

文章编号: 1004-4140 (2004) 01-0048-06

海域岩石圈三维结构研究中地震方法的应用

张锡林

(国土资源部广州海洋地质调查局, 中国广州 510760)

摘要: 岩石圈三维结构的研究, 尤其是海域岩石圈三维结构的研究, 需借助地球物理勘探手段。本文主要讨论南海海域岩石圈三维结构研究中所采用的几种地震勘探方法以及它们的应用效果, 其中包括单船反射地震勘探、双船反射、折射地震勘探、海底地震接收以及地震层析成像等。

关键词: 三维; 岩石圈结构; 海域; 地震勘探

中图分类号: P315.3¹ 文献标识码: A

Seismic Method and Its Applications In Research on Lithosphere 3D Structure in Sea Areas

ZHANG Xi-lin

(Guangzhou Marine Geological Survey MLR, Guangzhou 510760, China)

Abstract: The means of geophysical exploration are needed in the research on lithosphere 3D structure, especially in sea areas. This article mainly concerns a few of seismic methods as the seismic reflection exploration, ASP, ESP, OBS, tomography and its application effect in South China Sea areas.

Key words: 3D; lithosphere structure; sea area; seismic methods

1 引言

海洋地震勘探, 早期主要用于海区陆架盆地的石油调查工作; 随着调查工作的深入, 人们希望利用多道反射地震勘探手段去研究海洋地壳结构, 采用新的观测系统, 利用大震源, 在加大排列长度、增加叠加次数的条件下, 得到了地壳底部莫氏面附近的地层反射结构剖面; 进一步的工作, 还为地壳-上地幔结构的研究提供了有用的资料; 海洋岩石圈三维结构的研究, 要求提供岩石圈三维物性, 地震层析技术为构筑岩石圈三维空间分布中的n维地球物理数据矩阵数据库提供了雏型^[1, 2, 6]。

2 海洋地震方法

2.1 单船反射地震勘探

2.1.1 海洋反射法地震勘探

通常采用多道(24、48、96等)地震电缆接收系统, 接收人工震源发出、经地球内部各反射源体返回的信号(图1), 再经内业地震资料处理后, 得到反射地震剖面(图2)。海上地震勘探的震源通常采用空气枪阵, 偏移距和道间距一般为300和50m, 由于排列长度、偏移距及震源能量的限制, 在岩石圈三维结构的研究中, 主要解决上地壳层中的结构问题。

2.1.2 长排列、大容量震源反射地震勘探

在上述常规海洋反射地震勘探的基础上, 对震源组合进行改组, 加大组合震源的能量, 同时加长

*收稿日期:2003-12-08。本研究获得国土资源部科技司“中国岩石圈三维结构专项计划”资助。

接收电缆以增加接收道数, 改善常规海洋反射地震勘探中, 由于排列长度、偏移距及震源能量限制而造成中、深层接收信号弱和无法接收的缺陷。资料显示^[1]单船的长排列、大容量震源反射地震剖面已能反映深达90km处的反射。

2.2 双船反射、折射地震勘探

合成排列剖面^[2, 3](Synthetic Aperture Profile SAP) 和扩展排列剖面(Expanded Spread profile ESP)是采用双船地震勘探方法研究海洋地壳-上地幔结构的两种方法。

2.2.1 SAP方法的观测系统由两条地震船组成

每条船皆装备震源系统, 多道地震电缆接收系统和数字地震记录系统, 以及双船地震控制系统(图3)。工作时, 两条船在同一条测线上, 以相同的航速按同一方向沿同一测线前进, 船间距离保持不变。船间距离约等于两条船排列长度之和。工作时, 两条船根据控制系统中预定的程序, 各船交替激发自己的震源, 并记录本船和它船所激发的地震信号。这样, 可以采集地下同一深度点的不同偏移距的多道地震射线, 组成一个较大偏移距(由观测系统确定, 即根据两船的电缆长度、船间距等决定)的共同深度点(或共反射点)道集。沿测线, 每一个炮点距(通常为50m)可采集到一个如上述的道集, 由此可得到一条具深反射信息的地震剖面。道集中小偏移距射线对浅层反射有利, 大偏移距射线则记录深层信息。由多组偏移距射线迭加组合成反射地震剖面, 可得到一条高质量的地壳反射剖面, 主要为研究地壳结构提供信息。SAP则为反映一定深度的地震反射剖面(图4)。

