

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.地球物理学进展,2009,24(2):522~529,DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.021.

Hu W J., Jiang W W., Zhu D Y. A study on distribution of Mesozoic strata in Northwestern South China Sea and Indo-China Peninsula using integrated geophysical methods. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(2):522~529, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.021.

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

胡卫剑, 江为为, 朱东英

(中国科学院地质与地球物理研究所油气综合地球物理重点实验室, 北京 100029)

摘 要 南海西北部是我国海洋油气的重要基地. 为了研究该区前新生代尤其是中生代油气资源潜力, 本文以岩石物性的差异为基础, 建立地质界面与物性界面的联系, 利用综合地球物理方法来分析目标物性界面的分布特征. 在地震资料控制浅层沉积结构的约束下, 根据重力资料, 通过小波分析位场剥离等方法得到剩余场, 由 Parker 界面反演法反演计算了研究区的重力基底, 结合新生代沉积分布得出中生界分布特征并给出了中生代残留盆地的可能分布范围, 为分析研究区中生代油气资源潜力提供参考.

关键词 综合地球物理方法, 中生界, 南海西北部

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.021

中图分类号 P631

文献标识码 A

A study on distribution of Mesozoic strata in Northwestern South China Sea and Indo-China Peninsula using integrated geophysical methods

HU Wei-jian, JIANG Wei-wei, ZHU Dong-ying

(Key Laboratory of Petroleum Geophysics, Institute of Geology and Geophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract In order to assess the oil and gas resource potential of Pre-Cenozoic especially Mesozoic in the Northwestern South China Sea, macro-distribution of Mesozoic strata is studied by using integrated geophysical methods. Based on rock physics properties, the relationship between geological interfaces and physical property interfaces is built, and the distribution of interfaces can be obtained based on different geophysics data. The shallow sedimentary basin structure can be obtained from reflection seismic data; and basement undulation and deep structure can be obtained from gravity and magnetic inversion. The regional-residual potential field is separated by forward computation, filter operation and wavelet analysis. Basement undulation is inverted from corresponding anomalies using the Parker-Oldenburg method. Finally, macro-distribution of Mesozoic strata is determined in combination with real geological data.

Keywords integrated geophysical methods, Mesozoic, Northwestern South China Sea

收稿日期 2008-12-30; 修回日期 2009-02-15.

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973)(2007CB321700, 863) 国家高技术研究发展重大专项(2006AA09A101), 自然科学基金(40704013, 40804016)资助.

作者简介 胡卫剑,男,1981年生,2007年7月毕业于中南大学地球信息科学与技术专业,现在中国科学院地质与地球物理研究所攻读硕士学位.(E-mail:howejian@mail.iggcas.ac.cn).

0 引言

油气是国家的重要战略资源,是国民经济的血脉,与国家经济安全和建设创新型国家以及构建和谐社会的息息相关。根据我国的石油勘探和储量,有学者^[1]总结为“老中国的贫油论:海相太老,陆相不好;新中国的贫油论:陆相很少,海相难找”。我国上个世纪在陆相生油理论的指导下,开展了大规模的油气勘探与油气地质综合研究,在中国中东部中生代陆相断陷盆地先后发现了大庆油田、胜利油田、辽河油田和华北油田,20 世纪 80 年代中期我国原油产量达 1.7 亿吨,跃居世界第 5 位。然而,随着我国经济建设的迅猛发展,油气资源的供需矛盾日趋突出。1993 年起我国重新开始进口原油,到 2007 年石油进口已达 1.63 亿吨,石油对外依存度接近 50%。可见,油气资源已成为制约国家经济建设、影响国家安全及构建和谐社会的主要瓶颈。

1997 年,刘光鼎院士提出中国油气资源“二次创业”的思想,指出前新生代海相残留盆地油气资源勘探应成为新的勘探领域和新的高技术生长点^[1]。近十年以来,我国前新生代残留盆地尤其是中生代残留盆地的油气勘探与地质研究,受到国内学者们的高度重视。刘光鼎等^[2~6]、蔡乾忠等^[7,8]、夏戡原等^[9,10]、郝沪军等^[11]、邱燕等^[12]、何家雄等^[13],提出前新生代残留盆地油气勘探是我国未来油气勘探的重要新领域。通过多年的努力,南海北部大陆边缘油气勘探取得了丰硕的成果^[14~16],共发现油气田 51 个。目前“北油(靠近华南地区的海域,主要在陆架区)南气(莺歌海盆地-南海陆架区)”格局基本形成。

