

# 潮汕坳陷中生代沉积层纵横波速度结构

卫小冬<sup>1,2,3</sup>, 赵明辉<sup>1</sup>, 阮爱国<sup>2</sup>, 丘学林<sup>1</sup>, 熊厚<sup>1,3</sup>, 张佳政<sup>1,3</sup>

1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 南海海洋研究所, 广东 广州 510301;

2. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要:** 潮汕坳陷残留有巨厚的中生代沉积层, 是南海油气勘探的重要区域。已经开展了大量的多道地震反射工作, 同时也有折射地震和海地地震仪研究, 但尚未开展纵横波联合研究。纵横波联合探测, 可以获得更多的地下结构信息, 对油气勘探有重要的意义。在 OBS2006-3 剖面潮汕坳陷中生代沉积层纵波速度结构的基础上, 对转换横波震相进行了射线追踪和走时模拟。结果表明, 潮汕坳陷中生代沉积层厚度较大, 最大厚度达到 8km, 纵波速度从顶部的  $4.4\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  增加到底部的  $5.3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 相应的横波速度由  $2.6\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  增大到  $3.0\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 泊松比为 0.24—0.26, 波速比为 1.74—1.80, 其成分可能包含有砂岩、泥岩和火山岩。同时根据该区的地球物理特征, 结合前人的研究, 分析了油气勘探潜力。

**关键词:** 潮汕坳陷; 中生代沉积层; 速度结构; 泊松比

中图分类号: P631.4; P736 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)03-0058-07

## Joint P-wave and S-wave velocity structure of the Mesozoic sediments in the Chaoshan Depression

WEI Xiao-dong<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Ming-hui<sup>1</sup>, RUAN Ai-guo<sup>2</sup>, QIU Xue-lin<sup>1</sup>, XIONG Hou<sup>1,3</sup>, ZHANG Jia-zheng<sup>1,3</sup>

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology of Chinese Academy of Sciences, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** As a thick residual deposition depression of the Mesozoic strata, the Chaoshan Depression is an important area for oil and gas exploration in the South China Sea (SCS). A lot of multiple-channel seismic (MCS) reflection studies have been conducted in this area, as well as refraction and ocean bottom seismometer (OBS) surveys, but joint P-wave and S-wave studies have not yet been done. Applying the joint exploration of P-wave and S-wave, the complex subsurface crustal structure can be obtained, which is helpful for oil and gas exploration. Based on the P-wave velocity structure of the Mesozoic sediments in the Chaoshan Depression of the profile OBS2006-3, we carried ray tracing and travel-time simulation of converted S-wave. The results reveal that the Mesozoic sediment in the Chaoshan Depression is remarkably thick with the maximum of 8 km, and the P-wave velocity increases downward from  $4.4\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  at the top to  $5.3\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  at the bottom. Accordingly, the S-wave velocity and Poisson's ratio are  $2.6\text{--}3.0\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  and 0.24–0.26, respectively, which may imply the composition of Mesozoic strata are sandstone, mudstone and volcanic rocks. According to the geophysical characteristics and previous research in the Chaoshan Depression, this paper analyzes the exploration potential in the Chaoshan Depression.

**Key words:** Chaoshan Depression; Mesozoic sediments; velocity structure; Poisson's ratio

在刘光鼎院士“前新生代海相残留盆地勘探是 油气二次创业的主战场”思想的指导下<sup>[1]</sup>, 海上中生

收稿日期: 2011-09-09; 修订日期: 2011-10-25. 卢冰编辑; 林强校对

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91028002); 国家自然科学基金(40876035, 41074066); 国家高技术研究发展计划项目(2008AA093001)

作者简介: 卫小冬(1984—), 河南省新安县人, 在读博士, 研究方向为海洋深部地球物理. E-mail: xdwei@scsio.ac.cn

界成为寻找油气的新领域。通过对南海地质、地球物理场的综合研究,发现其北部存在中生界地层<sup>[2-6]</sup>,主要分布在潮汕坳陷和台西南盆地以及南海北部陆架和陆坡的其他区域<sup>[7]</sup>,为南海前新生代油气勘探提供了物质基础。潮汕坳陷作为南海北部重要的勘探区,位于南海北部大陆边缘珠江口盆地东南部,面积约为 15600km<sup>2</sup>,水深范围 200—3000m,最大沉积厚度超过 7000m<sup>[8-9]</sup>。中海油在位于潮汕坳陷的 LF35-1-1 钻井证实该坳陷是一个中生代的残留坳陷,充填有白垩纪陆相沉积及中—晚侏罗世海相沉积<sup>[10-11]</sup>。潮汕坳陷地区已经开展了大量的多道地震反射工作<sup>[7,12]</sup>,但由于受多种因素的影响,该地区的深层地震反射资料品质普遍较差,信噪比较低,有效波能量很弱,大都被淹没在干扰背景之中,并且部分地区由于受强烈干扰和多次波的影响而表现为反射空白带或杂乱反射。因此,近年来该区域也开展了折射地震<sup>[13]</sup>和海底地震仪(ocean bottom