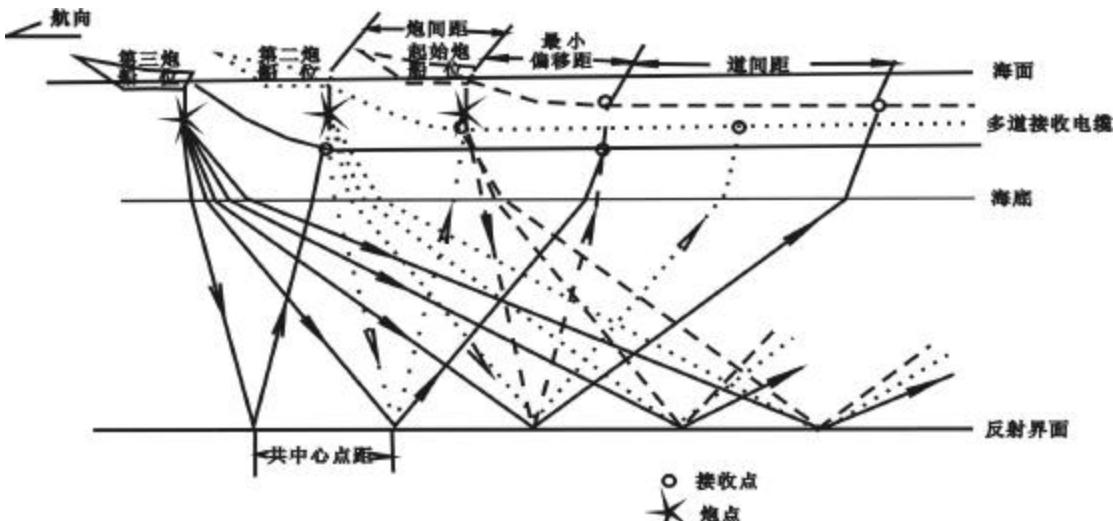


图1 海洋多道反射地震勘探工作原理示意图

2.2.2 ESP是一种共中心点反射-折射方法(图5)

海上工作时, 由分别装载地震接收电缆及作为地震震源的气枪阵组的两艘船共同完成。其中一艘作为震源船、另一艘则作为地震数据接收、采集用船。两船以相向或相背的航向在同一直线上作匀速航行, 并按事先设定的控制程序要求, 放炮和接收。ESP得到的结果为一速度-深度函数(图6)。

2.3 海底地震仪^[4](Ocean Bottom Seismometers OBS)

为一种置于海地接收地震信息的装置与常规海上船载地震勘探仪器的布设方式不同, 它的接收装置沉放布置在海底, 资料采集完后回收, 将其中记录的数据回放、处理。海底地震仪与船载电缆近海面的水听器接收相比具有以下优点: (1) 因接收点位置相对固定, 可减少在勘探过程中由于位置偏差造成的地震剖面畸变; (2) 接收装置布设于海地, 可避免近海面的噪声干扰; (3) 地震波在海水中的传播路段的减少, 使之可更好地记录到深部勘探层的信息; (4) 大偏移距, 也有利于得到深部信息; (5) 多分量检波器的采用, 既能够接收纵波, 也能直接接收横波, 增加了可用信息量。

