

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

江为为, 宋海斌, 胥 颀

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101)

摘要:分析了南海西北部与红河地区地球物理场特征, 计算了研究区重、磁资料的一阶小波细节变换、四阶小波逼近变换。根据重力场资料以及南海北部盆地钻井取样的测试结果, 同时参考在研究区进行的地震勘探结果, 对研究区的地壳结构进行了反演计算。结果表明, 研究区域地壳结构较为复杂, 地壳厚度在 17—38km 之间, 总的趋势由陆向洋地壳厚度逐渐减薄, 反映出该区域地壳具有陆壳、过渡壳的性质, 同时存在上地幔隆起区及凹陷区。用地震层析成像结果与重力资料计算出的地壳分布趋势进行了对比验证。根据地幔对流结果探讨了研究区深部地球动力学特征及其与深部地壳结构的关系。

关键词:地球物理场特征; 地壳结构; 小波变换

中图分类号: P736.1; P738 **文献标识码:** A

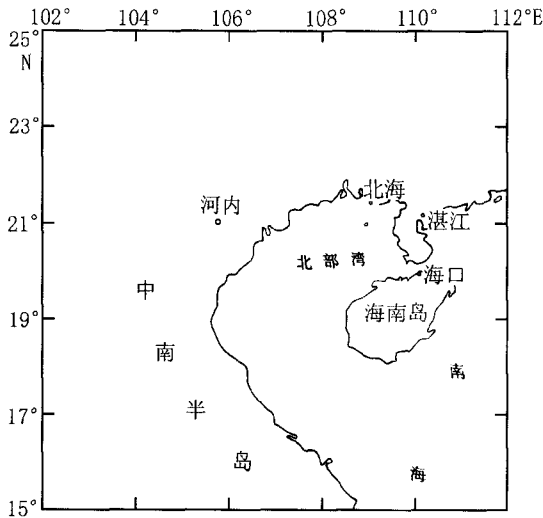


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Location map of study area

南海位于西太平洋边缘海与地中海—喜马拉雅构造带的交接部位, 其形成与演化与欧亚板块、太平洋板块、印澳板块的共同作用和影响有关, 地壳类型从陆壳、过渡壳和洋壳均有分布, 南海的形成演化很难用弧后扩张加以解释。已经发现两个不同方向的磁条带异常, 说明存在不同方向的海底扩张^[1]。因此, 它是边缘海演化历史最为复杂、国际上最为关注的热点地区之一。南海西北部大陆架(图1)是南海海盆与华南大陆两大构造单元之间的海、陆交接带, 区内有北部湾、珠江口、琼东南、莺歌海等盆地, 是我国最大的天然气聚集区之一, 同时也是重要的油气远景区。它的周围分别是越北印支褶皱

收稿日期: 2002-08-08; 修订日期: 2002-09-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-209-02); 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质与古环境开放实验室基金(BYH01A03)资助

作者简介: 江为为(1955—), 男, 陕西西安人, 硕士, 副研究员, 主要从事综合地质与地球物理研究。E-mail: weiwjiang@163.net

带、粤桂加里东褶皱带、海南岛海西褶皱带以及第三系张开的南海盆地^[2]。南海北部海域新生代盆地的发育可追溯至白垩世,它在张裂阶段发育的最突出特点是幕式张裂,以此区别于经典的大西洋边缘和世界上其它类似盆地。自20世纪70年代以来,在南海进行了多次地质、地球物理调查,取得了丰富的资料,对南海的地壳结构和地球动力学机制等得到了一定的认识^[3,4]。

与南海西北部连接的红河地区(图1)以红河断裂为界,在地质构造上分别属于越北印支褶皱带和粤桂加里东褶皱带。区内的红河断裂是东亚大陆上一条重要的走滑断裂带,由一系列近于平行的断裂组成,分布于中越边境及越南北部,作为欧亚与印支板块的边界结合带而倍受关注^[5]。通过对该地区地球物理场的分析与处理,郝天珧等^[6]认为红河断裂在进入海域后在海南岛的西部和南部为NW向延伸,一直可以追溯到15°N附近,有与中沙南断裂带相连的趋势,同时推断中沙南断裂应是红河断裂的东延部分。