seismometer, OBS)研究<sup>[14-16]</sup>,但尚未开展纵横波联合研究。纵横波联合探测,可以获得更多的地下结构信息,纵横波速比与岩石泊松比在预测岩石圈层的岩性、物性等介质属性方面有着得天独厚的优势,可以进一步探讨含油气盆地和天然气水合物的区域构造背景,促进油气资源的勘探与开发。

2006 年,国家海洋局第二海洋研究所在南海中北部陆缘完成了 3 条 OBS 测线,其中 OBS2006-3 测线穿过东沙隆起和潮汕坳陷<sup>[14,17-20]</sup>。该测线有 7 个 OBS 台站位于潮汕坳陷区(图 1),获取了大量来自沉积层内部的折射记录。阮爱国等<sup>[14]</sup>利用这 7 个台站的数据,对潮汕坳陷内中生代沉积进行了折射波 2D 层析成像反演,本文在此基础上,结合垂直分量上识别的折射震相,对纵波速度结构模型进行了适当修改,并利用径向分量上识别和确认的转换横波震相,对潮汕坳陷中生代沉积层的横波速度结构进行了研究。

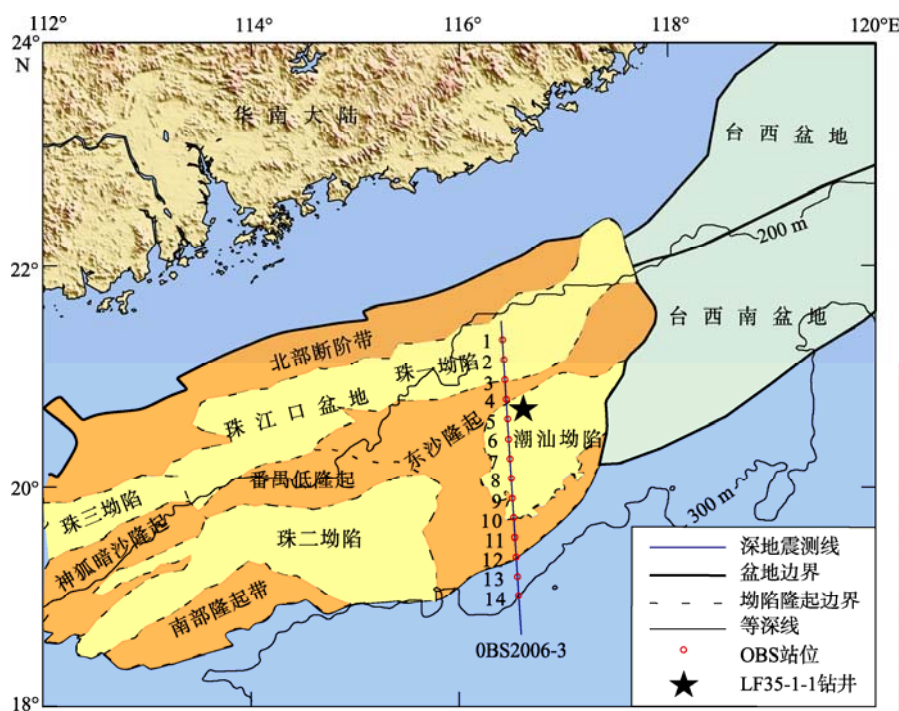


图 1 潮汕坳陷构造位置及深地震测线分布图

Fig. 1 Location of the Chaoshan Depression and deep seismic survey lines

## 1 数据采集与处理

OBS2006-3 测线北端位于珠一坳陷东缘,经过东沙隆起、潮汕坳陷到达洋盆边缘,总长 319km,水深从 224m 增加到 3484m。共布设 14 台 OBS,台站间距约 20km,采样率为 250Hz,震源由 22 支不同容量的气枪组合而成,总容量达 5160in<sup>3</sup>(1in<sup>3</sup> =

1.63871×10<sup>-5</sup>m<sup>3</sup>),炮间距为 200m,放炮时间间隔约 90s,放炮作业时船速为 4.5kn(1kn=1.852km·h<sup>-1</sup>)。采集的原始数据为 IMG 格式,处理过程中,首先整理计算导航数据文件和偏移距文件(包括炮点坐标、OBS 站位坐标和偏移距),然后利用得到的放炮时间数据和偏移距数据对原始数据进行截裁,获取各个 OBS 记录的 SEG Y 格式和 SU 格式文件,从而得

