏移和叠前深度偏移工作带来较大影响。近几年,青岛海洋地质研究所在南黄海崂山隆起开展了大容量震源长电缆地震调查工作,从单炮记录上获得了较多来自中—古生界的初至波信息,包括直达波、折射波和多次折射波,其特点为振幅较强,相位易于识别,比较可靠。

本文根据崂山隆起中—古生界埋深较浅,长排列地震初至波易于识别的特点,采用初至波速度层析成像方法来揭示高速屏蔽层下地层速度变化信息,为速度建模和地震资料解释工作提供基础信息。

1 地震地质特征

崂山隆起是南黄海盆地的构造稳定区,也是下扬子板块面积最大的稳定区块^[7,8],经历了多期构造运动的叠加,构造特征复杂,经历了前震旦基底形成、震旦纪—早古生代克拉通发育、晚古生代—中三叠世稳定台地—陆内裂陷、晚三叠世—古近纪断陷及新近纪—第四纪拗陷沉降 5 个地质演化阶段,沉积了比较齐全的中—古生界海相地层,主要发育有前震旦系变质岩系、震旦系—奥陶系、中—下志留统—上泥盆统、石炭系—下二叠统、上二叠统和中—下三叠统青龙组^[9-11]。

崂山隆起地震资料信噪比低,中—古生界成像效果较差,是南黄海海洋油气勘探的难点。图 1 为一条南北向叠前时间偏移地震剖面,在高速屏蔽层 T_2 界面以下,中—古生界成像较差,同相轴不连续,给地震资料解释工作带来很大困难,无法对地质属性进行描述。图 2 为该测线在隆起部

位的速度谱和 CMP 道集,从速度谱上来看,800 ms 以上的能量团是比较可靠的,但 800 ms 以下能量团分散,不聚焦,不能够拾取准确的中—古生界速度;从经过动校正后的 CMP 道集上看,在 T_2 界面以下地震有效反射信号难以识别,因此,通过常规速度谱拾取不能获得高速屏蔽层下中—古生界速度。

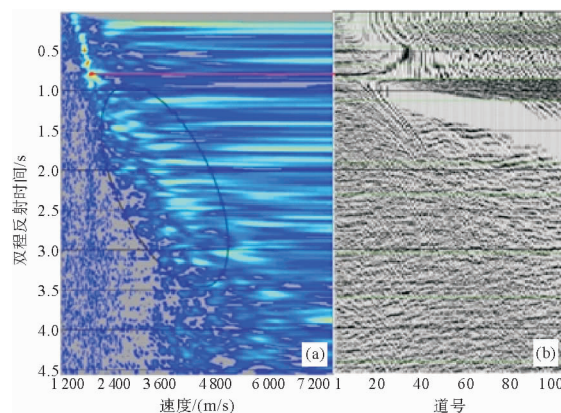


图 2 速度谱(a)与 CMP 道集(b)

Fig. 2 Velocity spectrum(a)and CMP gathers(b)

从原始地震单炮(图 3)来看,中—古生界地震反射信号同样难以识别, T_2 界面以下基本受多次波和侧面反射干扰所掩盖,但在地震单炮记录上初至波振幅较强,相位易于识别,该地震单炮最大偏移距达 8 100 m,记录到较多来自中—古生界的地震初至波,单炮上初至波的视速度变化也反映了深部中—古生界的速度信息(图 3)。因此,可以充分利用长排列地震初至波信息,采用初至波层析成像方法来揭示高速屏蔽层下地层的速度。