本文通过对研究区地球物理场特征与地壳深部结构的探讨,为进一步探讨深部地球动力学机制提供基础的地球物理依据,对深入认识大陆边缘的形成演化、勘探开发研究区丰富的油气资源具有一定的科学价值与实际意义。

1 重力场特征

我们的研究范围为15°—25°N, 102°—112°E,基本上包括了南海西北部和红河地区。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(主要为陆地部分)与原地质矿产部第二海洋地质调查大队绘编的1:200万重力异常图(主要为海洋部分)拼接(图2),点线距均为10km,异常的变化范围在-225—114mGal之间。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。从布格异常分布形态上看,大陆地区(红河地区、中南半岛)、莺歌海、琼东南、北部湾有着各自的异常特征,这说明全区地壳物质密度不均一,不同的地区有其各自独特的构造特征。

在整个研究区域内,布格重力异常以西北低的负值、东南高的正值为特征。负异常的极值区在研究区的西北角(-225mGal),正异常的极值区在研究区的东南角(+114mGal),研究区布格重力异常总的趋势自西北角至东南角逐渐增大,局部地区存在异常的封闭。

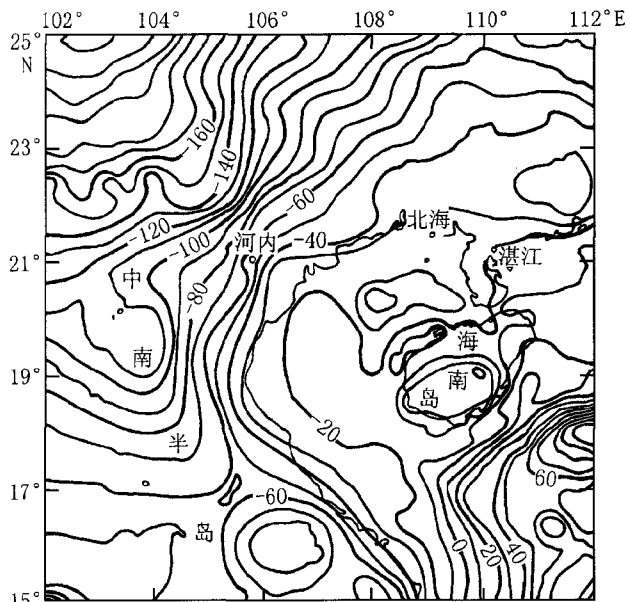


图2 研究区布格重力异常图(单位:mGal)

Fig. 2 Map of Bouguer gravity anomalies of study area (unit: mGal)

在东部及东南部异常等值线走向为 NE; 西北地区异常以 NEE、NE 走向为特征; 西南地区以近 EW 走向为特征。海域的重力场与大陆地区重力场相连接, 说明是大陆重力场的延伸。

大陆地区的布格重力异常均为负异常。红河地区等值线走向主要为 NE 向, 呈自大陆向海区逐渐增大的趋势, 自 -225mGal 增加到 -50mGal 左右, 形成了与海岸线近似平行的重力异常梯度带, 平均梯度变化为 $0.34\text{mGal} \cdot \text{km}^{-1}$, 反映了该地区地壳厚度呈逐渐减薄的趋势。在河内西南地区存在一重力异常低值圈闭, 此圈闭以南, 重力异常走向改变为 NW 至近 EW 向, 这表明中南半岛地区重力异常特征与红河地区明显不同, 反映了该地区地壳厚度自北向南逐渐减薄的趋势。