到每个 OBS 中 4 个分量的地震记录剖面<sup>[14,16]</sup>。该 OBS 还可以直接记录 2 个水平分量的方位角,在数据处理过程中可以利用 OBS 记录的方位角把 2 个水平分量旋转为径向分量和切向分量,为横波震相的识别和处理提供基础。

## 2 多道地震资料的应用

与 OBS2006-3 地震测线基本重合的多道剖面上也有一段位于潮汕坳陷,该剖面上张性断裂发育,切穿了新生代沉积层(图 2)。从地震剖面上可以清晰

地看到一振幅强、同相轴连续的界面,是中、新生代的分界面,研究指出中生代上部为白垩系,下部为侏罗系<sup>[7]</sup>。潮汕坳陷下方构造层整体构造形态简单,呈明显的向斜状,并在坳陷边缘及隆起上遭受强烈剥蚀,与上覆地层呈角度不整合接触,显示坳陷在形成后曾大幅度抬升,从而暴露地表遭受剥蚀。剖面上中生代因为埋藏较深,受强烈干扰和多次波的影响而未能识别出基底,但多道剖面上的海底面和新生代基底信息为纵横波速度结构模拟过程中初始模型的建立提供了数据基础。

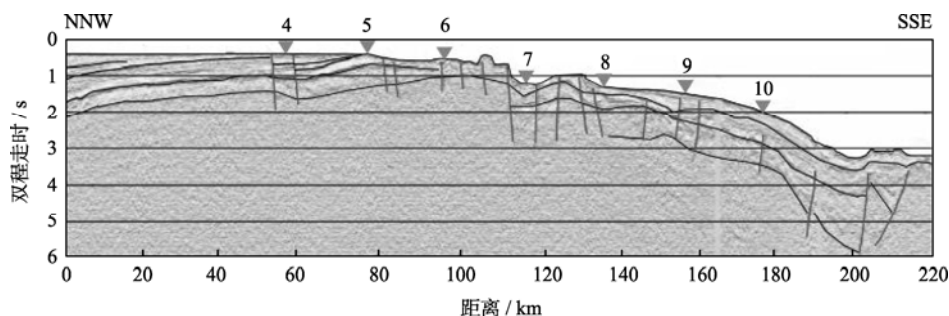


图 2 潮汕坳陷多道地震剖面,三角形代表 OBS 位置,与图 1 OBS2006-3 测线中 OBS 位置相对应

Fig. 2 Multiple-channel seismic (MCS) stacked section of the Chaoshan Depression. Triangles denote OBS locations, corresponding to the OBS positions of profile OBS2006-3 in fig 1

## 3 震相识别与速度结构模拟

### 3.1 纵波震相的识别与速度结构模拟

OBS 记录有 4 个分量(3 个检波器分量和 1 个水听器分量)的数据,垂直分量主要记录纵波,水平分量主要记录转换横波信息。在潮汕坳陷折射波 2D 速度结构模型<sup>[14]</sup>的基础上,利用垂直分量(图 3a)中识别的折射震相,重新追踪和模拟了潮汕坳陷中生代沉积层的纵波速度结构(图 3)。

对地震剖面上来自不同深度、属性和特征的地震波组进行对比分析,根据垂直分量(图 3a)上的地震波走时、视速度以及偏移距主要识别出了 Ps3、Pg 震相。Ps3 是中生代沉积层折射震相,是近距离记录到的初至波。Pg 是地壳内的折射震相。在这 7 个台站都有明显的震相显示,最远可以追踪到 80km,是一组能量强可以连续追踪的震相。OBS8 站位的记录剖面上可以看到多种震相,如直达水波、Ps3 和 Pg,其中 Ps3 震相在 OBS 左、右两半支都可以清晰地看到,其中左半支偏移距达到 35km,右半支偏移距达到 40km 以外, Pg 震相只在左半支识别出来,偏移距最远达到 80km 以外(图 3a)。其他台站也记录到类似的清晰震相,为速度结构模拟提供了数据基础。

通过分析 OBS 垂直分量中的震相特征,结合区域地质资料,多道地震资料和潮汕坳陷折射波 2D 速度结构模型<sup>[14]</sup>,建立地壳结构的初始模型。然后采用 2D 射线追踪程序 Rayinvr<sup>[21]</sup>模拟计算各震相的理论走时曲线,并将该理论计算的走时与实际观测的走时进行对比(图 3),用试错法不断修改模型,使理论计算结果逐步向实测曲线逼近,获得一个较理想的模型,最后再采用 Rayinvr<sup>[21]</sup>的反演计算程序,逐层对射线密集区域进行反演计算,最终使得所有震相总的均方根走时残差最小,获得各台站的理论射线路径和二维地壳速度结构(图 4)。

