

郝天珧, 黄 松, 徐 亚等. 南海东北部及邻区深部结构的综合地球物理研究. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1785~1796

Hao T Y, Huang S, Xu Y, et al. Comprehensive geophysical research on the deep structure of Northeastern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(6): 1785~1796

南海东北部及邻区深部结构的综合地球物理研究

郝天珧¹, 黄 松¹, 徐 亚¹, 李志伟¹, 胥 颐¹, 雷受旻², 杨金玉²

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2 国土资源部青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

摘 要 南海东北部及邻区, 特别是洋陆转换带地区的复杂地壳结构特征一直是南海岩石层结构研究的热点. 本文在 Pn 波地震层析成像结果和深部地震探测剖面的约束下, 利用重力数据建立该区两条剖面的密度模型. 两条重力剖面二度半密度正反演的拟合结果支持琼粤隆起至吕宋岛弧区一带的地壳结构中存在下地壳高速层的观点, 同时认为台西南盆地的拟合结果表明南部凹陷区仍属于过渡型地壳. 本文认为剖面 AA' 和剖面 BB' 的构造属性虽然均总体倾向于火山岩型, 但二者的地质结构并不完全一致, 表明了北部陆缘深部结构的横向差异与构造属性的复杂.

关键词 南海东北部, 密度剖面, 反演, 拟合, 大陆边缘

文章编号 0001-5733(2008)06-1785-12

中图分类号 P542

收稿日期 2008-01-28, 2008-06-24 收修定稿

Comprehensive geophysical research on the deep structure of Northeastern South China Sea

HAO Tian-Yao¹, HUANG Song¹, XU Ya¹, LI Zhi-Wei¹, XU Yi¹, LEI Shou-Min², YANG Jin-Yu²

1 Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China

2 Qingdao Institute of Marine Geology, Ministry of Land & Resources of China,
Qingdao 266071, China

Abstract The feature of complex crustal structure in Northeastern South China Sea and adjacent region, especially in continental-oceanic boundary zone, is a keystone for lithosphere structure research of the South China Sea. The 2.5D density models are given in this paper according to gravity data constrained by Pn wave velocity tomography result and deep seismic sounding profiles. The 2.5D density modeling results support the view point that a high velocity layer exists in the lower crust in northeastern region (from Qiongyue lift to Luzon island arc) and indicate that the crust of southern depression of Taixinan basin should belong to transitional crust type. Although the tectonic feature in northeastern shelf of South China Sea belongs to volcanic type, the density and tectonic features of the two models are different, which indicates the complexity of crustal structure in northeastern shelf of South China Sea.

Keywords Northeastern South China Sea, Density profile, Inversion, Fitting, Continental margin

基金项目 国家基础研究 973 项目(2007CB4117-01), 863 计划(2006AA09A101-0201, 2006AA09Z359), 航遥中心项目联合资助.

作者简介 郝天珧, 女, 生于 1957 年, 1982 年毕业于长春地质学院, 研究员, 主要从事海、陆油气盆地综合地球物理研究.

E-mail: tyhao@mail.igcas.ac.cn

1 引言

南海是我国最大的边缘海,位于欧亚板块、菲律宾海板块和印澳板块的汇聚中心并经历了由主动大陆边缘向被动大陆边缘的演化过程^[1],无论在构造作用、沉积作用还是在岩浆活动方面都存在着丰富多彩的地质现象^[2~6],是研究边缘海形成演化的天然实验室.特别是近年来,随着 InterMARGINS 等国际计划的实施,有关南海大陆边缘的破裂机制与变形模式的研究^[4~6]、南海大陆边缘构造属性的研究,已逐渐成为全球海洋地质研究中的热点.

针对南海北部陆缘区的研究工作,国内外已有许多成果发表^[1~8],极大地促进了对南海形成演化的认识.特别是在南海北部的一系列断陷盆地区开展的大量以油气为目标的地震勘探工作,为我们认识盆地结构和断裂体系提供了宝贵的背景资料^[9~11].但是,对前新生界分布范围以及南海东北部陆缘区深部结构特点的认识,仍主要来自于该区的多条 OBS、OBH 探测剖面或地震测深剖面的结果^[5,12~15].

近年来,陆续有学者利用天然地震数据进行大范围地震层析成像,勾绘南海地区岩石层内部结构^[3,16~18],为人们认识南海地质结构的特点提供了新的证据与数据源.但是,由于射线覆盖情况与分辨尺度的原因等,速度成像在勾绘莫霍面及上地幔的速度分布情况方面虽具有很好的效果,但对于壳内详细结构,特别是自新生界基底至莫霍面之间的详细结构情况的认识,还受到一定限制.针对这些原因,本文选择南海海区的两条剖面,以浅层反射地震剖面 and 深部层析成像结果作为约束和初始模型建立的条件,从研究区的重力数据出发,反演密度结构,探索一种从浅到深的综合地质地球物理反演与解释途径,为南海北部陆缘的深部结构及构造属性研究提供相应的地球物理依据.

2 数据与反演

研究区重力数据分布范围为:110°E~122°E, 14°N~25°N,区中分布有华南块体、吕宋岛弧、马尼拉海沟等构造单元,也包含了南海中央海盆、台西南

盆地、珠江口盆地、琼东南盆地等次级构造单元^[1],构造面貌丰富多彩.本文中的空间重力数据来自于全球卫星重力异常(Global seafloor topography from satellite altimetry),数据网格间距:2'×2';布格重力数据来自于《中国近海残留盆地研究数据库》^[1],数据网格间距 0.05°×0.05°,成图网格间距为 0.03°×0.03°,高斯投影.图 1 为研究区的空间重力异常图,图 2 为研究区的布格重力异常图.研究中采用二度半位场数据人机交互最优化反演程序进行物性反演,在岩石物性研究的基础上,以浅层的反射地震资料和深层的层析成像资料作为建模的约束条件,通过迭代拟合,反演物性结构,并根据密度反演结果,结合地质与层析成像结果进行综合地质地球物理解释.

剖面 AA'北起雷东凹陷,南至吕宋岛,全长约 1260 km.剖面端点位置分别为 112°E, 21°N(北)、122°E, 15°N(南),剖面方向为 SE120.96°,主要穿越了琼粤隆起区、珠江口拗陷区、双峰拗陷区、海盆北断拗、中央海盆区及吕宋岛弧等构造单元.剖面 BB'北起澎湖北港隆起,南至台西南盆地南部凹陷,全长 224.7 km,端点位置分别为 118.48°E, 22.83°N(北)、119.2°E, 21°N(南),主要穿越了台西南盆地.

2.1 空间重力异常特征

在南海东北部陆架地区,空间重力异常主要反映出陆架盆地的范围与特征.在水深 50~1000m 的范围内,空间重力异常值大都在-30~+30 mGal 之间分布.最大值位于台西南盆地中部,达到 60 mGal.东北部陆架地区分布有珠江口、琼东南、台西南、雷东等大小不一的新生代盆地^[1],发育有厚度不一的古近纪、新近纪地层^[19].迄今为止,对这些新生代盆地之下的前新生代盆地基底结构的认识还有待进一步深入.