本文以南海西北部-印支半岛地区作为研究区(图 1)范围为 15°N~25°N,102°E~112°E。通过综合地球物理方法研究其中生界的分布,据此圈定中生代残留盆地的可能分布范围,希望为分析研究区中生代油气资源潜力提供参考。

1 研究区概况

1.1 研究区地质概况

南海在新生代处于欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块的交汇处,并且在地质历史上又受到特提斯构造域和太平洋构造域演化的制约,经历了复杂的地质演化过程,形成了裂谷、海盆、推覆、

走滑拉分盆地等多种地质构造现象、以及陆壳、过渡地壳和洋壳等多种构造单元,并发育了多种形式的地质体和相关的矿产资源^[17~21],被国内外学者誉为“地球上最好的天然实验室”。

南海西北部与红河地区相邻,是了解印度-欧亚碰撞与南海形成之间关系的关键地带。研究区内包括北部湾、莺歌海和琼东南等重要的含油气盆地,是我国海洋油气的重要基地。

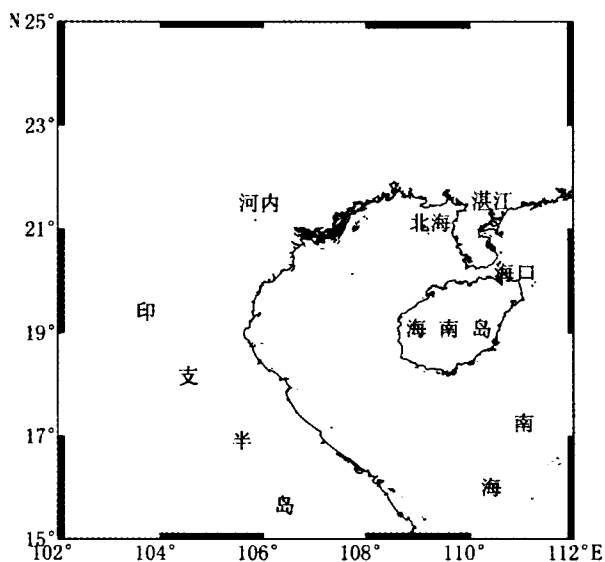


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Map showing the location of the study area

1.2 地层特征

研究区的华南沿海地区,中生界大致以 NNE 向的赣江和四会-吴川基底断裂为界,东侧以钙碱性火山岩堆积为主,其中大陆内侧以侏罗系为主,向东南沿海边缘地区以上白垩统为主;断裂西侧以断陷型的陆相河流、湖泊沉积为主。新生界在华南沿海地区呈零散小型的盆地沉积,大多在中生代盆地的基础上持续沉积新生代的红色建造^[22]。

南海西北部的沉积基底主要是华南沿海地层向海自然延伸部分,目前所知最老的地层为元古界,主要分布在广东西部陆架、北部湾、南海西部陆架等地区。中生界多分布于大陆架、大陆坡的小型地堑盆地内,新生界绝大多数分布在北部湾、琼东南和莺歌海盆地,其中莺歌海盆地的新生代沉积厚度达 10 km。

①何治亮. 油气勘探者的思维与素质(报告). 2008,中国石化石油勘探开发研究院.

2 研究方法

本文研究以综合地球物理方法为指导,通过地质模型和岩石物性为纽带,采用地质与地球物理相结合,正演与反演相结合,定性定量相结合,通过多次反馈,不断优化反演结果.利用地震资料控制浅层新生界沉积结构,利用重力效应剥离、物性界面反演等方法提取深部基底结构特征,在地层分布格架的基础上分析研究区中生界分布.本文综合地球物理研究方法流程可表示为图 2.

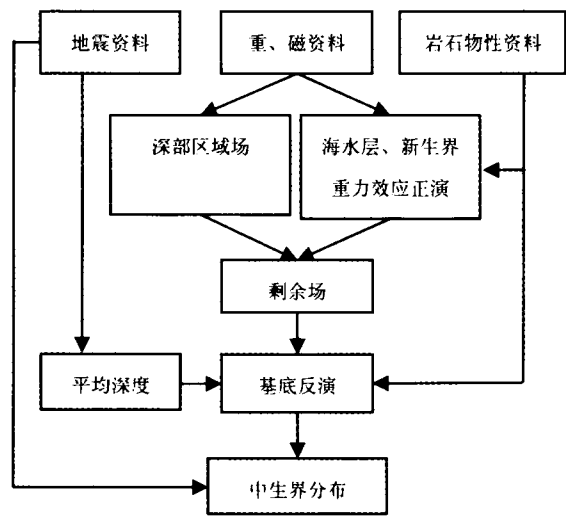


图 2 研究方法流程图
Fig. 2 Flow chart of research methods

3 研究区基础地球物理资料

3.1 岩石物性分析

岩石物性是连接地质与地球物理之间的纽带,也是地球物理方法的基础.为了建立合理的地质-地球物理模型,本文调研了研究区的大量岩石密度资料.根据前人研究^[17, 23]进行分析、归纳并总结出研究区的地层密度特征(表 1~表 3).