### 3.2 横波震相的识别与速度结构模拟

将纵波速度结构模型(图 4)作为横波速度结构模拟的起始模型,保持模型界面不变,利用识别和确认的转换横波震相来模拟计算潮汕坳陷中生代沉积层的横波速度结构。

为了识别转换横波震相,同一站位下 4 个分量的地震剖面都采取相同的滤波参数和折合速度,3 个检波器分量中的 2 个水平分量经过极化旋转后得到径向分量和切向分量,本文采用横波信息集中的径向分量进行走时模拟。对比分析同一站位垂直分量和径向分量上的纵横波走时、视速度以及质点运动轨迹等,识别出了转换横波震相<sup>[19-20]</sup>(图 5)。

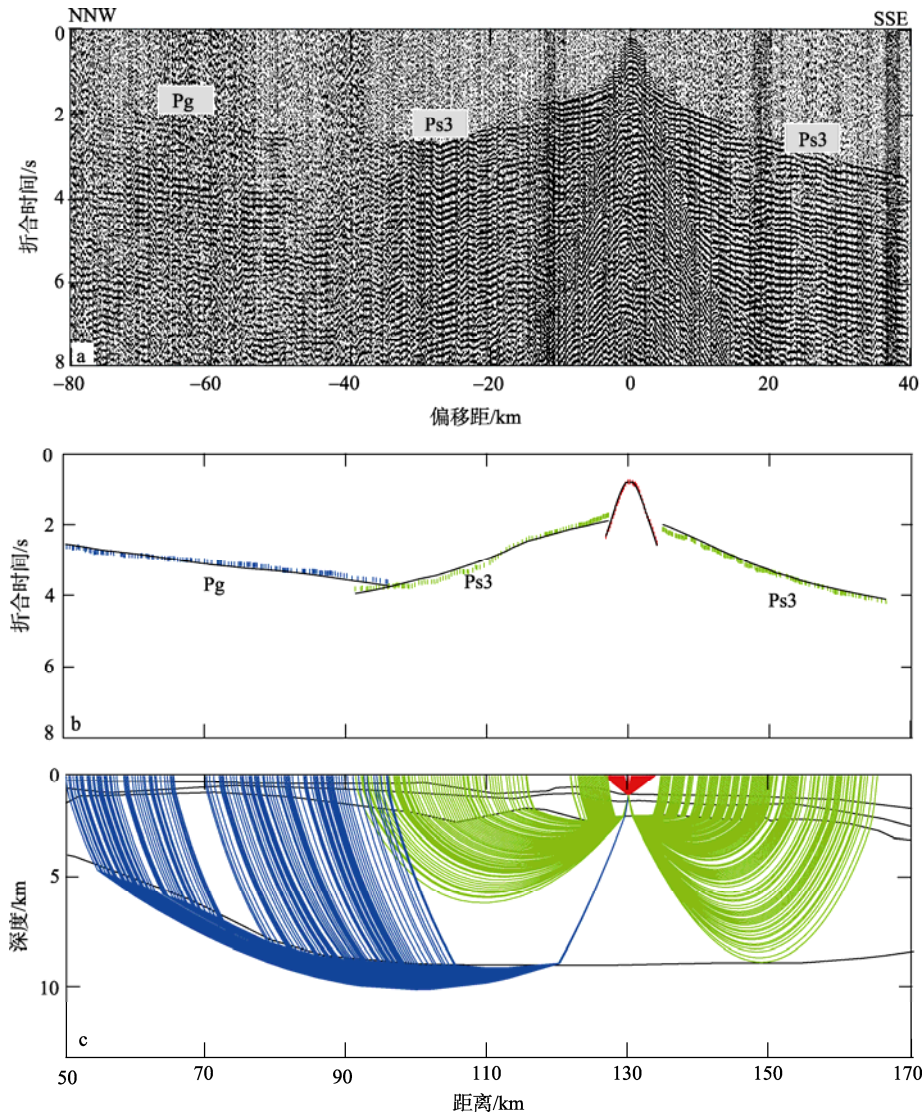


图 3 a. OBS8 站位垂直分量, 折合速度为  $6.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ; b. 实测走时(虚线)和计算走时(实线); c. 纵波速度结构模型和射线追踪

Fig. 3 a. Vertical component at Station OBS8 with reduced velocity of  $6.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ; b. observed travel-time curves (dashed lines) and calculated travel-time curves (solid lines) of P-wave; and c. P-wave model and ray-tracing simulation