中央海盆区的空间重力异常特点与陆架区的最大差异在于以大面积的低值正异常为特点,在黄岩岛以东、以北海区可以达到+80 mGal 以上,局部小的起伏较多,反映出海山的分布.在马尼拉海沟一带呈现近 SN 向的狭长状的负异常沿海沟方向分布,最大值可以达到-140 mGal;与之形成强烈对比的是吕宋岛弧区的近 SN 向的正异常,最大异常值达到 190 mGal 以上,是研究区中异常变化较为剧烈的地区.

1) 郝天珹等.“中国近海前新生代油气资源地球物理地球化学探测技术研究”报告,2005,中国科学院地质与地球物理研究所

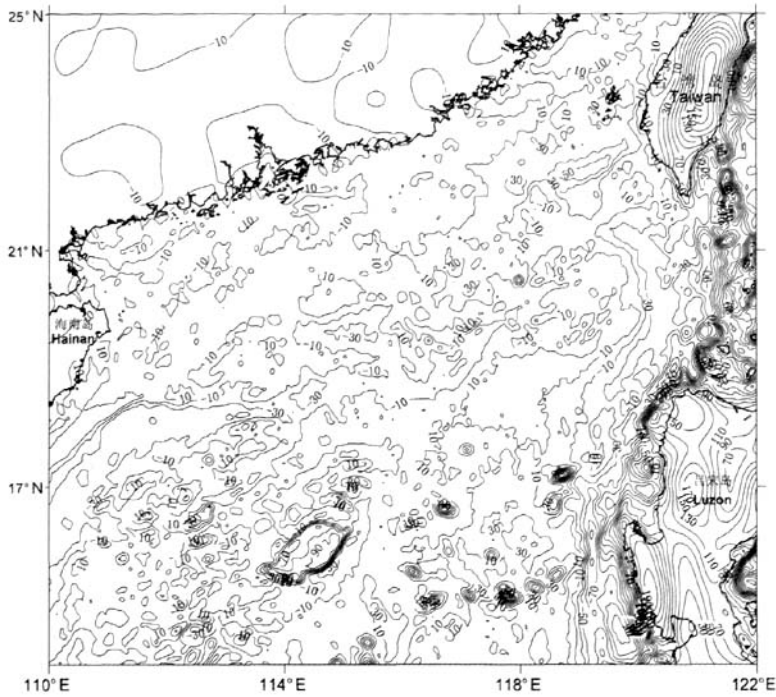


图 1 南海东北部空间重力异常图(单位:mGal)

Fig.1 Free-air gravity anomaly of the Northeastern South China Sea (unit: mGal)

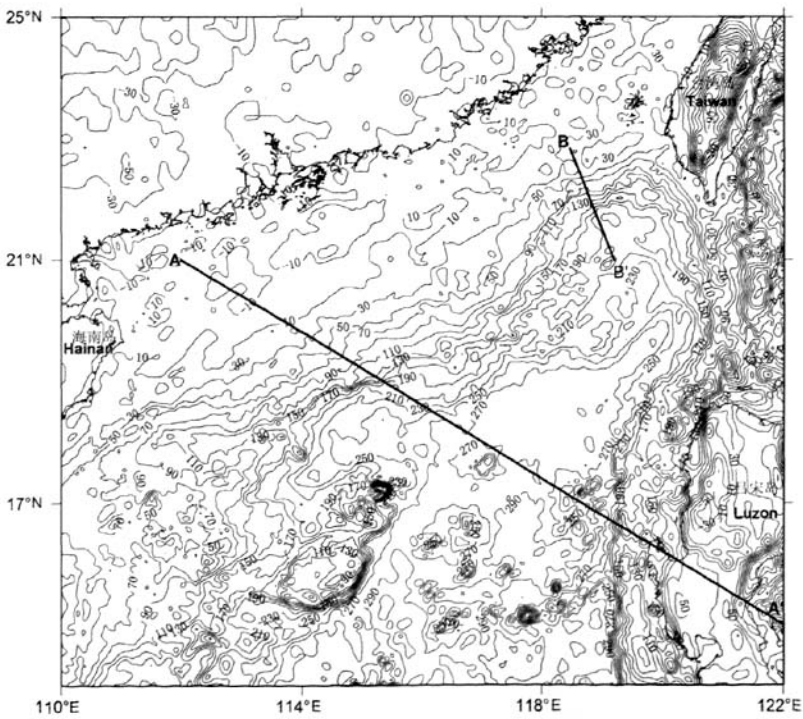


图 2 南海北部布格重力异常图(单位:mGal)和剖面 AA'、BB' 的位置

Fig.2 Bouguer gravity anomaly of the Northeastern South China Sea and location of profile AA' and BB' (unit: mGal)

2.2 布格重力异常特征

从布格重力异常面貌特征上看(图2),分区性十分明显.其总体趋势从陆区的负值向海区的正值过渡,在中央海盆区达到最高(300 mGal).布格重力异常变化与构造的分布具有对应关系.岛弧区表现为负异常,而海沟的位置则与狭长的正异常带相对应,全区地壳物质密度很不均匀.同时,在吕宋岛弧和陆架与陆坡的转变带等地区表现为明显的重力梯度带,应是不同构造单元边界的反映.从陆坡向洋盆过渡处,重力异常也存在较大的变化.

重力拟合迭代采用的是布格重力异常数据.剖面 AA'全长约 1260 km,穿越了多个不同构造单元,异常变化幅度较大,从-20~+290mGal 之间分布.总体趋势是海盆区为高值异常,陆架、岛弧区为低、负异常.剖面 BB':从北向南布格重力异常值逐渐增加,最大值位于台西南盆地南部凹陷的南端,为 220 mGal;最小值位于北部凹陷的北段,30 mGal 左右;彭湖北港隆起区异常值在 40~50 mGal 之间分布.

2.3 重力剖面数据迭代反演结果

正、反演拟合迭代之前,首先利用调和系数法对研究区的莫霍面深度分布进行了计算,给出了研究区莫霍面深度的分布特点(图3),并为初始模型的

建立提供了有关深部界面起伏的资料.计算中地壳与地幔的标准密度差选用 0.3 g/cm^3 ,考虑到研究区有海有陆,平均深度选用 24km.除了参考本区的莫霍面深度分布数据外,密度初始模型的建立中还参考了《中国近海前新生代油气资源地球物理地球化学探测技术》研究报告中有关南海重力基底、磁性基底分布的结果^[1]及其他一些地球物理资料^[20].对于珠江口等盆地区,则主要收集大量的油气地震勘探的结果,作为浅部密度建模的初始和约束条件,通过正、反演迭代,使理论计算曲线与实测曲线逐渐拟合,最终得到合理的密度分布模型及其相应的地质解释.图4和图5分别为剖面 AA'和剖面 BB'的拟合计算结果.图中实线为实测数据,虚线为正演理论计算结果.除了在边缘部分存在一定边界效应外,总体拟合结果较好,两条剖面的拟合均方差分别为 6.18 mGal 和 4.34 mGal.