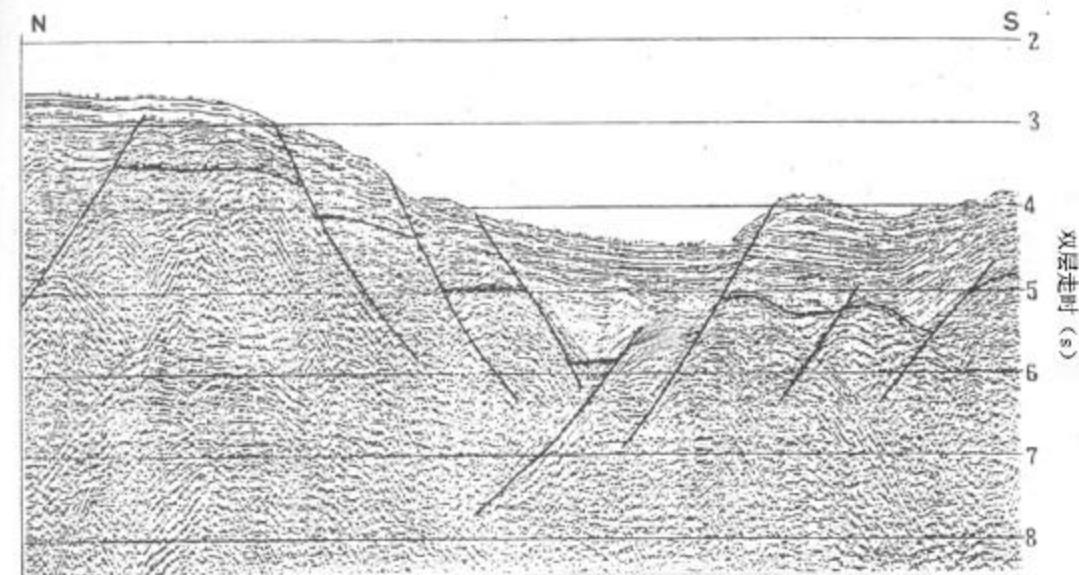


图 2 南海单船多道反射地震剖面（反映了地壳上部的详细结构）

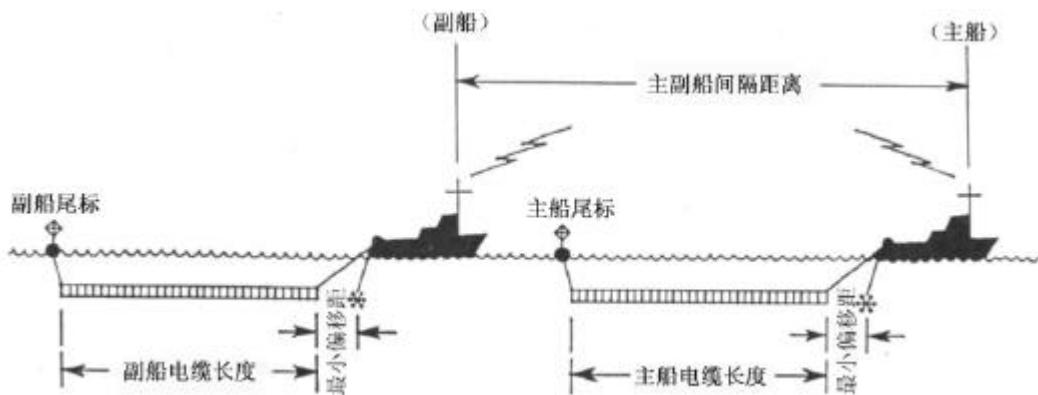


图 3 海上双船 SAP 工作系统示意图

海底地震记录中的信噪比一般较高,能够记录到来自莫霍面及其以下的地震波。如中科院南海研究所与日本东京大学地震研究所等在南海北部共同开展的综合地球物理测量试验中,得到南海某些 OBS 的气枪记录中,可以识别到地壳内若干层位的折射波震相。在距检波器 30km 以外的范围内,显示出来自莫霍面的 PmP 震相(视速度大于 8 km/s);在 160 km 以外,还有视速度更高的震相(视速度大于 9 km/s, 大约在莫霍面以下 30~40 km)。

2.4 地震层析成像是利用地震射线追踪成像的一种技术

它能得到解决海洋岩石圈三维结构研究中、深层结构的有用信息。目前主要有体波法和面波法,朱介寿等^[5]认为,用面波研究地壳上地幔三维速度结构主要有两种:一是频散反演方法,它假设面波沿大圆路径传播,测定相速度或群速度频散曲线,再得到各网格的纯路径频散曲线,然后反演地震波三维速度结构。二是面波波形反演法,用基阶和高阶面波波形拟合反演三维速度结构。随着计算能力的提高和众多数字台网的建立,利用波形记录中丰富的信息,可对地壳上地幔精细结构进行研究^[3, 4, 5]。