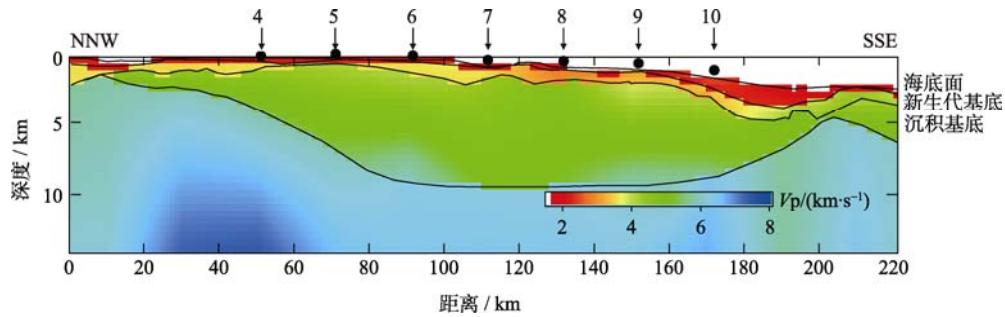


图 4 潮汕坳陷中生代沉积层纵波速度结构

黑色圆点代表 OBS 位置, 与图 1 OBS2006-3 测线中 OBS 位置相对应

Fig. 4 P-wave velocity structure of the Mesozoic sediments in the Chaoshan Depression. Black dots denote OBS locations, corresponding to the OBS positions of profile OBS2006-3 in fig 1.