莺歌海盆地布格重力异常等值线以 NW 向为主, 在盆地的西南及东北有局部走向为 NE 向的等值线分布, 说明该盆地主要构造控制方向为 NW 向。在南部地区叠加有 NE 向的构造分布。相对其它几个盆地而言, 莺歌海盆地重力异常等值线分布稀疏, 构造变化相对比较弱。异常的形态单一, 说明该盆地的构造较为单一。盆地内布格重力异常值在 -20 — -80mGal 之间变化。

北部湾盆地的布格重力异常以局部圈闭异常为特征, 无明显走向的背景异常, 这正与该盆地平面上为等轴状分布相一致。尽管无走向背景异常场, 但盆地局部圈闭异常场均具有一定的方向性, 这里的局部异常圈闭等值线以 NE、NEE 走向分布, 这可解释为盆地内的局部构造以 NE、NEE 向的构造为主, 控制着盆地内部的构造方向。该盆地的布格异常值在 -40 — -20mGal 之间变化。

海南岛的布格重力异常等值线以 NEE、NE 向分布为主, 以 -20mGal 的等值线圈闭成近等轴状的背景异常分布形态。其内部以两个局部走向分别为位于北部近 EW 向和位于南部的 NE 向的异常等值线圈闭所控制, 这些特征表明, 海南岛北侧以近 EW 走向的构造为主, 南侧则受 NE 向构造控制。

琼东南盆地布格重力异常等值线以 NE 向的条带状分布为主。在条带状异常的南部, 有局部的等值线异常圈闭, 这一地区局部构造较为发育。条带状异常与陆架向陆坡转变的过渡带位置相对应。这种条带状异常也是海洋中陡坡带具有的一种地球物理场的现象。条带状异常在穿过北纬 17° 以后, 向南呈 NW 走向, 异常带西南面等值线变化较缓, 而其北东面等值线变化密集。该区布格重力异常值在 -10 — -70mGal 之间变化。

总之, 研究区布格重力异常形态分布的复杂性与这一区域内盆地形态、内部构造的复杂性相对应, 是这一地区独特的地质环境的反映。

为了进一步探讨研究区的重力场特征, 对布格重力异常值进行了小波细节、逼近变换计算(图 3a、b), 小波一阶细节变换结果图显示了研究区重力异常的高频部分, 该区域浅部构造引起的重力效应在莺歌海盆地以东、海南岛周边、琼东南盆地周边区域变化较大, 而在研究区的北部、西部区域总的趋势较为平缓。重力异常四阶小波逼近结果给出了区域异常的变化趋势, 根据图 3b 可以看出整个研究区域重力异常呈 NE 走向的趋势, 自大陆向海域逐渐增大。在海南岛地区区域重力异常存在着低值圈闭区, 表明该区域为上地幔凹陷区。