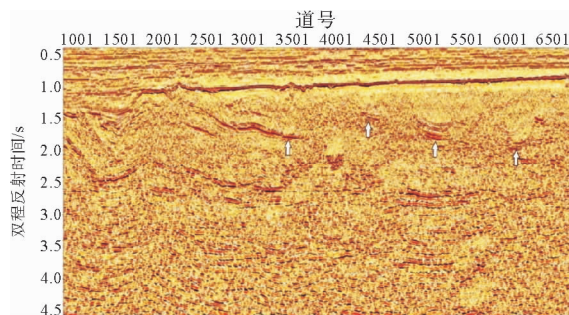


图 1 崂山隆起区叠前时间偏移剖面

Fig. 1 Pre-stack time migration profile in the Laoshan Uplift

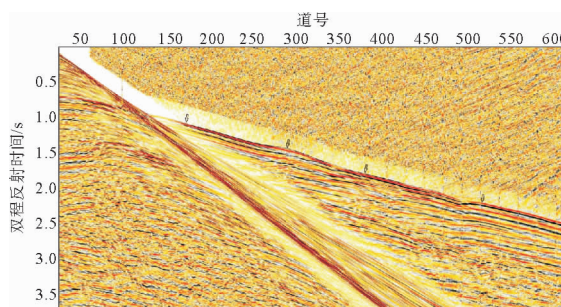


图 3 崂山隆起区地震单炮记录

Fig. 3 Shot gather at the Laoshan Uplift

2 技术方法

2.1 初至波层析成像方法原理

初至波地震层析成像技术的优势在于仅需要初至波的走时,对初至波的类型并无具体要求(直达波、反射波、折射波以及哪一层的折射波),通过射线追踪正演、非线性迭代反演,得出地下介质的速度结构。与传统折射解释方法相比,可以得到更为细致的速度分布情况^[12-14]。

$$T = \int_s^r S(x, z) dl \quad (1)$$

式中: $S(x, z)$ 为地下介质的慢度函数;

dl 为射线路径的微分;

T 为波从源点 s 到接收点 r 的旅行时。

射线路径与介质的慢度函数 $S(x, z)$ 以及波的类型有关。将(1)式离散后,可写成如下代数方程组的矩阵形式:

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

式中: T 为所有激发点到接收点的走时矩阵;

S 为介质的慢度矩阵;

A 为与射线路径有关的距离矩阵。

在慢度函数 $S(x, z)$ 已知的条件下,可以利用多种方法求出给定类型波的走时矩阵 T 和距离矩阵 A 。

反演则是在已知波的走时矩阵 T 的情况下反推出慢度函数 $S(x, z)$ 。由于距离矩阵 A 未知,直接由(2)式解出 S 是不可能的,必须先对 S 作出假设,利用正演求得射线路径 A 和走时,通过比较实际和正演走时得到走时差矩阵 ΔT ,对慢度矩阵 S 的修正量 ΔS ,有

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

式中: ΔT 和 A 已知,可用各种方法求出 ΔS 。用 ΔS 对原 S 进行修正得到新的 S 矩阵,再利用正演求得新的射线路径 A 和走时差 ΔT ,从而求得对 S 的新的修正量 ΔS 。如此反复,直到 ΔT 达到一定的精度要求为止。

2.2 速度层析反演流程

初至波层析成像方法主要工作流程如图4,首先拾取地震初至时间,然后建立初始速度模型,

通过模型正演初至时间,计算正演初至时间与实际初至时间差值,根据差值不断迭代修正速度模型,使旅行时差达到误差范围内,从而得到最终的速度模型,关键步骤如下:

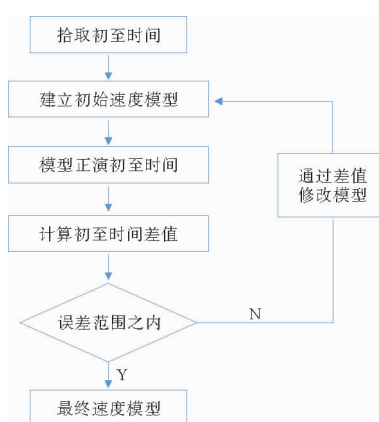
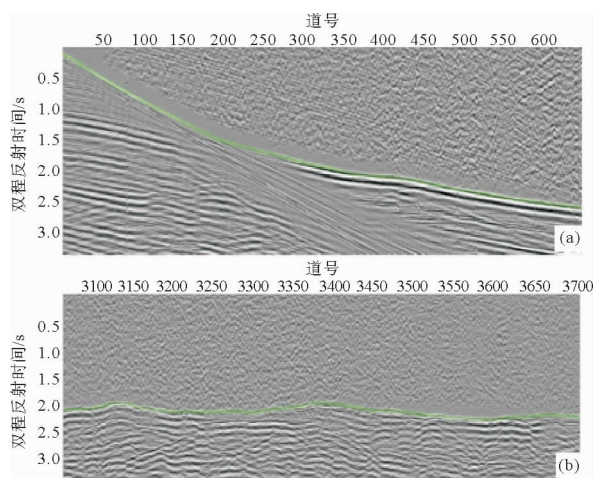