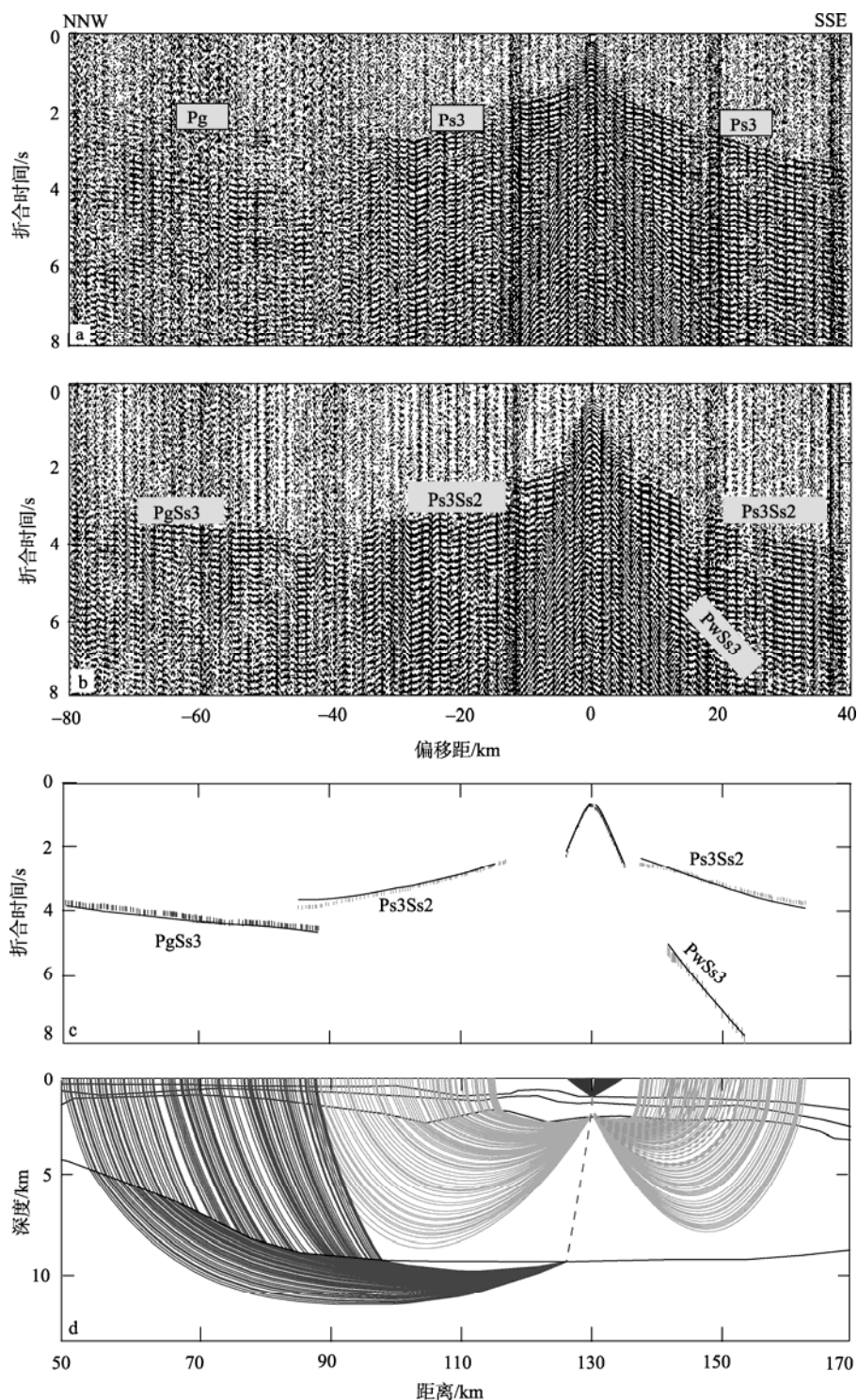


图 5 OBS8 站位的垂直分量(a)和径向分量(b), 折合速度为  $6.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ; c. 转换横波实测走时(虚线)和计算走时(实线); d. 横波速度模型和射线追踪, 实线和虚线分别为纵、横波路径

Fig. 5 Vertical(a)- and radical(b)-component at Station OBS8 with reduced velocity of  $6.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ; c. observed travel-time curves (dashed lines) and calculated travel-time curves (solid lines) of converted S-wave; d. converted S-wave model and ray-tracing simulation, where the solid and dashed lines stand for ray paths of P-wave and S-wave, respectively

OBS 接收到的横波都是由纵波在主要速度间断面上(海底面, 沉积基底等)转换产生的<sup>[22-24]</sup>, 记录的转换横波主要有 PPS 模式和 PSS 模式<sup>[22]</sup>。PgSs3 震相是地壳内折射震相 Pg 在沉积基底发生 PPS 模式转换

形成的; 中生代沉积层的 Ps3 震相发生了两种模式的转换, 分别为入射纵波在海底面转换为横波后向上折射到 OBS 形成 PwSs3 震相, 这是 PSS 模式的转换, 另一种发生 PPS 模式转换, 是入射纵波在沉积层 2 的底

部发生转换, 然后形成 Ps3Ss2 震相(图 5d)。可以看出, 各个震相都得到了很好的拟合(图 5c)。利用这种方法,

对其他台站进行了相应的模拟, 最终得到了潮汕坳陷中生代沉积层中的横波速度结构(图 6)。

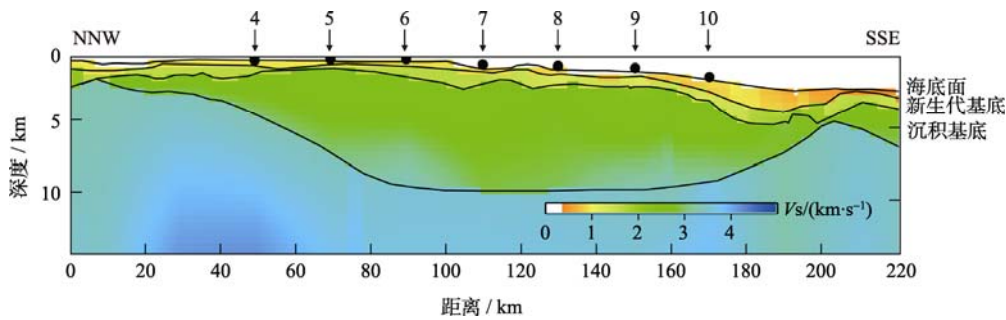


图 6 潮汕坳陷中生代沉积层横波速度结构

黑色圆点代表 OBS 位置与图 1 OBS2006-3 测线中 OBS 位置相对应

Fig. 6 S-wave velocity structure of the Mesozoic sediments in the Chaoshan Depression. Black circles denote OBS locations corresponding to the OBS positions of profile OBS2006-3 in fig 1.

### 3.3 模拟结果

该模型长 220km, 潮汕坳陷宽 166km, 纵波速度结构揭示, 潮汕坳陷下方的结晶基底深达 10km。坳陷内共有 3 个沉积层, 前两层是新生代沉积, 速度分别为  $2.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $3.6\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 在整个模型范围内都很薄, 厚度不超过 2km。中生代沉积层厚度较大, 最大厚度达到 8km, 速度从顶部的  $4.4\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  向下逐渐增加到底部的  $5.3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。与纵波速度一样, 横波的速度也随着深度的加大而增大。新生代沉积层的横波速度分别为, 沉积层 1 为  $0.7\text{—}0.9\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 沉积层 2 为  $1.6\text{—}1.7\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。中生代沉积层的横波速度由浅部的  $2.6\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  增大到底部的  $3.0\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。纵横波速度联合, 获得各层的纵横波速比( $V_p/V_s$ )和泊松比, 泊松比由以下泊松比与速度的关系  $\sigma=\{1-1/[(V_p/V_s)^2-1]\}/2$  计算得到。新生代沉积层的  $V_p/V_s$  比较大, 为  $2.91\text{—}3.10$ , 中生代沉积层的  $V_p/V_s$  为  $1.74\text{—}1.80$ , 泊松比为  $0.24\text{—}0.26$ 。