从表 1 至表 3 可以得到研究区存在的主要密度界面有:新近系-古近系与下伏地层之间的密度界面,密度差为 0.13 g/cm³~0.18 g/cm³;中生界与下伏地层(前中生界)之间的密度界面,密度差为 0.10 g/cm³~0.20 g/cm³;下地壳和上地幔之间的密度界面,密度差为 0.43 g/cm³(表 4).

②刘光鼎等.南海北部陆架西区盆地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

表 1 南海北部湾盆地地层平均密度值^②(单位:g/cm³)
Table 1 Average density of strata in Beibuwan Basin

地层	平均密度
角尾组	2.154
下洋组	2.72
涠州组	2.518
流沙巷组	2.547
长流组	2.663
基 底	2.751

表 2 莺歌海-琼东南盆地地层平均密度值(单位:g/cm³)
Table 2 Average density of strata in Yinggehai-Qiongdongnan Basins

地层	平均密度
莺黄组	2.529
梅山组	2.629
陵水组	2.518
崖城组	2.553
基 底	2.854

表 3 研究区部分岩石平均密度值(单位:g/cm³)
Table 3 Average density of samples from the study area

地区	Q	N	E	K	J-T	PZ2	PZ1
雷琼地区		2.18	2.37	2.51		2.64	2.91
北部湾东		2.11	2.25	2.60		2.53	2.70
北部沿岸							
海南岛	2.79	2.24	2.58				

表 4 建模采用的密度参数(单位:g/cm³)
Table 4 Densities used in the modeling

地层	密度
新生界	2.4
中生界	2.53~2.58
前中生界	2.67~2.75
莫霍面以下	3.20

3.2 重力场特征

研究区的布格重力异常由国家测绘总局绘制的 1:100 万重力异常图(主要为陆区)与原地质矿产部第二海洋地质调查大队绘制的 1:200 万重力异常图(主要为海区)拼接而成(图 3),点线距均为 10 km.研究区布格重力异常变化范围为-225 mGal~114 mGal之间,布格重力异常表现出的总趋势是自

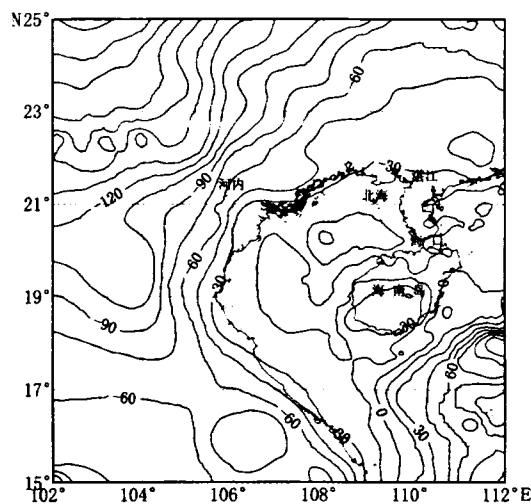


图3 南海西北部-印支半岛布格重力异常图(mGal)
Fig. 3 Bouguer gravity anomalies of the study area (mGal)

西北的大陆区至东南的南海海区逐渐增大,局部地区存在异常圈闭.在大陆地区与海南岛、印支半岛具有负的布格异常值,而在海区有正的异常值,随着水深的加大,异常值增大,布格重力异常与地形之间的“镜像”关系非常明显.研究区内布格重力异常在东部及东南部走向为NE;西北地区异常为NEE、NE走向;西南地区以近EW走向为特征.整体异常形态分布与该区域内的盆地地形、内部构造相对应,客观的反映了该区基底构造和断裂展布方向^[24,25].