图4 初至波层析成像工作流程

Fig. 4 Flow chart of first arrival seismic tomography

(1)初至时间拾取 初至波时间的拾取是一项非常繁琐的工作,为了保证初至时间拾取的准确性,采用炮域和共道域进行初至时间拾取(图5),在炮域拾取初至时间的同时,要在共道域检查初至时间拾取是否准确,对于一些噪音干扰较大初至波相位不易拾取的单炮,采用共道域和共炮域插值来实现初至拾取。图6为初至时间平面图,横坐标为炮号,纵坐标为道号,左侧色标尺度标注初至时间约为500~3 000 ms,



(a)炮域;(b)共道域

图5 地震初至时间拾取

Fig. 5 Picking up seismic first arrival time

在平面图上初至时间没有异常挑点和空洞,说明拾取的初至时间精度较高,初至时间的变化趋势在一定程度上也反映了下伏地层的速度变化信息。

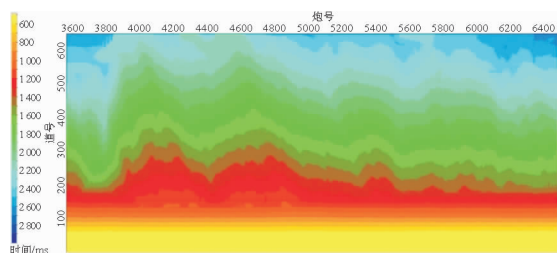


图 6 初至时间拾取平面图

Fig. 6 Plan graph of the first arrival time

(2)初始速度模型建立 初始速度模型的建立在整个层析成像过程中至关重要,其好坏直接影响到最终反演的速度模型的精度,本次以叠前时间偏移速度场作为初始速度模型(图 7a),其速度变化趋势大致与地层结构一致,因此,初始速度模型基本可以满足层析反演的要求。

(3)迭代反演 根据初始速度模型正演初至时间,并计算模型正演的初至时间与实际初至时间的差值,根据差值不断修正速度模型,经过多次迭代射线走时时间差值达到一定误差范围内,从而得到最终的速度模型。从图 7a 中可以看出,初始模型(叠前时间偏移速度场)速度横向变化不大,速度趋势比较平缓,经过 3 轮迭代反演后,高速屏蔽层下速度横向变化信息变得越来越丰富

(图 7d),说明通过初至波层析成像方法能够刻画高速屏蔽层下中—古生代地层的速度变化信息。

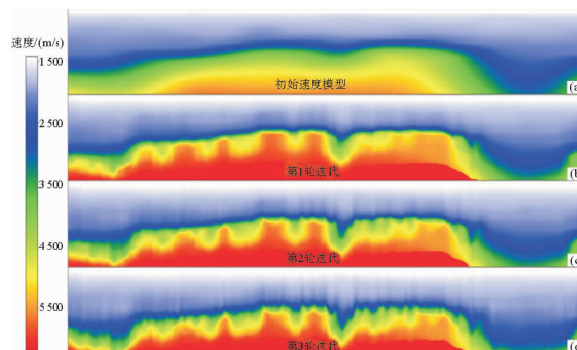


图 7 初至波层析反演多次迭代速度模型

Fig. 7 Velocity model of the first arrival tomography through multiple iterations

3 效果分析

通过初至波层析反演多次迭代得到了高精度的速度模型,将速度模型与地震剖面进行叠合分析显示(图 8),在高速屏蔽层下,速度在横向上变化较大,当 T_2 界面(高速屏蔽层)比较平缓时,对应其下伏地层速度相对平稳;当 T_2 界面出现小的凸起、起伏较大时,其下伏地层速度变化较大,比较尖的凸起,下伏地层速度大多为低速,速度约为 3 500~4 000 m/s,预测其岩性为碎屑岩,相对比较圆滑的凸起,对应下伏地层速度大多为高速,速度约为 5 100~5 500 m/s,预测其岩性为碳酸盐岩。