2.4 Pn 数据层析成像

地震数据来自 1980~2004 年期间中国地震台网和 ISC 台站的 Pn 波到时资料.中国地震台网主要提供了东南大陆及沿海地区的地震数据,吕宋岛弧地区及菲律宾北部数据主要来自 ISC 的台站补充,Pn 波到时随震中距的变化拟合情况参考文献[17].采用 Hearn^[21]提出的方法反演了 $105^{\circ}\text{E}, 5^{\circ}\text{N} \sim 130^{\circ}\text{E}$,

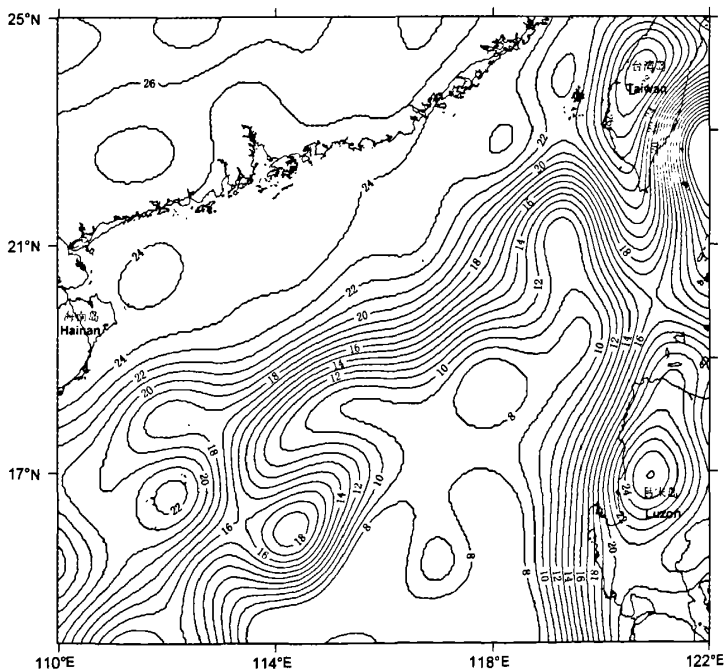


图3 南海东北部莫霍深度分布图(单位:km)

Fig. 3 Distribution of Moho depth in Northeastern South China Sea(unit:km)

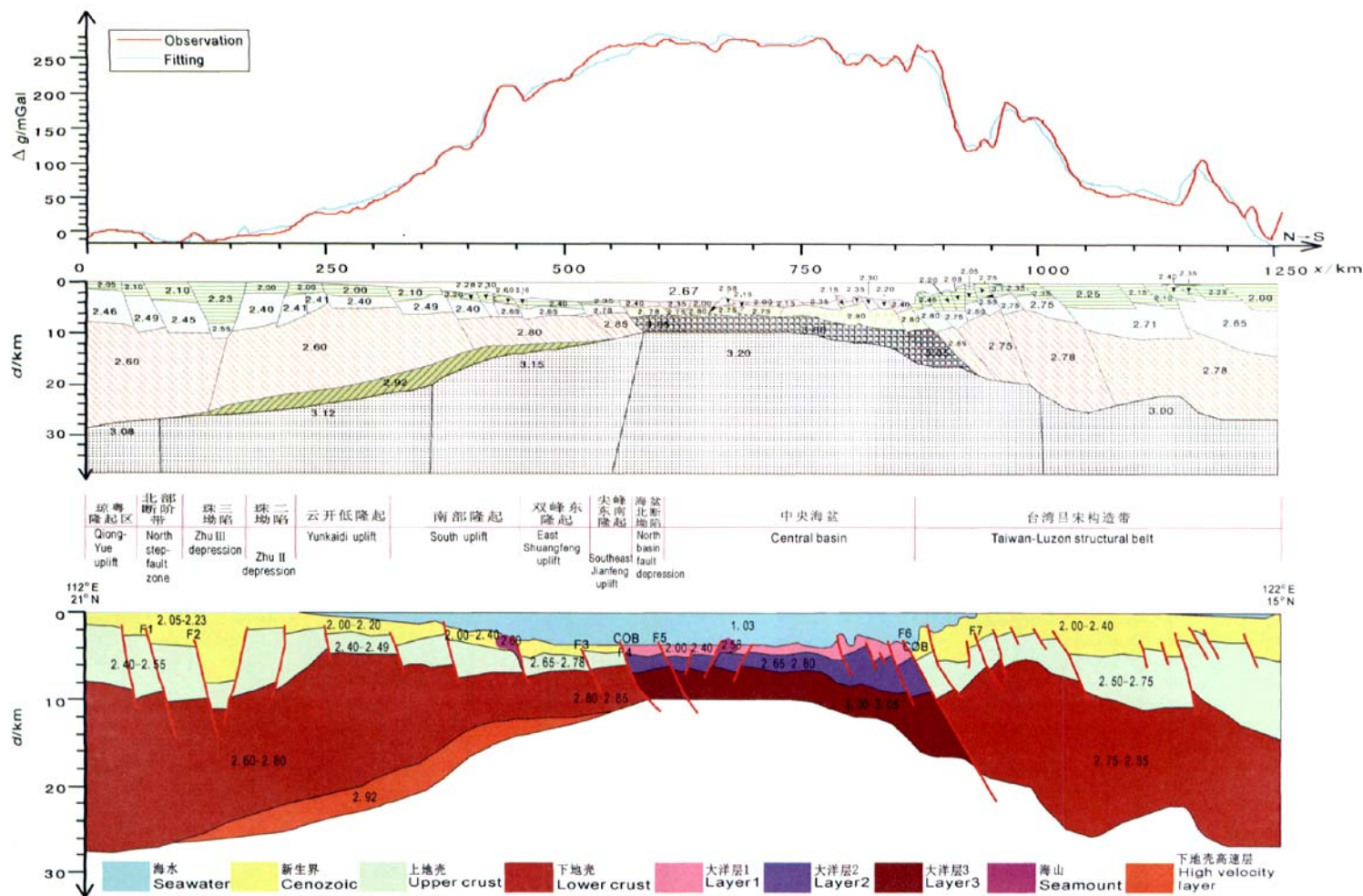


图4 自琼粤隆起至台湾吕宋构造带的二度半密度(g/cm^3)模型剖面(剖面AA')

Fig.4 Vertical cross section (section AA') of 2.5D density (g/cm^3) model through Qiongyue uplift to Taiwan-Luzon Tectonic belt

30°N 范围内的 Pn 波数据(图 6). 上地幔水平方向网格间距为 0.5°×0.5°. 地壳厚度参考了相对平滑的全球速度模型 CRUST2.0, 初始模型的平均地壳厚度和 Pn 波平均速度为 32 km 和 7.9 km/s, Checkerboard 测试结果参见文献[17].

3 物性分析

物性是重力反演的基础与前提. 为了建立合理的密度模型, 本文调研了研究区大量的密度数据与资料进行了分析、归纳和总结, 作为正反演拟合的基础. 密度数据有些来自于周边地区出露岩石的实测结果(表 1~表 4)^[1~4], 有些则来自于地震测深剖面的速度/密度转换^[12~15, 19, 22~26]. 很显然, 岩浆岩的密度明显大于正常地层的密度, 尤其是橄榄岩类; 变质岩密度也较高, 但是不同的变质岩类型密度情况变化较大, 同一地区不同位置的岩石、地层密度情况也有所不同. 姚伯初等^[27]认为北部陆缘区上地壳沉积层的 P 波速度为 1.6~5.0 km/s, 结晶层为 5.0~6.4 km/s, 平均密度为 2.55 g/cm³; 而下地壳的平均密度可以达到 2.9 g/cm³. Qiu Xuelin 等^{[12]3)}则根据西沙海槽地区的速度和重力模拟结果, 认为下地壳的密度在 2.83 g/cm³, 上地壳的平均密度为 2.77 g/cm³.