## 4 讨论

潮汕坳陷纵波速度结构模型揭示中生代沉积层厚度较大, 最大厚度处为 8km, 前人研究对此有较大的争议, 有研究指出介于 2—5km 之间<sup>[7]</sup>, 也有研究认为中生代沉积层较厚, 最大沉积厚度超过 7km<sup>[8-9]</sup>, 中生代沉积层的速度从顶部的  $4.4\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  向下逐渐增加到底部的  $5.3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。南海北部潮汕坳陷海区的海底地震仪调查实验也揭示中生代海相地层有较高的速度( $4.5\text{—}5.3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 普遍达到  $5.0\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  以上, 同时构造复杂, 导致中生代沉积成岩程度高, 孔隙度低<sup>[15]</sup>。中生代沉积层的横波速度从浅部的

$2.6\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  增大到底部的  $3.0\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $V_p/V_s$  为  $1.74\text{—}1.80$ , 泊松比为  $0.24\text{—}0.26$ , 这与阎贫<sup>[25]</sup>从 OBS1993 地震剖面的 OBS9 站位得到的结果( $V_p/V_s=1.76$ ,  $\sigma=0.26$ )一致, 结合潮汕坳陷北坡 MZ-1-1 钻井钻出的中生代沉积层样品<sup>[6]</sup>, 推测中生代沉积层的主要成分可能为砂岩、泥岩和火山岩。岩性、孔隙、孔隙流体、孔隙形状, 结构和固结程度, 影响着沉积岩石中的  $V_p/V_s$  值, 当  $V_p/V_s$  大于 3 时, 为未固结的松散沉积物<sup>[26]</sup>, 据此推断中生代沉积层成岩程度高, 孔隙度较低。由于横波速度对含流体岩层高度敏感, 使得纵横波联合勘探能够在油气藏的识别中具有优势。产油气的 Mallanes Forland 盆地, 砂岩沉积于开放的海岸陆架环境, 对该区的不同样品进行研究, 发现页岩的泊松比是  $0.3\text{—}0.4$ , 储油砂岩泊松比是  $0.2\text{—}0.25$ <sup>[27]</sup>。而本研究中中生代沉积层的泊松比与储油砂岩泊松比相近。研究指出潮汕坳陷烃源岩可能为中生界海相泥岩, 并通过与邻区探井对比, 有机碳含量 (total organic carbon, TOC) 推断为  $0.6\%\text{—}2.45\%$ , 最大可达  $4.26\%$ , 烃源岩具有中等程度的生烃潜力<sup>[5]</sup>; 位于潮汕坳陷的 LF35-1-1 井钻遇到中—上侏罗统上部和中—上侏罗统下部两套烃源岩。中—上侏罗统上部为深海沉积段, 暗色泥岩累计厚度达  $82.87\text{m}$ , 有机碳含量为  $0.50\%\text{—}1.15\%$ , 平均值为  $0.67\%$ , 为差—中等烃源岩; 中—上侏罗统下部为浅海沉积段, 暗色泥岩累计厚度为  $46.16\text{m}$ , 有机碳含量为  $1.00\%\text{—}1.48\%$ , 平均值为  $1.32\%$ , 为中等—好烃源岩, 这两套烃源岩目前成熟度达到过成熟干气阶段<sup>[10]</sup>。陈洁<sup>[5]</sup>对潮汕坳陷邻近浅水钻探结果和地震资料进行分析, 得到深水发育三角洲、滨浅海相砂岩及低位扇砂体与海相泥岩、

台地灰岩与海相泥岩等多套储盖组合, 圈闭条件优越, 存在多种类型构造和地层岩性圈闭。以上分析说明, 应该继续深入研究潮汕坳陷中生代沉积层, 为油气资源前景评价提供更为详尽可靠的信息。

## 5 结论

经过走时模拟, 最终得到了潮汕坳陷中生代沉

积层的纵、横波速度结构模型和泊松比。中生代沉积层的纵波速度由浅部的顶部的  $4.4\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  向下逐渐增加到底部的  $5.3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 相应的横波速度由  $2.8\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  增大到  $3.0\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 泊松比为  $0.24\text{—}0.26$ , 纵横波速比( $V_p/V_s$ )为  $1.74\text{—}1.80$ , 其主要成分可能为砂岩、泥岩和火山岩, 较低的波速比表明中生代沉积层成岩程度高, 孔隙度较低。