4 研究区重力基底和中生界分布

布格重力异常主要反映地壳内部物质密度变化及壳幔边界起伏的变化,可以认为是各密度界面重力效应的叠加,也就是:

$$\Delta g = \Delta g_{\text{浅}} + \Delta g_{\text{残}} + \Delta g_{\text{深}}.$$
 (1)
其中 $\Delta g_{\text{浅}}$ 是浅部地层(新生界)引起的重力效应, $\Delta g_{\text{深}}$ 是莫霍面以下深部密度界面引起的重力效应, $\Delta g_{\text{残}}$ 为去除浅部和深部重力效应后的剩余重力效应.

根据以上分析,建立了地质-地球物理模型(图4).浅部构造层为新生代沉积层和海水层,第二层为前新生代残留盆地构造层,包括中生界和前中生界.该层的中生界与下伏地层为研究区的主要密度界面,研究区的剩余重力异常主要是由该密度界面引起.最后一层为莫霍面以下地层.根据模型,从布格重力异常中剥离浅部层和深部莫霍面起伏引起的重力效应得到剩余重力异常,通过重力基底反演并结合新生界分布就可以大致给出研究区中生界厚度分布.

中生界残留厚度求取方法流程为:(1)通过正演计算新生界地层、海水层引起的重力效应;通过小波

分析得到莫霍面引起的重力效应,从布格重力异常中剥离,得到剩余重力异常;(2)利用小波分析从剩余重力异常中分离出中生界与下伏地层引起的异常效应;(3)进行区域扩边处理;(4)对剩余重力异常用Parker界面反演法计算得到重力基底埋深;(5)将重力基底深度与地震等资料得到的平均深度进行对比,重复步骤(4),重新调整参数,通过多次反馈,不断优化反演结果直到反演的基底深度合理为止;(6)重力基底埋深减去新生界厚度就可以得到中生界的厚度.

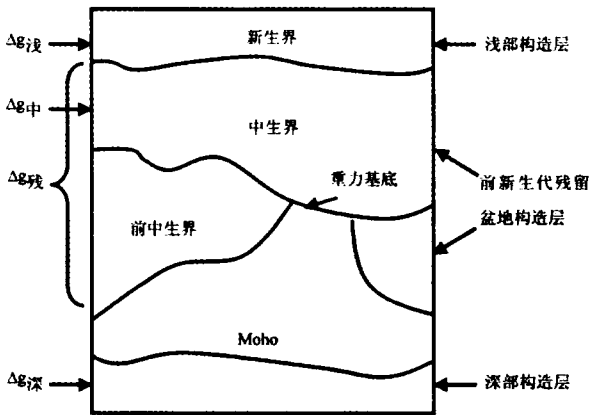


图4 地质模型
Fig. 4 Geological model

根据地震资料中获取的新生界厚度数据及南海的岩石物性资料,分别正演计算了海水层与新生界引起的重力效应(图5).

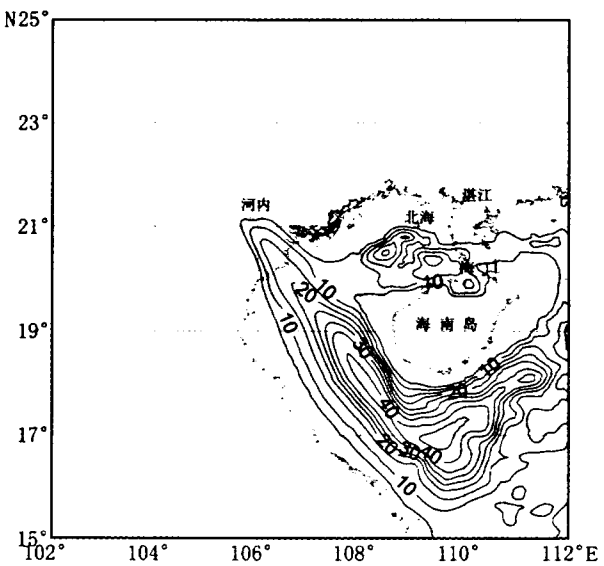


图5 新生界引起的重力效应图(mGal)
Fig. 5 Gravity effect of Cenozoic strata (mGal)

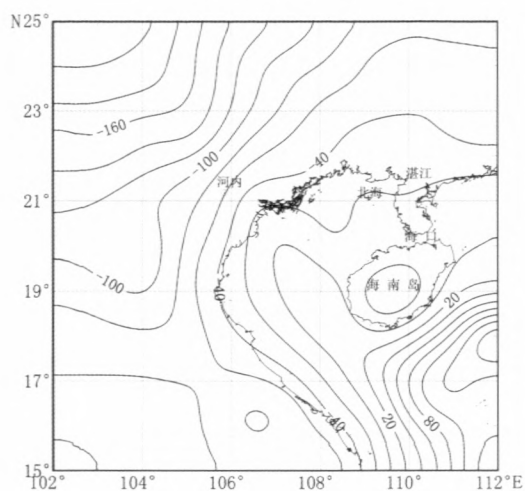


图 6 布格重力异常小波四阶逼近变换图(mGal)