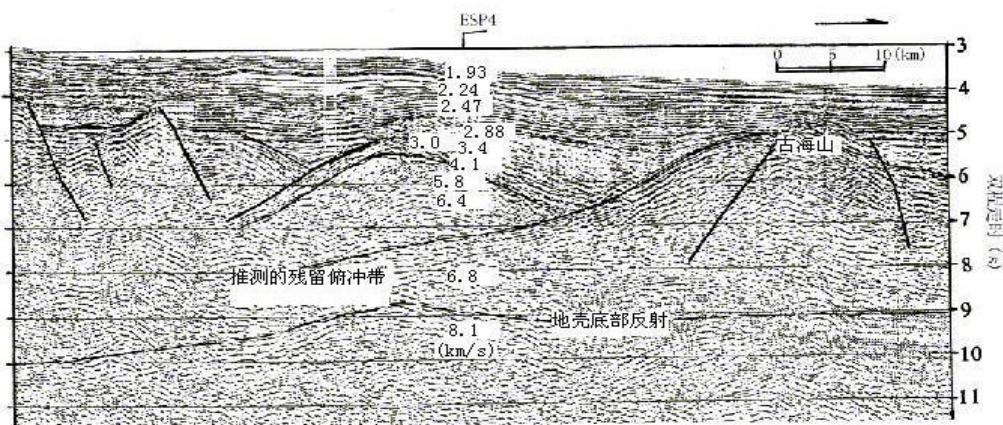


图4 南海陆坡区合成排列剖面(SAP)

(显示了莫氏面反射及地壳的结构, ESP4 为扩展排列在此处的结果, 由图可见两者有较好的一致性。)

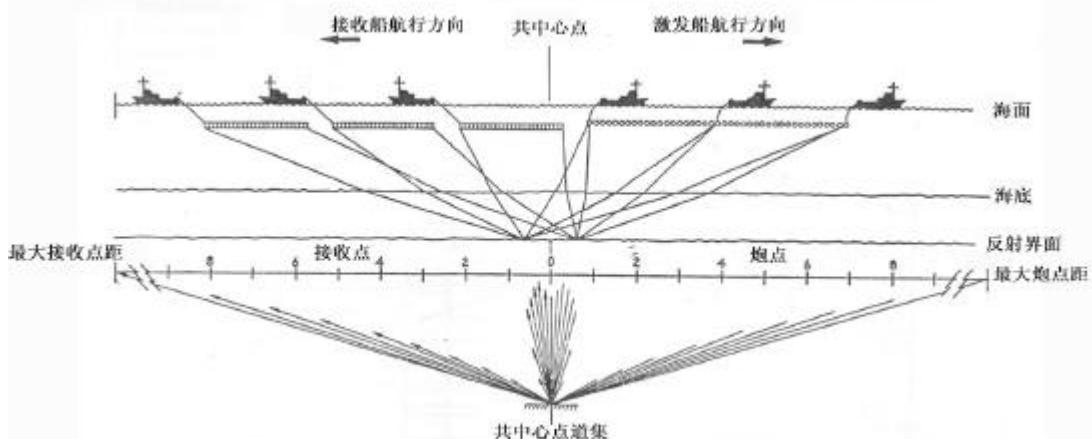


图5 扩展排列剖面(ESP)海上工作原理示意图

3 应用效果

南海岩石圈三维速度及密度结构主要由地震层析给出, 在地震层析计算前, 首先采用了上述反射、折射地震勘探及综合地质、地球物理的成果资料, 对本区地壳基本数据进行了综合采集建模, 地震层析是在此基础上进行的。以下实例为沿纵贯南海的广州-巴拉望剖面的岩石圈速度及密度结构, 反映了海洋地震勘探方法在岩石圈三维结构研究中的应用效果。图7、8为沿广州-巴拉望剖面的速度结构, 剖面由北向南分别经过华南三水盆地、北部陆缘珠江口盆

地、南海中央海盆、南海南缘礼乐滩-巴拉望盆地、苏禄海北缘。其中图(7)为地表至 250 km 深度纵波

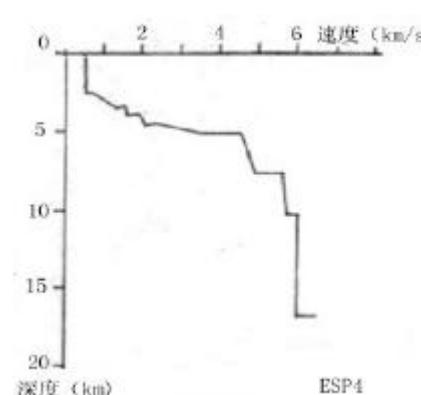


图6 由ESP探测到的南海陆坡区地壳速度结构

的速度结构, 由图可见, 莫氏面以上的纵波速度小于 6.7 km/s , 第一低速带出现在 80 km 左右, 速度小于 8.1 km/s , 厚度约 130 km 左右, 呈北部小、南部大的趋势, 在中央海盆区, 纵波速度达 8.1 km/s 的深度 30 km 左右。图 8 为相同剖面上横波的速度结构, 莫氏面上下横波速度以 3.7 km/s 为界, 沿本测线, 横波速度在 $4.4 \text{ km/s} \sim 4.5 \text{ km/s}$ 的区间在 $30 \text{ km} \sim 240 \text{ km}$ 左右, 中央海盆区横波速度梯度较大, 在 30 km 左右达到 4.4 km/s , 南北两侧则达到 4.4 km/s 的深度略大, 在 $40 \text{ km} \sim 50 \text{ km}$ 左右。同时, 在中央海盆区, 深度 $35 \text{ km} \sim 95 \text{ km}$ 出现一大于 4.4 km/s 的横波速度层。