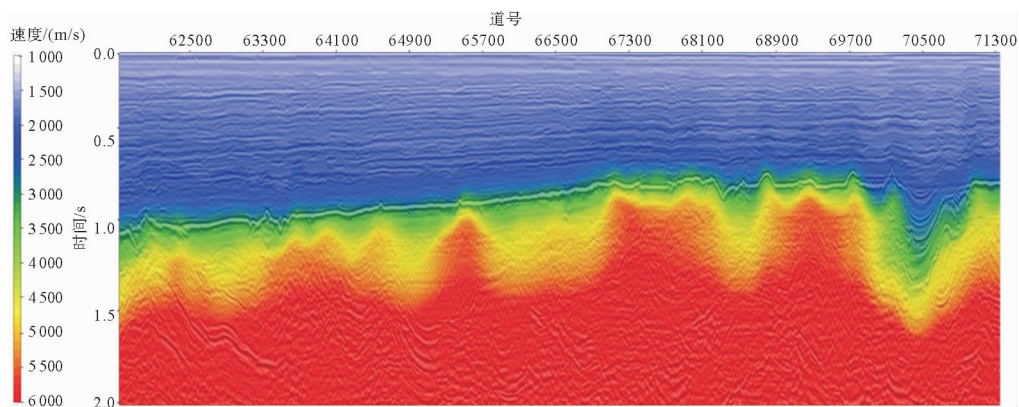


图 8 初至波层析反演速度模型

Fig. 8 The first arrival tomography inversion velocity model

对比地震剖面(图 9a),将初至波层析反演速度模型局部放大(图 9b)进行对应分析,反演速度模型的速度变化趋势与地震剖面上同相轴成像特征基本一致。在地震剖面上,中—古生界同相轴不连续,地层无法对应和追踪,结合初至波层析反

演的速度模型,根据速度信息可以较好地进行地层的追踪解释和物性描述。另外,初至波层析反演的速度模型刻画了中—古生界速度的细节变化,可以建立更加精确的速度模型,为下一步的地震叠前深度偏移奠定基础。

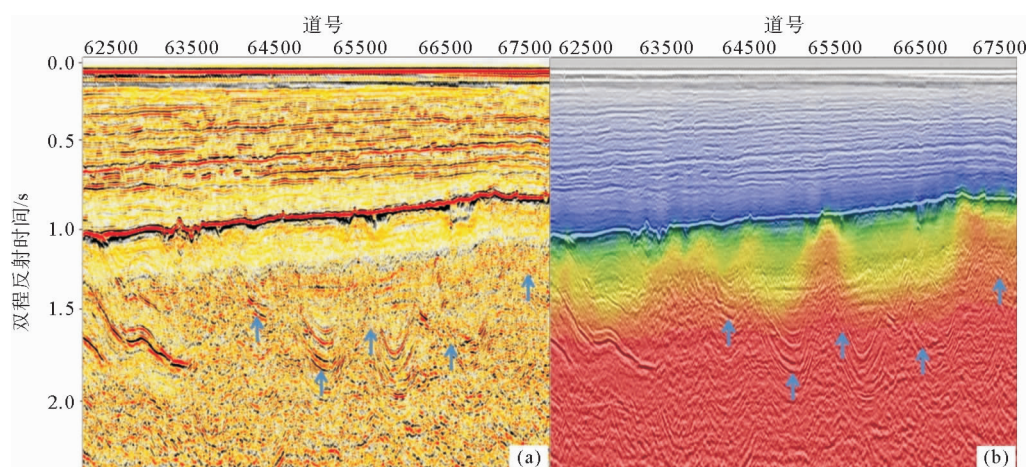


图 9 地震剖面(a)与初至波层析反演速度模型(b)对比分析

Fig. 9 Comparative analysis of seismic profile(a) and first arrival tomography inversion velocity model(b)

4 结论

南黄海崂山隆起区新生界厚度较薄,中—古生界埋深较浅,地震资料信噪比低,地震成像效果差,有效地震反射波组不易识别,无法准确获取高速屏蔽层下地层的速度。大容量震源长电缆地震数据记录了较多来自中—古生界的初至波信息,加之初至波相位易于识别的特点,在南黄海崂山隆起首次采用了初至波层析成像方法来反演高速屏蔽层下地层的速度,结果表明,该方法在该区域中—古生界速度研究方面是可行的。

(1)在崂山隆起地震资料信噪比低,目的层埋深较浅的情况下,利用地震初至波震相易于识别特征,采用初至波层析反演方法,通过初至时间拾取,建立初始速度模型,较好地反映了高速屏蔽层下中—古生界速度变化信息,为建立精确速度模型,进行地震叠前深度偏移奠定了基础,同时为地震解释和地层物性描述提供有力的证据。