Fig. 6 Four-degree approach wavelet transforms of Bouguer gravity anomalies (mGal)

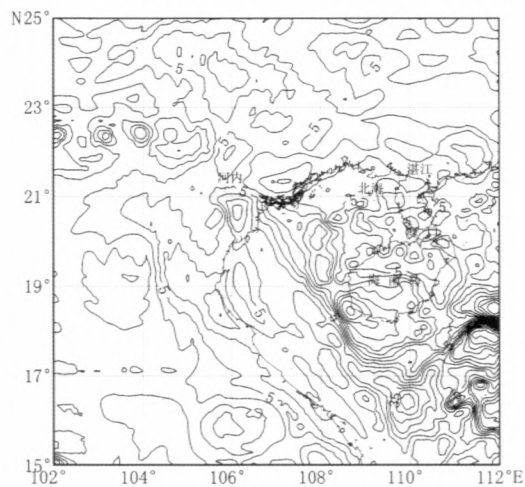


图 7 剩余重力异常图(mGal)

Fig. 7 Residual gravity anomalies (mGal)

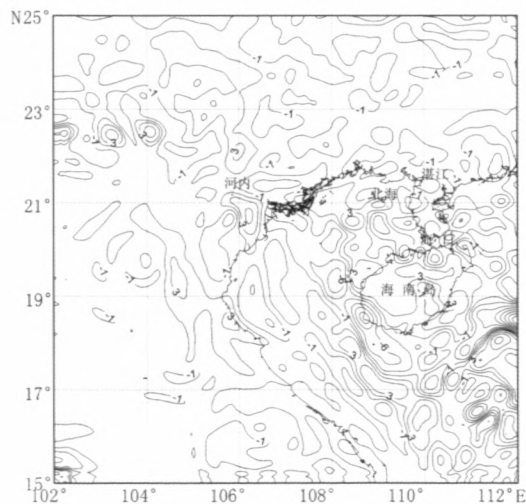


图 8 剩余重力异常小波三阶细节变换图(mGal)

Fig. 8 Three-degree detail wavelet transforms of residual gravity anomalies (mGal)

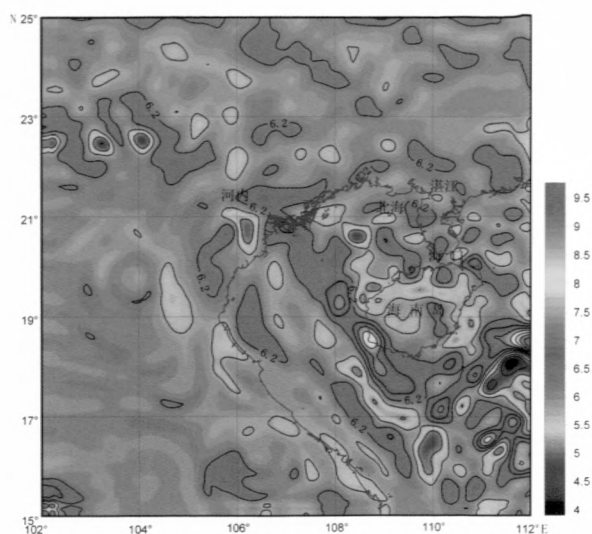


图 9 研究区重力基底埋深图(km)

Fig. 9 Gravity basement depths of the study area (km)

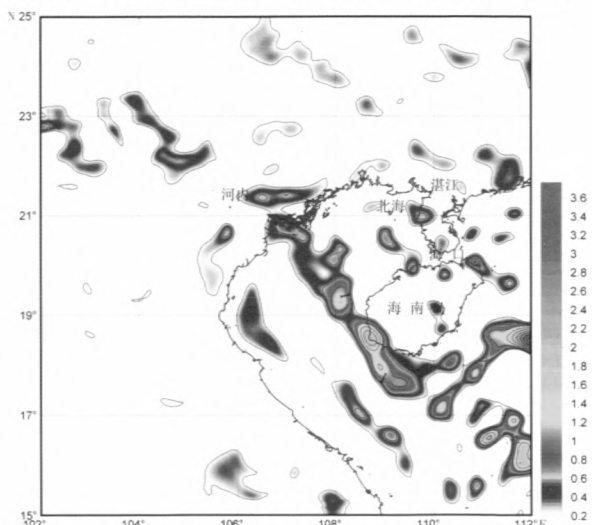


图 10 研究区中生界残余厚度图(单位:km)