表 1 南海潮汕拗陷地层密度资料¹⁾

Table 1 Strata density in Chaoshan depression, South China Sea¹⁾

地层	密度(g/cm ³)
海水	1.03
新生界	2.24~2.39
白垩统-中侏罗统	2.53
下侏罗统-上三叠统	2.59
前中生界	2.67~2.72
Moho 以下	3.30

表 2 南海北部陆架区岩石密度(g/cm³)^{1~3)}

Table 2 Density of rocks in northern shelf of South China Sea^{1~3)}

时代	中生代沉积岩	早古生代沉积岩	早古生代灰岩、白云岩、砂砾岩	早古生代砂、页岩	前寒武纪至早古生代
密度	2.4~2.5	2.52~2.8	2.69~2.83	2.39~2.67	2.08~3.10

表 3 南海北部变质岩密度(g/cm³)^{1~3)}

Table 3 Density of metamorphic rocks in northern shelf of South China Sea^{1~3)}

混合岩	斜长片麻岩	角闪岩	变质粉砂岩	花岗岩	石英二长岩	闪长岩
2.7	2.71~2.83	2.71~3.0	2.74	2.62	2.54	2.68~2.7

表 4 南海北部岩浆喷发岩密度表(g/cm³)^{1~3)}

Table 4 Density of volcanic rocks in northern shelf of South China Sea^{1~3)}

流纹斑岩	中性火山岩	新生代玄武岩	凝灰岩
2.6	2.5	2.47~2.79	2.35~2.69

表 5 反演建模采用的密度参数

Table 5 Densities used in the modeling

模型块体	密度(g/cm ³)
海水	1.03(布格校正密度为 2.67)
新生代地层	2.00~2.44
中生代地层	2.40~2.60
上地壳	2.40~2.70
中地壳	2.50~2.80
下地壳	2.65~2.95
下地壳高速层	2.85~2.95
大洋层 1	2.00~2.40
大洋层 2	2.65~2.80
大洋层 3	2.90~3.05
岩浆岩侵入体	2.54~2.62
海山	2.50~2.69

表 6 迭代拟合反演密度

Table 6 Densities from iterative inversion

模型块体	密度(g/cm ³)
海水	2.67
北部陆缘新生代沉积	2.05~2.23
南部陆缘新生代沉积	2.00~2.40
中生代地层	2.40~2.66
上地壳	2.40~2.75
中地壳	2.50~2.75
下地壳	2.60~2.95
下地壳高速层	2.92
大洋层 1	2.00~2.40
大洋层 2	2.65~2.80
大洋层 3	3.00~3.05
岩浆岩侵入体	2.60
海山	2.58

2) 刘光鼎等. 南海北部陆架西区盆地地区地球物理特征及深部结构研究(研究报告). 1994, 中国科学院地球物理研究所

3) 郝天珧等. 中国边缘海岩石层结构(973 项目研究中期评估报告). 2002, 中国科学院地质与地球物理研究所

综合前人研究结果,本文建模中采用的密度参数参见表 5. 表 6 给出的是两条剖面迭代拟合反演最终密度分布.

4 重力迭代拟合与综合地球物理解释

4.1 剖面 AA'

剖面 AA' 的北部与 Yan P 等^[13] 2001 年发表的北部陆缘 OBS 探测剖面的位置十分接近,在初始模型的建立过程中,文献[13]是重要的参考之一. 密度模型还参考了相应的反射地震剖面解释^[1] 及本区前人的地质研究结果^[15~32]. 根据密度模型,地壳结构可以分为上下两层:上地壳密度在南海北部陆缘地区横向变化较大,在 $2.40 \sim 2.78 \text{ g/cm}^3$ 之间分布,反映出上地壳密度分布的横向不均匀性. 自琼粤隆起到珠二拗陷地区,上地壳厚度较大,厚度在 $6 \sim 7 \text{ km}$ 左右(珠三拗陷区除外),密度在 $2.40 \sim 2.55 \text{ g/cm}^3$ 之间. 自云开隆起到尖峰东南隆起一带上地壳厚度逐渐减薄到 $2 \sim 3 \text{ km}$ 左右. 但这一带上地壳的密度有所提高,为 $2.65 \sim 2.78 \text{ g/cm}^3$;剖面的南端为吕宋岛弧区,属于台湾-吕宋构造带的范畴. 地壳内的密度结构与南海北部陆缘区存在明显差异. 南海块体向吕宋块体之下俯冲的踪迹十分清晰,吕宋岛弧一带下地壳中也没有高密度层存在. 上地壳的平均密度高于南海北部陆缘区,达到 $2.50 \sim 2.75 \text{ g/cm}^3$;下地壳平均密度为 $2.75 \sim 2.85 \text{ g/cm}^3$.

胥颐等^[17] 给出的南海东北地区 Pn 波速度分布结果(图 6)表明:吕宋岛弧地区显示出大面积的低速,原因来自于南海块体和菲律宾海板块的双向俯冲作用^[17],地壳强烈缩短^[33],地震和火山活动剧烈,上地幔存在低速层,这些是引发该地区 Pn 波速度偏低的主要原因. 本文的反演解释结果也支持这样的观点. 本文认为:吕宋岛弧地区莫霍面深度应小于 30 km ($20 \sim 27 \text{ km}$ 左右),下地壳的厚度较大,地壳确实存在缩短的现象. 值得注意的是在马尼拉海沟处,地壳处于减薄状态^[34,35]. 与文献[17]的速度结果相一致的是:在马尼拉海沟处地壳厚度在 10 km 左右,南海大洋块体明显地向吕宋岛弧之下俯冲,具有俯冲前缘的地质特点. 但是,正如刘光鼎等^[1] 指出的那样,尽管震源深度的分布显示出南海块体的俯冲角度为 55° 左右,但是这种俯冲活动在现代已经减弱. 吕宋岛弧地区在双向俯冲的夹持下(南海块体的东向俯冲和菲律宾海板块沿菲律宾海沟西向俯冲),岩石层受到以近 EW 向为主的聚敛应力作用,

引发了地壳的缩短. 这一点可以从地幔盖层上部和下部快波的展布方向上得到体现^[36],剖面 AA' 上吕宋岛弧东侧的推覆构造同样也反映了这一特征,俯冲前缘的碰撞挤压导致了岩石层的变形. 值得关注的是:吕宋岛弧地区一系列东向倾斜断层大部分只切割了地壳的上部,反映出这一带上地壳的性质主要以脆性为主,与南海东部边界显著的低热流区背景的结论^[37,38] 相吻合.