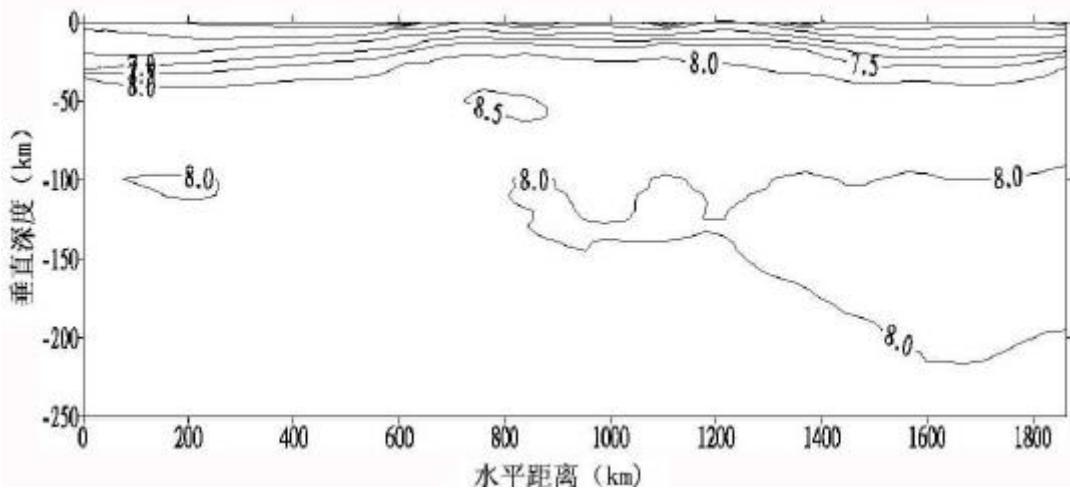


图7 沿广州-巴拉望 (地表至250km深度) 纵波速度剖面 (等值线单位: km/s)

图9 为沿上述同样位置的密度剖面。从剖面北端 (剖面左边) 到南端 (剖面右边), 沿剖面, 地壳厚度由北部华南的 30 km 左右向南逐渐减薄, 至中央海盆约为 10 km , 南海南缘地壳厚度又快速增厚至 28 km 左右, 苏禄海北缘的地壳厚度又有所减薄, 约为 15 km 左右。壳/幔层的岩石密度变化反映在 2.95 g/cm^3 线上下。在南海中央海盆下, 高密度 (3.35 g/cm^3) 物质明显抬升 (抬升至约 25 km 左右), 且厚度增大。密度减小层 (密度随深度的增加, 保持不变或略有减小的区间) 出现在深度 $80 \sim 230 \text{ km}$ 之间, 南侧略厚, 如岩石圈底界面, 按密度减小层顶面来定的话, 则沿此线岩石圈厚度约为 $80 \sim 100 \text{ km}$ 。