Fig. 10 Mesozoic stratum isopach map of the study area (km)

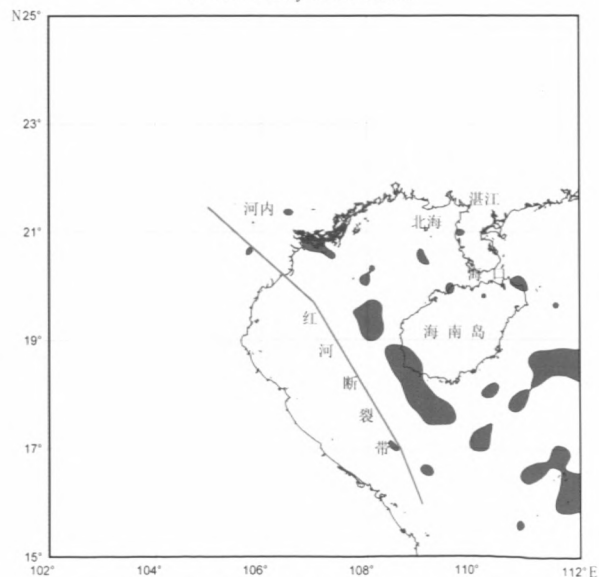


图 11 研究区中生代残留盆地分布图

Fig. 11 Distribution of Mesozoic residual basins of the study area

用位场小波分析来分离局部场和区域场。区域场分离主要利用离散小波变换进行,通过多分辨率得到异常场的各阶细节和逼近。小波变换结果的功率谱分析表明不同阶小波分解反映了不同深度地质体产生的异常^[26, 27],这样就可以用来分离局部场和区域场。对布格重力异常进行小波细节、逼近变换计算,通过和前人对该区莫霍面的研究对比^[24, 28],发现布格重力异常小波四阶逼近变换比较好的反映了莫霍面以下深部密度界面引起的重力效应(图6)。从布格异常中剥离浅部场和深部区域场得到剩余重力异常(图7)。

根据剩余重力异常,进行小波分析滤波,选取小波三阶细节作为中生界重力效应(图8)。之后参考该区的地震资料^[29, 30],取平均深度6km,用Parker-Oldenburg^[31, 32]界面反演方法对剩余重力异常进行迭代反演计算得到该地区的重力基底埋藏深度(图9)。结合新生界厚度,由重力基底得到中生界残留厚度(图10)。

根据图10,保留残留厚度大于0.5 km的部分,绘制了研究区的中生代残留盆地分布图(图11)。该区的中生代残留盆地主要集中在南海西北部的海域,其中残留厚度比较大(大于2 km)的区域主要分布在海南岛西南部、莺歌海盆地和琼东南盆地。中生界分布特征在莺歌海盆地为NNW向,而在琼东南盆地以NE向为主。

5 结论及讨论

研究区的中生界分布主要集中在南海西北部的海区,且残留厚度较大的区域分布在海南岛西南部、莺歌海盆地和琼东南盆地。同时圈定的中生代残留盆地基本上集中在红河断裂带的东北侧,据此推测该区的中生界分布受深大断裂的控制。

通过研究得到研究区的中生界分布,进而圈定了中生代残留盆地,可为分析该区中生代油气资源潜力提供参考。同时说明该研究流程方法对研究前新生代残留盆地是可行的。但南海西北部中生代残留盆地油气勘探程度低、勘探范围有限、测网密度稀,且针对中生界研究的地震和钻井资料少,难以建立完整的中生界地层的综合柱状图,即缺少油气地质与地球物理研究的基础和衔接的桥梁,因此本文研究结果必定存在一定的误差,仅希望能对中生代残留盆地研究提供基础。

致 谢 本文得到了郝天珧研究员的悉心指导,在

此表示感谢。同时,研究中得到了徐亚博士后,黄松博士的无私帮助,在此一并感谢!