大洋中的密度结构反演主要参考了来自速度的资料. 按照地震纵波传播速度与密度的统计关系曲线^[27],可以大致得到大洋地区的密度模型. 姚伯初等^[27] 曾根据南海地学断面附近的声纳浮标站资料揭示出层 1(沉积层)、层 2(基底)和层 3(大洋壳)的地壳结构. 剖面 AA' 的反演结果与之基本相同. 大洋层 1(沉积层)的厚度很薄,密度分布在 $2.00 \sim 2.40 \text{ g/cm}^3$ 之间,厚 $0.5 \sim 1.5 \text{ km}$;大洋层 2(基底)密度 $2.65 \sim 2.80 \text{ g/cm}^3$,基本与南海北部陆缘的下地壳相当,厚度 $1.5 \sim 3 \text{ km}$ 左右;剖面 AA' 反演出的大洋层 3(大洋壳)密度模型为 $3.00 \sim 3.05 \text{ g/cm}^3$,相当于速度在 $7.0 \sim 7.5 \text{ km/s}$ 之间,这与参考文献[27]中给出的速度结构基本相似.

大洋海盆中的地壳结构充分反映出新生代被动拉张的特点. 在海盆北拗陷和中央海盆中发育了一系列的断陷和正断层. 值得特别说明的是玳瑁海山,从密度模型推断,很有可能是喷溢的新生代玄武岩所形成,与 $15 \sim 20 \text{ mGal}$ 的局部异常所对应.

剖面 AA' 的反演结果表明南海北部陆缘的地壳结构特点与吕宋岛弧一带的地壳结构特点完全不同. 北部陆缘区的莫霍面埋深逐渐向海盆的方向抬升,在琼粤隆起区为 28 km 左右,在洋-陆交界带则逐渐变为 12 km 左右. 北部陆缘区的新生界表现出典型的陆缘拉张断陷盆地的特点,以珠三拗陷为断陷中心,新生代沉积厚度可达 8 km 左右,呈现由一系列正断层控制的地堑式断陷,与珠三拗陷两侧的北部断阶带和珠二拗陷形成了鲜明的对比. 这种明显的不一致性表明新生界基底的起伏对盆地沉积具有明显的控制作用,是“深层约束浅层”^[39] 的体现. 由于这一系列正断层的深度基本在 10 km 以上,而且控制了上地壳的厚度变化,因此推断断裂为继承发展的基底断裂,在前新生代地层形成期间就有所活动并控制了新生代基底的起伏.

北部陆缘的另一个最明显的特征就是存在下地壳的高速层. 这与 Niessen 等^[40] 及 Yan P 等^[13] 的结果基本相同. 同时,在南部隆起与双峰东隆起的交界

部位,上地壳和新生界中可以发现火成岩的存在,引起了约 50 mGal 左右的局部异常。根据文献[27]的结果推断,应为拉张形成的新生代花岗岩,虽然南海北部陆缘的构造属性带有火山型大陆边缘的一些特点^[41],但与标准的火山岩型大陆边缘又有一些不同。

4.2 剖面 BB'

剖面 BB' 全长 224.7 km,北起澎湖北港隆起,南至台西南盆地南部凹陷,基本为一条从陆架过渡到陆坡区、穿越了台西南盆地所有构造单元^[5,41]的剖面。作为研究南海形成演化的一个重要窗口,近年来在台西南盆地有大量的地质、地球物理工作开展^[5,14,41]。2001 年,作为边缘海 973 项目的一部分,广州海洋地质调查局的“探宝号”曾在此利用 3000 m 的拖缆在台西南盆地西侧完成了一条剖面的地震测深调查。丁巍伟等^[41]对剖面进行了处理,并根据前人的研究结果^[1~5,12~29]进行了地质解释并提供了很好的地震-构造模型。剖面 BB' 基本与 973 地震剖面中的一段重合,目的是研究台西南盆地自陆架向陆坡转换地带的密度结构分布与变化情况,并寻找洋、陆转换带密度变化的特点。

从剖面 BB' 的反演结果看,地壳的厚度向大洋方向逐渐减薄,北部陆缘澎湖北港隆起区为 24 km 左右,台西南盆地的南部凹陷区减薄到 12~13 km。新生代沉积厚度大部分在 2~3 km,剖面的南端则只有不到 1 km。新生界的密度分布横向变化并不大,在 2.05~2.30 g/cm³ 之间。与剖面 AA' 不同的是,剖面 BB' 揭示出有 2~4 km 左右的中生界存在,厚度由北向南逐渐减薄,平均厚度在 3 km 左右。南部凹陷的南端最薄,只有不到 2 km;厚度最大的地区位于北部凹陷和中央隆起,可以达到 4~5 km 左右。在这两个区段,中生界的密度基本一致,基本在 2.40~2.47 g/cm³ 之间分布。前人研究结果^[27]表明在中央隆起区,曾有钻井钻遇白垩系,证实了中生界的存在。南部凹陷中生界密度明显提高,为 2.50~2.66 g/cm³,表明南部凹陷与北部凹陷和中央隆起区相比,地层横向上发生了变化。根据近年来对潮汕拗陷的研究结果¹⁾,认为这一带不仅发育有中生代(T-K)的海相泥岩、海陆交互相砂岩等,同时也有酸性岩的侵入活动发生,中生界的残余厚度和面积都较大¹⁾,这也为本剖面的反演结果提供了相应的佐证。

台西南盆地的地壳基本可以分为上、中、下三层结构,从北段的 22 km 左右逐渐减薄到南端的 14 km 左右。地壳密度在横向上有一定的变化,南部凹陷普

遍高于北部地区。上地壳北部为 2.50~2.70 g/cm³,南部凹陷为 2.70~2.75 g/cm³;中地壳北部为 2.63~2.75 g/cm³,南部凹陷一带为 2.78~2.85 g/cm³;下地壳北部凹陷一带为 2.70~2.80 g/cm³,南部凹陷一带则为 2.80~2.95 g/cm³。在剖面的南端,重力异常出现明显的降低后又迅速上扬,推断是由于深部的岩浆岩体(2.62 g/cm³)侵入所引发。图 6 的 Pn 波速度成像结果表明,这一地区的速度分布在 8.0~8.1 km/s 之间,仍然属于大陆型岩石层地幔的范畴,这与剖面反演结果基本一致,推断南部凹陷应属于过渡地壳范畴。参考前人在这个地区工作的结果,推断剖面 BB' 的南端,可能距离洋陆转换带位置已经很近,但是从地壳厚度的变化情况和密度结构来看,本剖面南部凹陷部分应尚未进入洋陆转换带的范畴。

5 结论与讨论

(1)剖面 AA' 的反演结果表明:北部陆缘珠江口盆地区自北部断阶带至南部隆起区一带的地壳中有下地壳高密度层存在(2.92 g/cm³),与前人提出的下地壳高速层位置基本一致。但剖面 AA' 的综合地质地球物理解释结果虽然发现在陆缘区存在一些火成岩侵入,但较大规模的岩浆岩活动特点并不明显。与之相反,剖面 BB' 的南端虽然有较大范围的岩浆岩活动证据,但却未发现下地壳高密度层,与剖面 AA' 的密度结构也有较大不同。因此,可以认为:剖面 AA' 和剖面 BB' 的构造属性并不完全一致,表明了北部陆缘深部结构的横向差异与构造属性的复杂;

(2)剖面 BB' 从北到南地壳厚度逐渐减薄,并逐渐向洋壳过渡。但从综合地质资料和反演的地质结构、层析成像速度分布结果来看,台西南盆地南部凹陷一带应该仍然属于过渡地壳的范畴;

(3)吕宋岛弧明显地受到来自两侧板块的双向俯冲影响,岩石层受到变形改造,聚敛应力主要垂直于俯冲带^[38]。但是,吕宋岛弧地区大量向东倾斜断层的切割深度有限,很多没有进入到下地壳或上地幔的深度范围,因此推断这一带上地壳的性质应主要以脆性为主,俯冲前缘造成的挤压应力也主要作用于地壳的上部。

(4)两条剖面迭代拟合反演的最终密度分布与本区的实际密度参数吻合较好,表明反演剖面模型符合实际地质情况,结果可信。另外,从两条剖面反

演的密度结构可以看出,上地幔的密度从陆架—陆坡—洋盆—岛弧有一定的变化.这种变化除了与断裂带关系密切外,同样也反映了深部结构的横向差异.