(2)海洋二维地震采集会接收到侧面反射折射信息,另外地震采集过程中还存在电缆羽角,这

些因素会影响到初至波层析反演的精度。

(3)初至波层析反演方法主要针对近地表速度建模,本次速度反演平均深度为 1.5 km,要反演更深的速度,需要更大偏移距的数据,如海洋 OBS 数据等。在地震资料信噪比较高,反射信号能够识别的区域,初至波与反射波层析反演结合,可以获得更深更精确的速度模型。

参考文献:

- [1] 刘振东,吕庆田,严加永,等. 庐枞盆地浅表地壳速度成像与隐伏矿靶区预测[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 3910-3922.
- [2] 王东鹤,陈祖斌,刘 昕,等. 地震波射线追踪方法研究综述[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(1): 344-353.
- [3] 赵烽帆,马 婷,徐 涛. 地震波初至走时的计算方法综述[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1102-1113.
- [4] 王 建,赵明辉,贺恩远,等. 初至波层析成像的反演参数选取:以南海中央次海盆三维地震探测数据为例[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(5): 74-83.
- [5] 刘玉柱,丁孔芸,董良国. 初至波走时层析成像对初始模型的依赖性[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(4): 502-511.
- [6] 李庆春,叶 佩. 初至波与反射波旅行时多尺度渐进联合层析成像[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(4): 536-544.

- [7] 杨艳秋,易春燕,李 刚. 南黄海中部隆起地震层序地层的识别及其地质时代探讨[J]. 海相油气地质, 2015, 20(4): 49-56.
- [8] 赵文芳,杨凤丽,庄建建. 南黄海中部隆起中—古生界构造特征分析[J]. 油气藏评价与开发, 2011, 1(5): 6-13.
- [9] 杨长清,董贺平,李 刚. 南黄海盆地中部隆起的形成与演化[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(7): 17-21.
- [10] 陈建文. 南黄海崂山隆起海相中—古生界发现多个大型圈闭构造[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(4): 69-70.
- [11] 雷宝华,陈建文,李 刚,等. 南黄海盆地二叠系地震地层特征与识别[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(1): 29-34.
- [12] 林伯香,孙晶梅,刘清林. 层析成像低速带速度反演和静校正方法[J]. 石油物探, 2002, 41(2): 136-140.
- [13] 王立会,梁久亮,彭刘亚. 初至波层析成像技术在隐伏断裂探测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2015, 24(1): 29-36.
- [14] 侯贺晟,高 锐,卢占武,等. 青藏高原原塘盆地中央隆起近地表速度结构的初至波层析成像试验[J]. 地质通报, 2009, 28(6): 738-745.

APPLICATION OF SEISMIC FIRST ARRIVAL VELOCITY OF TOMOGRAPHY IMAGING TO LAOSHAN UPLIFT OF THE SOUTH YELLOW SEA BASIN

LIU Jun^{1,2,3}, WU Shuyu^{2,3}, CHEN Jianwen^{2,3}, SHI Jian^{2,3}, HE Yuhua^{2,3}

(1 Faculty of Earth Resource, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology, Ministry of Land and Resource, Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China;

3 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: The Laoshan Uplift is located in the middle of the South Yellow Sea Basin. There is large difference of impedance between the Cenozoic and the Mesozoic-Paleozoic. It is, therefore, inferred that there should be a high-speed shield layer at the bottom of the Cenozoic, and the Meso-Paleozoic has experienced complicated tectonic deformation, and resulted in a low signal/noise ratio and poor seismic images. Therefore, it is difficult to acquire the accurate velocity of the Meso-Paleozoic through conventional picking up of stacking velocity in seismic processing, that has brought great difficulties to the velocity modeling of the prestack time migration and prestack depth migration. Qingdao Institute of Marine Geology (QIMG) has collected great amount of seismic data of large-capacity source and long cable from the Laoshan Uplift of the South Yellow Sea Basin, obtained the first-arrival wave from Meso-Paleozoic strata. This paper applies the first arrival wave tomography to inverse the Meso-Paleozoic velocity in the high-speed shield layer, mainly through picking up the first arrival-time and building up a velocity model by continuous iterative inversion, finally get the result velocity model. The result shows that velocity changes severely in lateral direction beneath the high-speed shield layer. The low-velocity layer may indicate clastic rocks with a velocity ranging 3 500-4 000 m/s, and the high-velocity layer indicate carbonate rocks with a higher velocity within the range of 5 100-5 500 m/s.

Key words: South Yellow Sea Basin; Laoshan Uplift; high-speed shield; first arrival wave; tomography imaging