参 考 文 献 (References):

- [1] 刘光鼎. 试论残留盆地[J]. 勘探家, 1997, 2(3): 1~5.
Liu G D. Preliminary discussion on residual basins [J]. Petroleum Exploration (in Chinese), 1997, 2(3): 1~5.
- [2] 刘光鼎, 宋海斌, 张福勤. 中国近海前新生代残留盆地初探[J]. 地球物理学进展, 1999, 14(3): 1~8.
Liu G D, Song H B, Zhang F Q. A preliminary study of Chinese offshore Pre-Cenozoic residual basins[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 1999, 14(3): 1~8.
- [3] 刘光鼎. 中国油气资源企盼二次创业[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(4): 1~3.
Liu G D. The second exploitation of the oil and gas resources in China [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2001, 16(4): 1~3.
- [4] 刘光鼎. 前新生代海相残留盆地[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(2): 1~7.
Liu G D. Pre-Cenozoic marine residual basins[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2001, 16(2): 1~7.
- [5] 刘光鼎, 陈洁. 中国海域残留盆地油气勘探潜力分析[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 881~888.
Liu G D, Chen J. Potential analysis of petroleum exploration in residual basins of China sea[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(4): 881~888.
- [6] 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.
Liu G D, Chen J. Analysis of difficulties in gas-petroleum prospecting in Chinese Pre-Cenozoic relic basin and the corresponding solutions [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(2): 273~275.
- [7] 蔡乾忠, 刘守全, 莫杰. 寻找海相油气新领域——从南海北部“残留特提斯”谈起[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(3): 157~162.
Cai Q Z, Liu S Q, Mo J. Search for new domains of marine-origin petroleum: “Remained Tethys” in the northern South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology) (in Chinese), 2000, 14(3): 157~162.
- [8] 蔡乾忠. 中国海域海相中生代油气[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(8): 42~46.
Cai Q Z. Oil and gas in marine Mesozoic of China sea areas [J]. Marine Geology Letters (in Chinese), 2003, 19(8): 42~46.
- [9] 夏越原, 黄慈流. 南海中生代特提斯期沉积盆地的发现与寻找中生代含油气盆地的前景[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 227~238.
Xia K Y, Huang C L. The discovery of Mesozoic-Tethys sedimentary basins in the South China Sea and their oil and gas perspective[J]. Earth Science Frontiers (in Chinese), 2000, 7(3): 227~238.