致谢 本文得益于刘光鼎院士的学术思想,在此,对刘院士表示衷心的感谢!同时,感谢 973 计划项目(2007CB4117)首席科学家李家彪研究员的指导与大力支持.研究中得到了丁巍伟博士、丘学林研究员、姚伯初教授、万玲教授、姚永坚教授的无私帮助,在此一并致谢!感谢论文评审专家提供的宝贵意见和建议!

参考文献(References)

- [1] 刘光鼎主编. 中国海区及邻域地质地球物理系列图集. 北京: 科学出版社, 1992
Liu G D ed. Geophysical Series Maps in China Sea and Adjacent Regions (in Chinese). Beijing: Science Press, 1992
- [2] 中国科学院南海海洋研究所. 南海地质构造与陆缘扩张. 北京: 科学出版社, 1988
South China Sea Institute of Oceanology, CAS. Geological Tectonics and Continental Margin Extension in the South China Sea. Beijing: Science Press, 1988
- [3] 郑月军, 黄忠贤, 刘福田等. 中国东部海域地壳上地幔瑞利波速度结构研究. 地球物理学报, 2000, 43(4): 480~487
Zheng Y J, Huang Z X, Liu F T, et al. Rayleigh wave velocity and structure of the crust and upper mantle beneath the seas in eastern China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, 43(4): 480~487
- [4] 郝天兆, 刘建华, 黄忠贤等. 中国边缘海岩石层结构研究. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 583~589
Hao T Y, Liu J H, Huang Z X, et al. Research on the lithosphere structure of Chinese Marginal Seas. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004, 19(3): 583~589
- [5] 李家彪, 郑玉龙, 金祥龙等. 马尼拉俯冲带: 倾斜俯冲的地貌特征. 见: 李家彪、高抒主编. 中国边缘海岩石层结构与动力过程. 北京: 海洋出版社, 2003. 111~117
Li J B, Zheng Y L, Jin X L, et al. Manila subduction zone: geomorphology characters of the slantwise subduction. In: Li J B, Gao S eds. *Lithosphere Structure and Dynamic Process in China Marginal Sea* (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2003. 111~117
- [6] 赵明辉, 丘学林, 叶春明等. 南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析. 地球物理学报, 2004, 47(5): 845~852
Zhao M H, Qiu X L, Ye C M, et al. Analysis on deep crustal structure along the onshore-offshore seismic profile across the binhai (littoral) fault zone in northeastern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(5): 845~852
- [7] 胥颐, 刘建华, 郝天兆等. 中国东部海域及邻区岩石层地幔的 P 波速度结构与构造分析. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1053~1061
Xu Y, Liu J H, Hao T Y, et al. P wave velocity structure and tectonics analysis of lithospheric mantle in eastern China seas and adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(4): 1053~1061
- [8] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Basin. In: Hayes D E eds. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands*, Monogr. Ser. 1980, 23: 89~104
- [9] 龚再升, 李思田等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 1997
Gong Z S, Li S T, et al. *The Northern Continental Marginal Basin Analysis and Oil-gas Accumulation in South China Sea*. Beijing: Science Press, 1997
- [10] 杨少坤, 黄丽芬, 李希宗等. 珠江口盆地特殊层序地层学模式及其对勘探的指导意义. 中国海上油气(地质), 1996, 19(3): 139~143
Yang S K, Huang L F, Li X Z, et al. Special sequential stratigraphic pattern in the pearl river mouth basin and its significance to exploration. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 1996, 10(3): 139~143
- [11] 黎明碧, 金祥龙, 初凤友等. 神弧——统暗沙隆起中部新生代地层层序划分及沉积演化. 沉积学报, 2002, 20(4): 545~551
Li M B, Jin X L, Chu F Y, et al. Sequence division and sedimentary evolution of Cenozoic in the middle Shenhu-Yitong Ansha uplift. *Acta Sedimentologica Sinica* (in Chinese), 2002, 20(4): 545~551
- [12] Qiu Xuelin, Ye Sanyu, Wu Shimin, et al. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea. *Tectonophysics*, 2001, 341: 179~193
- [13] Yan P, Zhou D, Liu Z S. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 2001, 338: 1~21
- [14] Wang T K, Chen M K, Lee C S, et al. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 2006, 412: 237~254
- [15] 姚伯初, 曾维军, 陈艺中等. 南海西沙海槽, 一条古缝合线. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(1): 1~10
Yao B C, Zeng W J, Chen Y Z, et al. Xisha trough of South China Sea — an ancient suture. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 1994, 14(1): 1~10
- [16] 刘建华, 胥颐, 刘福田等. 中国边缘海及邻区体波地震成像. 见: 李家彪、高抒主编. 中国边缘海岩石层结构与动力过程. 北京: 海洋出版社, 2003. 3~7
Liu J H, Xu Y, Liu F T, et al. China marginal sea and body wave imaging in adjacent areas. In: Li J B, Gao S eds. *Lithosphere Structure and Dynamic Process in China Marginal Sea* (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2003. 3~7
- [17] 胥颐, 李志伟, 郝天兆等. 南海东北部及其邻近地区的 Pn 波速度结构与各向异性. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1473~1479
Xu Y, Liu J H, Hao T Y, et al. Pn wave velocity and