## 参考文献

- [1] 刘光鼎, 陈洁. 中国前新生代残留盆地油气勘探难点分析及对策[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 273-275.
- [2] 夏戡原, 黄慈流. 南海中生代特提斯期沉积盆地的发现与找寻中生代含油气盆地的前景[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 227-238.
- [3] 王平, 夏戡原, 黄慈流. 南海东北部中生代海相地层的分布及其地质地球物理特征[J]. 热带海洋, 2000, 19(4): 28-35.
- [4] 郝沪军, 张向涛. 重磁资料在潮汕坳陷中生界油气勘探中的应用[J]. 中国海上油气: 地质, 2003, 17(2): 128-132.
- [5] 陈洁. 潮汕坳陷地球物理特征及油气勘探潜力[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 147-155.
- [6] 邵磊, 尤洪庆, 郝沪军, 等. 南海东北部中生界岩石学特征及沉积环境[J]. 地质论评, 2007, 53(2): 164-169.
- [7] 钟广见, 吴世敏, 冯常茂. 南海北部中生代沉积模式[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(1): 43-48.
- [8] 陈冰, 王家林, 钟慧智, 等. 南海潮汕坳陷前第三纪盆地结构地球物理研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(9): 1275-1280.
- [9] 郝沪军, 林鹤鸣, 杨梦雄, 等. 潮汕坳陷中生界油气勘探的新领域[J]. 中国海上油气: 地质, 2001, 15(3): 157-163.
- [10] 郝沪军, 施和生, 张向涛, 等. 潮汕坳陷中生界及其石油地质条件——基于 LF35-1-1 探索井钻探结果的讨论[J]. 中国海上油气, 2009, 21(3): 151-156.
- [11] 吴国瑄, 王汝建, 郝沪军, 等. 南海北部海相中生界发育的微体化石证据[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(1): 79-85.
- [12] 郝沪军, 汪瑞良, 张向涛, 等. 珠江口盆地东部海相中生界识别及分布[J]. 中国海上油气: 地质, 2004, 16(2): 84-88.
- [13] 吕修亚, 阎贫, 陈洁, 等. 折射方法在南海北部潮汕坳陷中生界地层研究中的应用[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(1): 43-47.
- [14] 阮爱国, 牛雄伟, 吴振利, 等. 潮汕坳陷中生代沉积的折射波 2D 速度结构和密度[J]. 高校地质学报, 2009, 25(4): 417-423.
- [15] 罗文造, 阎贫, 温宁, 等. 南海北部潮汕坳陷海区海底地震仪调查实验[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(4): 59-65.
- [16] 卫小冬, 阮爱国, 赵明辉, 等. 穿越东沙隆起和潮汕坳陷的 OBS 广角地震剖面[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3325-3335.
- [17] 李湘云, 吴振利, 薛彬, 等. SEDIS IV型短周期自浮式海底地震仪及应用体会[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(5): 735-39.
- [18] 吴振利, 阮爱国, 李家彪, 等. 南海中北部地壳深部结构探测新进展[J]. 华南地震, 2008, 28(1): 21-28.
- [19] 卫小冬, 赵明辉, 阮爱国, 等. 南海中北部 OBS2006-3 地震剖面中横波的识别与应用[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(5): 72-80.
- [20] 卫小冬, 赵明辉, 阮爱国, 等. 南海中北部陆缘横波速度结构及其构造意义[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3150-3160.
- [21] ZELT C, SMITH R. Seismic travel time inversion for 2-D crustal velocity structure[J]. Geophys J Int, 1992, 108: 16-34.
- [22] KODAIRA S, BELLENBERG M, IWASAKI T.  $V_p/V_s$  ratio structure of the Lofoten continental margin, northern Norway, and its geological implications[J]. Geophys J Int, 1996, 124: 724-740.
- [23] 赵明辉, 丘学林, 夏少红, 等. 南海东北部三分量海底地震仪记录中横波的识别与分析[J]. 自然科学进展, 2007, 17(11): 1516-1523.
- [24] ZHAO MINGHUI, QIU XUELIN, XIA SHAOHONG, et al. Seismic structure in the northeastern South China Sea: S-wave velocity and  $V_p/V_s$  ratios derived from three-component OBS data[J]. Tectonophysics, 2010, 480: 183-197.
- [25] 阎贫. 海底地震仪记录中的横波[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(1): 115-118.
- [26] TINIVELLA U, ACCAINO F. Compressional velocity structure and Poisson's ratio in marine sediments with gas hydrate and free gas by inversion of reflected and refracted seismic data (South Shetland Islands, Antarctica)[J]. Marine Geology, 2000, 164:13-27.
- [27] 黄绪德. 地震勘探直接找油气在国外的最新发展[J]. 勘探地球物理学进展, 2004, 27(3): 218-227.