- [10] 夏戡原,黄慈流,黄志明. 南海及邻区中生代(晚三叠世-白垩纪)地层分布特征及含油气对比[J]. 中国海上油气,2004,16(2):73~83.
Xia K Y, Huang C L, Huang Z M. Upper Triassic-Cretaceous sediment distribution and hydrocarbon potential in South China Sea and its adjacent areas[J]. China Offshore Oil and Gas (in Chinese),2004,16(2):72~83.
- [11] 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.
Hao H J, Zhang X T. An Application of gravimetric and magnetic data in Mesozoic petroleum exploration in Chao Shan depression, South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology) (in Chinese),2003,17(2):128~132.
- [12] 邱燕,温宁. 南海北部边缘东部海域中生界及油气勘探意义[J]. 地质通报,2004,23(2):42~46.
Qiu Y, Wen N. Mesozoic in the eastern sea area of northern margin of the South China Sea and its significance for oil/gas exploration[J]. Geology Bulletin of China (in Chinese),2004,23(2):42~46.
- [13] 何家雄,姚永坚,马文宏,等. 南海东北部中生代残留盆地油气勘探现状与油气地质问题[J]. 天然气地球科学,2007,18(5):635~642.
He J X, Yao Y j, Ma W H, et al. Status of oil & gas exploration and analysis of geological character in Mesozoic residual basins, Northeastern South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience (in Chinese),2007,18(5):635~642.
- [14] 何家雄,施小斌,夏斌,等. 南海北部边缘盆地油气勘探现状与深水油气资源前景[J]. 地球科学进展,2007,22(3):261~270.
He J X, Shi X B, Xia B, et al. The status of the petroleum exploration in the Northern South China Sea and the resource potential in the deep-water areas[J]. Advances in Earth Science (in Chinese),2007,22(3):261~270.
- [15] 陈洁,温宁,李学杰. 南海油气资源潜力及勘探现状[J]. 地球物理学进展,2007,22(4):1285~1294.
Chen J, Wen N, Li X J. The status of the resource potential and petroleum exploration of the South China Sea [J]. Progress in Geophysics (in Chinese),2007,22(4):1285~1294.
- [16] 朱伟林,张功成,高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报,2008,29(1):1~9.
Zhu W L, Zhang G C, Gao L. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea [J]. Acta Petrolei sinica,2008,29(1):1~9.
- [17] 郝天珧,江为为,胥颐,等. 红河断裂带研究区深部结构特点的地球物理研究[J]. 地球物理学进展,2005,20(3):584~593.
Hao T Y, Jiang W W, Xu Y, et al. Geophysical research on deep structure feature in study region of red river fault zone[J]. Progress in Geophysics (in Chinese),2005,20(3):584~593.
- [18] 谢建华,夏斌,张宴华,等. 南海形成演化探究[J]. 海洋科学进展,2005,23(2):212~218.
Xie J H, Xia B, Zhang Y H, et al. Study on formation and evolution of the South China Sea[J]. Advances in Marine Science (in Chinese),2005,23(2):212~218.
- [19] 张健,熊亮萍,汪集场. 南海深部地球动力学特征及其演化机制[J]. 地球物理学报,2001,44(5):602~610.
Zhang J, Xiong L P, Wang J Y. Characteristics and mechanism of geodynamic evolution of the South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics,2001,44(5):602~610.
- [20] 翟辰,周慧兰,赵大鹏. 使用纵波和横波走时层析成像研究菲律宾海板块西边缘带和南海地区的深部结构[J]. 地球物理学报,2007,50(6):1757~1768.
Qu C, Zhou H L, Zhao D P. Deep structure beneath the west margin of Philippine Sea Plate and South China Sea from P and S wave travel time tomography[J]. Chinese Journal of Geophysics,2007,50(6):1757~1768.
- [21] 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[J]. 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[J]. Chinese Journal of Geophysics,2008,51(6):1785~1796.
- [22] 刘昭蜀,赵焕庭,范时清,等. 南海地质[M]. 北京:科学出版社. 2002.
Liu Z S, Zhao H T, Fan S Q, et al. Geology of South China Sea(in Chinese)[M]. Beijing: Science Press. 2002.
- [23] 郝天珧,刘建华,黄忠贤,等. 中国边缘海岩石层结构研究[J]. 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 Sea[J]. Progress in Geophysics (in Chinese),2004,19(3):583~589.
- [24] 江为为,宋海斌,胥颐. 南海西北部与红河地区地球物理场及其地壳深部结构特征[J]. 热带海洋学报,2003,22(2):40~48.
Jiang W W, Song H B, Xu Y. Characters of geophysical fields and deep crustal structures of Northwestern South China Sea and Honghe region [J]. Journal of Tropical Oceanography (in Chinese),2003,22(2):40~48.
- [25] 杨恬,吴世敏,刘海龄,等. 南海西北部重磁场及深部构造特征[J]. 大地构造与成矿学,2005,29(3):364~370.
Yang T, Wu S M, Liu H L, et al. Characteristics of geophysical fields and deep structures of Northwestern South China sea[J]. Geotectonica et Metallogenia (in Chinese),2005,29(3):364~370.
- [26] 徐亚,郝天珧,周立宏,等. 位场小波变换研究进展[J]. 地球物理学进展,2006,21(4):1132~1138.
Xu Y, Hao T Y, Zhou L H, et al. Review of wavelet transform in potential field[J]. Progress in Geophysics (in Chinese),2006,21(4):1132~1138.
- [27] 杨文采,施志群,侯遵泽,等. 离散小波变换与重力异常多重分解[J]. 地球物理学报,2001,44(4):534~541.
Yang W C, Shi Z Q, Hou Z Z, et al. Discrete wavelet

- transform for multiple decomposition of gravity anomalies [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(4): 534~541.
- [28] 江为为, 宋海斌, 郝天璁. 南海北部陆架西区盆地地质、地球物理特征及其深部结构[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(3): 1~11.
- Jiang W W, Song H B, Hao T Y. The characters of geology and geophysical fields and deep structure of Northwestern of South China Sea[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2001, 16(3): 1~11.
- [29] 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[J]. 自然科学进展, 2003, 13(3): 231~236.
- Qiu X L, Shi X B, Yan P, et al. Recent progress of deep seismic experiments and studies of crustal in north South China Sea[J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 2003, 13(3): 231~236.
- [30] 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[J]. 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 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(5): 845~852.
- [31] Parker R. L. The rapid calculation of potential anomalies[J]. Geophys. J. R. Astr. Soc., 1973, 31: 447~455.
- [32] Oldenburg D. W. The inversion and interpretation of gravity anomalies[J]. Geophysics, 1974, 39(4): 526~536.