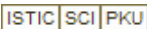
- anisotropy in the northeastern South China Sea and adjacent region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(5): 1473~1479
- [18] 彭艳菊, 苏伟, 郑月军等. 中国大陆及海域 LOVE 波成像. 地球物理学报, 2002, **45**(6): 792~801
- Peng Y J, Su W, Zheng Y J, et al. Love wave seismic tomography of China and vicinal sea arrears. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(6): 792~801
- [19] 龚再升, 李思田等著. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究. 北京: 科学出版社, 2004
- Gong Z S, Li S T, et al. Dynamic Research of Oil and Gas Accumulation in Northern Marginal Basins of South China Sea(in Chinese). Beijing: Science Press, 2004
- [20] 郝天晓, 刘建华, 宋海斌等. 华南及其相邻边缘海域一些重要断裂的地球物理证据. 地球物理学进展, 2003, **17**(1): 13~23
- Hao T Y, Liu J H, Song H B, et al. Geophysical evidence of some important faults in South China and adjacent marginal Seas region. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2003, **17**(1): 13~23
- [21] Hearn T M, Wang S, Ni J F, et al. Upper mantle velocities beneath China and surrounding regions. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, B11301, doi:10.1029/2003JB002874
- [22] 王家林, 吴健生, 陈冰等. 珠江口盆地和东海陆架盆地基底结构的综合地球物理研究. 上海: 同济大学出版社, 1997
- Wang J L, Wu J S, Chen B, et al. Comprehensive geophysical research on basement structure in Zhujiangkou basin and the shelf basin of the East China Sea (in Chinese). Shanghai: Tongji University Press, 1997
- [23] 王家林, 陈冰, 吴健生等. 潮汕坳陷沉积盆地基底结构和中生界综合地质地球物理研究. 见: 李家彪, 高抒主编. 中国边缘海岩石层结构与动力过程. 北京: 海洋出版社, 2003. 53~62
- Wang J L, Chen B, Wu J S, et al. Integrated geological and geophysical research on the base texture and Mesozoic of the sedimentary basin in Chaoshan depression. In Li J B, Gao S eds. *Lithosphere Structure and Dynamic Process in China Marginal Sea*(in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2003. 53~62
- [24] 郝沪军, 林鹤鸣, 杨梦雄等. 潮汕坳陷中生界——油气勘探新领域. 中国海上油气(地质), 2001, **15**(3): 157~163
- Hao H J, Lin H M, Yang M X, et al. The Mesozoic in Chaoshan depression: a new domain of petroleum exploration. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese). 2001, **15**(3): 157~163
- [25] 地质矿产部第二海洋地质调查大队. 南海地质地球物理图集(1:2000000). 广州: 广东省地图出版社, 1987
- 2nd Marine Geological Investigation Brigade Ministry of Geology and Mineral Resources. *Geology & Geophysics Maps in South China Sea (1:2000000)* (in Chinese). Guangzhou: Cartographic Publishing House of Guangdong Province, 1987
- [26] 姚伯初, 曾维军, Hayes D E 等. 中美合作调研南海地质专报. 北京: 中国地质大学出版社, 1994. 1~203
- Yao B C, Zeng W J, Hayes D E, et al. The Geological Memoir of South China Sea Surveyed Jointly by China & USA (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences Press, 1994. 1~203
- [27] 姚伯初, 万岭等著. 中国南海海域岩石层三维结构及演化. 北京: 地质出版社, 2006
- Yao B C, Wan L, et al. Three Dimensional Lithosphere Structure and Evolution in South China Sea (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2006
- [28] 丘学林, 施小斌, 阎贫等. 南海北部地壳结构的深地震探测和研究新进展. 自然科学进展, 2003, **13**(3): 231~236
- Qiu X L, Shi X B, Yan P. Deep seismic sounding and new progress in crustal structure of the northern South China Sea. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2003, **13**(3): 231~236
- [29] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea Basin. In: Hayes D E ed. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 2*. *Geophys. Monogr. Ser.*, AGU Washington D. C., 1983, **27**: 23~56
- [30] 杨金玉, 张训华, 王修田. 利用重磁计算南海海盆中部地壳结构特征. 海洋地质与第四纪地质, 2001, **21**(1): 45~50
- Yang J Y, Zhang X H, Wang X T. Using gravitational and magnetic calculation to interpret the earth's crust characteristic of the middle part of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 2001, **21**(1): 45~50
- [31] 宋海斌, 郝天晓, 江为为. 南海北部张裂边缘的类型及其形成机制探讨. 见: 陈颖等编. 寸丹集—庆贺刘光灿院士工作 50 周年学术论文集. 北京: 科学出版社, 1998. 1~10
- Song H B, Hao T Y, Jiang W W. Discussion on type and formation mechanism of the northern margin of the South China Sea. In: Chen Y et al. eds. *Cundan Collected Papers-in Honour of the 50 Years' Work of Academician Liu Guangding*. Beijing: Science Press, 1998. 74~81
- [32] 李唐根. 南海北部沿海陆地及岛屿岩石密度的测定及研究. 海洋地质与第四纪地质, 1987, **7**(3): 57~69
- Li T G. Determination and study of density and magnetism of rocks of the coast and the islands of the northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 1987, **7**(3): 57~69
- [33] Bautista B C, Bautista M L P, Oike K, et al. A new insight on the geometry of subducting slabs in northern Luzon, Philippines. *Tectonophysics*, 2001, **339**: 279~310
- [34] 宋海斌, 郝天晓, 江为为等. 南海地球物理场特征与基底断裂体系研究. 地球物理学进展, 2002, **17**(1): 24~33
- Song H B, Hao T Y, Jiang W W, et al. Research on geophysical field characteristics and basement fault system of South China Sea. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2002, **17**(1): 24~33
- [35] 陈学波, 李金森, 王恩福等. 汕头—吕宋岛岩石圈速度结构与

- 震源构造——台湾浅滩 7.3 级地震构造之一. 地球物理学进展, 1996, 11(1): 28~41
- Chen X B, Li J S, Wang E F, et al. The velocity structure and the focal structure of the lithosphere on Shantou-Luzon island. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 1996, 11(1): 28~41
- [36] 郑月军, 黄忠贤, 彭艳菊等. 中国边缘海上地幔各向异性及其构造意义. 见: 李家彪, 高抒主编. 中国边缘海盆演化与资源效应. 北京: 海洋出版社, 2004. 3~8
- Zheng Y J, Huang Z X, Peng Y J, et al. Anisotropy of upper mantle in Chinese marginal seas and its tectonic significance. In: Li J B, Gao S eds. *Evolution of Basins of Chinese Marginal Seas and Resource Effect*. Beijing: Ocean Press, 2004. 3~8
- [37] 李志伟, 胥 颐, 郝天珩等. 利用非线性方法反演琉球—台湾—吕宋地区的岩石层 P 波速度结构. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1345~1351
- Li Z W, Xu Y, Hao T Y, et al. Inversion of P-wave velocity structure of lithosphere in the Ryukyu-Taiwan-Luzon area by nonlinear algorithm. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, 22(5): 1345~1351
- [38] Shi Xiaobin, Qiu Xuelin, Xia Kanyuan, et al. Characteristics of surface heat flow in the South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 22: 265~277
- [39] 刘光鼎. 中国大陆构造格架的动力学演化. 地学前缘, 2007, 14(3): 39~46
- Liu G D. Geodynamic evolution and tectonic framework of China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2007, 14(3): 39~46
- [40] Nissen S S, Hayes D E, Buhl P, Diebold J. Deep penetration seismic soundings across the northern margin of the South China Sea. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100(B11): 22407~22433
- [41] 丁巍伟, 陈汉林, 杨树锋等. 南海海盆的形成机制和构造演化探讨. 见: 李家彪, 高抒主编. 中国边缘海盆演化与资源效应. 北京: 海洋出版社, 2004. 90~100
- Ding W W, Chen H L, Yang S F, et al. Discussion on the formation and evolution of the South China Sea Basin. In: Li J B, Gao S eds. *Evolution and Resources Effect of Marginal Basins in the China Sea* (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2004. 90~100

(本文编辑 胡素芳)