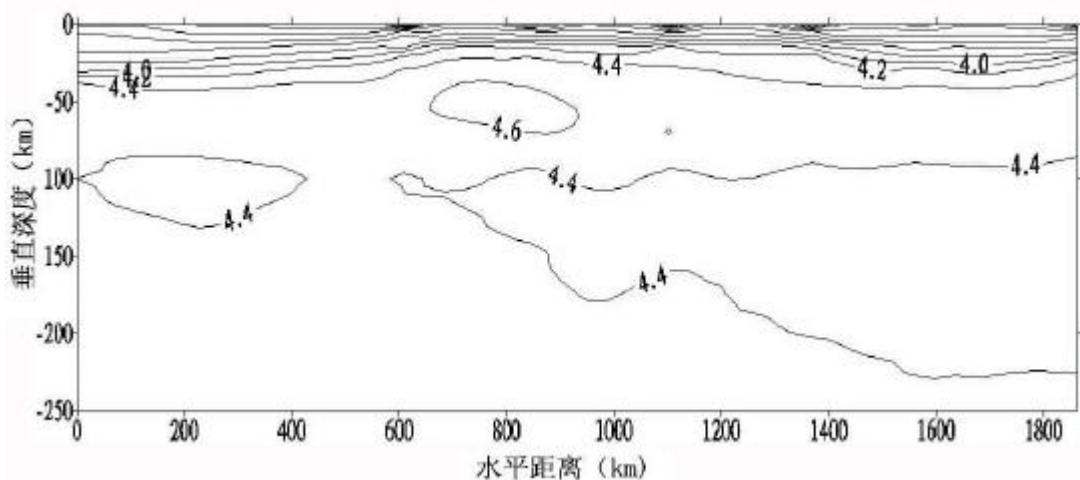


图8 沿广州-巴拉望 (地表至 250km 深度) 横波速度剖面 (等值线单位: km/s)

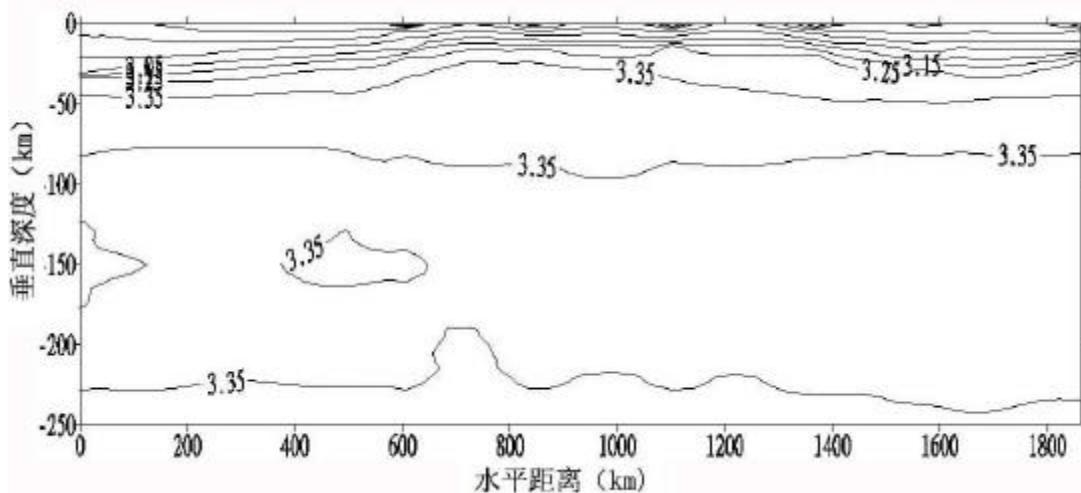


图9 沿广州-巴拉望（地表至250km深度）密度剖面（等值线单位: kg/m^3 ）

4 结论

海域岩石圈三维结构研究中, 各种海洋地震勘探方法有其各自的特点, 必须配合使用。在一定的地震、地质条件下, 单船反射地震法能获得勘探区地壳各反射层形态参数及部分岩石物性参数; 双船扩展排列剖面、海底地震接收系统能提供地壳及部分岩石圈上地幔的结构及物性信息; 地震层析应在上述勘探资料的基础上构筑地壳模型, 通过地震层析成像技术的应用, 可获得地壳以下岩石圈内部的速度变化规律, 进一步推测岩石圈内部的速度、密度分布及岩石物性的变化。

参考文献:

- [1] MONA LISA working Group. MONA LISA Deep seismic investigations of the lithosphere in the south eastern North Sea[J]. Tectonophysics, 1997, 269(1-2): 1~19.
- [2] 姚伯初, 曾维军等. 中美合作调研南海地质专报[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.
- [3] 姚伯初. 用海洋地震方法研究岩石圈结构[J]. 地学前缘, 1998, 5(1-2): 111~118.
- [4] 阎贫, 刘昭蜀, 姜绍仁. 南海北部地壳的深地震地质结构探测[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(2): 21~27.
- [5] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林等. 东亚及西太平洋边缘海域高分辨率面波层析成像[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5): 646~663.
- [6] 黄永平, 夏代学. 高分辨率三维地震勘探技术在冀北油田的应用[J]. CT理论与应用研究, 2002, 11(2): 5~8.

作者简介: 张锡林 (1957-), 男, 高级工程师, 1982年毕业于同济大学海洋地质系、海洋地球物理勘探专业获学士学位, 主要从事海洋地球物理勘探资料处理及综合地质地球物理资料解释研究。 E-mail: zhangxilin@hydz.cn