作者: 郝天珧, 黄松, 徐亚, 李志伟, 胥颐, 雷受旻, 杨金玉, HAO Tian-Yao, HUANG Song, XU Ya, LI Zhi-Wei, XU Yi, LEI Shou-Min, YANG Jin-Yu

作者单位: 郝天珧, 黄松, 徐亚, 李志伟, 胥颐, HAO Tian-Yao, HUANG Song, XU Ya, LI Zhi-Wei, XU Yi (中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029), 雷受旻, 杨金玉, LEI Shou-Min, YANG Jin-Yu (国土资源部青岛, 海洋地质研究所, 青岛, 266071)

刊名: 地球物理学报 

英文刊名: CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS

年, 卷(期): 2008, 51(6)

被引用次数: 7次

参考文献(41条)

1. 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理系列图集 1992
2. 中国科学院南海海洋研究所. 南海地质构造与陆缘扩张 1988
3. 郑月军, 黄忠贤, 刘福田. 中国东部海域地壳上地幔瑞利波速度结构研究[期刊论文]-地球物理学报 2000(04)
4. 郝天珧, 刘建华, 黄忠贤. 中国边缘海岩石层结构研究[期刊论文]-地球物理学进展 2004(03)
5. 李家彪, 郑玉龙, 金祥龙. 马尼拉俯冲带: 倾斜俯冲的地貌特征 2003
6. 赵明辉, 丘学林, 叶春明. 南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析[期刊论文]-地球物理学报 2004(05)
7. 胥颐, 刘建华, 郝天珧. 中国东部海域及邻区岩石层地幔的P波速度结构与构造分析[期刊论文]-地球物理学报 2006(04)
8. Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Basin 1980
9. 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集 1997
10. 杨少坤, 黄丽芬, 李希宗. 珠江口盆地特殊层序地层学模式及其对勘探的指导意义[期刊论文]-中国海上油气(地质) 1996(03)
11. 黎明碧, 金祥龙, 初凤友. 神弧——统暗沙隆起中部新生代地层层序划分及沉积演化[期刊论文]-沉积学报 2002(04)
12. Qiu Xuelin, Ye Sanyu, Wu Shimin. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea 2001
13. Yan P, Zhou D, Liu Z S. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea 2001
14. Wang T K, Chen M K, Lee C S. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea 2006
15. 姚伯初, 曾维军, 陈艺中. 南海西沙海槽, 一条古缝合线 1994(01)
16. 刘建华, 胥颐, 刘福田. 中国边缘海及邻区体波地震成像 2003
17. 胥颐, 李志伟, 郝天珧. 南海东北部及其邻近地区的Pn波速度结构与各向异性[期刊论文]-地球物理学报 2007(05)
18. 彭艳菊, 苏伟, 郑月军. 中国大陆及海域LOVE波成像[期刊论文]-地球物理学报 2002(06)
19. 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究 2004
20. 郝天珧, 刘建华, 宋海斌. 华南及其相邻边缘海域一些重要断裂的地球物理证据[期刊论文]-地球物理学进展 2003(01)
21. Hearn T M, Wang S, Ni J F. Upper mantle velocities beneath China and surrounding regions 2004

22. [王家林, 吴健生, 陈冰](#) [珠江口盆地和东海陆架盆地基底结构的综合地球物理研究](#) 1997
23. [王家林, 陈冰, 吴健生](#) [潮汕坳陷沉积盆地基底结构和中生界综合地质地球物理研究](#) 2003
24. [郝沪军, 林鹤鸣, 杨梦雄](#) [潮汕坳陷中生界—油气勘探新领域](#)[期刊论文]-[中国海上油气\(地质\)](#) 2001(03)
25. [地质矿产部第二海洋地质调查大队](#) [南海地质地球物理图集\(1:2000000\)](#) 1987
26. [姚伯初, 曾维军, Hayes D E](#) [中美合作调研南海地质专报](#) 1994
27. [姚伯初, 万岭](#) [中国南海海域岩石层三维结构及演化](#) 2006
28. [丘学林, 施小斌, 阎贫](#) [南海北部地壳结构的深地震探测和研究新进展](#)[期刊论文]-[自然科学进展](#) 2003(03)
29. [Taylor B, Hayes D E](#) [Origin and history of the South China Sea Basin](#) 1983
30. [杨金玉, 张训华, 王修田](#) [利用重磁计算南海海盆中部地壳结构特征](#)[期刊论文]-[海洋地质与第四纪地质](#) 2001(01)
31. [宋海斌, 郝天珧, 江为为](#) [南海北部张裂边缘的类型及其形成机制探讨](#) 1998
32. [李唐根](#) [南海北部沿海陆地及岛屿岩石密度的测定及研究](#) 1987(03)
33. [Bautista B C, Bautista M L P, Oike K](#) [A new insight on the geometry of subducting slabs in northern Luzon, Philippines](#) 2001
34. [宋海斌, 郝天珧, 江为为](#) [南海地球物理场特征与基底断裂体系研究](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2002(01)
35. [陈学波, 李金森, 王恩福](#) [汕头-吕宋岛岩石圈速度结构与震源构造—台湾浅滩7.3级地震构造之一](#) 1996(01)
36. [郑月军, 黄忠贤, 彭艳菊](#) [中国边缘海上地幔各向异性及其构造意义](#) 2004
37. [李志伟, 胥颐, 郝天珧](#) [利用非线性方法反演琉球-台湾-吕宋地区的岩石层P波速度结构](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2007(05)
38. [Shi Xiaobin, Qiu Xuelin, Xia Kanyuan](#) [Characteristics of surface heat flow in the South China Sea](#) 2003
39. [刘光鼎](#) [中国大陆构造格架的动力学演化](#)[期刊论文]-[地学前缘](#) 2007(03)
40. [Nissen S S, Hayes D E, Buhl P, Diebold J](#) [Deep penetration seismic soundings across the northern margin of the South China Sea](#) 1995(B11)
41. [丁巍伟, 陈汉林, 杨树锋](#) [南海海盆的形成机制和构造演化探讨](#) 2004

引证文献(6条)

1. [张中杰, 刘一峰, 张素芳, 范蔚茗, 陈林](#) [琼东南盆地地壳伸展深度依赖性及其动力学意义](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2010(1)
2. [张永军, 刘振军, 周坚鑫](#) [珠江口盆地航磁局部构造异常](#)[期刊论文]-[物探与化探](#) 2010(1)
3. [张永军, 刘振军, 赵百民](#) [关于西沙海槽正磁异常带的地球物理认识](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2009(6)
4. [高金耀, 吴招才, 王健, 杨春国, 张涛](#) [南海北部陆缘磁静区及与全球大洋磁静区对比的研究评述](#)[期刊论文]-[地球科学进展](#) 2009(6)
5. [胡卫剑, 江为为, 朱东英](#) [综合地球物理方法对南海西北部-印支半岛地区中生界分布的研究](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2009(2)
6. [吕川川, 郝天珧, 徐亚](#) [海洋重力勘探中的完全布格校正](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2009(2)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_dqwlxb200806019.aspx

授权使用: 青岛海洋地质研究所(wfhyqdh), 授权号: f66b730c-bca1-4bad-ae7e-9ed200d6ee34