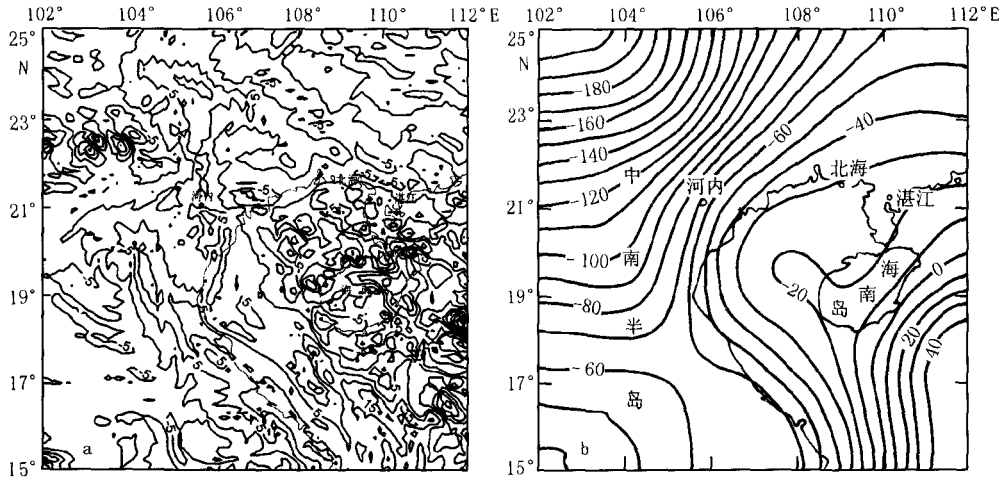


图 3 布格重力异常小波一阶细节变换(a)、小波四阶逼近变换(b)图

Fig. 3 Map of one-step detail (a) and four-step approach (b) wavelet transforms of Bouguer gravity anomalies

2 磁场特征

磁异常(图 4)的范围同布格重力异常图,数据采自原地质矿产部第二海洋地质调查大队绘编的 1:200 万磁力平面图,图中的空白区为资料缺乏区。磁异常值的变化范围在 -488—307nT,在研究区的东北部以正异常为主,存在着小范围的负异常圈闭。在研究区的中部存在一条以 NW 走向为主的负异常条带。西部地区为 0—50nT 平缓的异常区。陆地地区为正负相间的异常分布。

按磁异常的变化程度可分为 3 个变化区,即磁异常平静区、剧变区及缓变区。磁异常的平静区位于研究区的西部,即莺歌海盆地所在位置,这一带磁异常等值线极为稀疏,异常值为负背景异常,这种异常主要由深部的异常体产生,根据异常的平缓性,可推断异常源埋深很深。

剧变区位于海南岛,该地区的磁异常变化极为剧烈,异常特征以局部小圈闭为特征,等值线分布密集,异常值近 140nT,最小值约 -160nT。这些小的局部异常圈闭特征主要是基底或线性磁性异常体的反映。

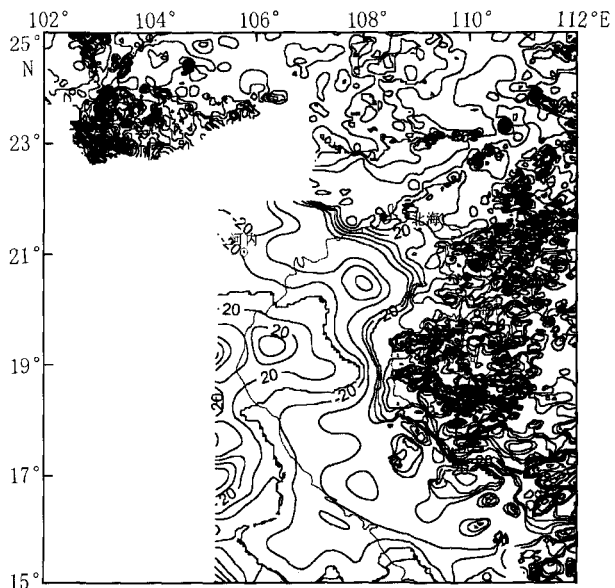


图 4 研究区磁异常图(单位:nT)

Fig. 4 Map of magnetic anomalies of study area (unit: nT)

磁异常的平缓区位于平静区及剧变区之外的其它地区。琼东南盆地、北部湾盆地的磁异常具有此特征。磁异常等值线分布相对平静区密集,而又较剧变区平缓。

对磁异常值同样进行了小波细节、逼近变换计算(图 5a、b)。根据磁异常一阶小波细节处理结果可以看出,在海南岛和研究区的东北部高频成分发育,有可能与中生代岩浆岩和新生代玄武岩有关。磁异常的四阶小波逼近结果给出了研究区磁场低频部分的分布特征,根据图 5b 可以看出,研究区西北部区域磁场的走向为近 EW 向,其它地区区域磁场的走向主要为 NW 向,在此基础上存在着局部的圈闭。研究区自西北至东南磁异常呈现出负—正—负的变化趋势,反映出南海盆地存在着磁异常正负交替变换的特征。

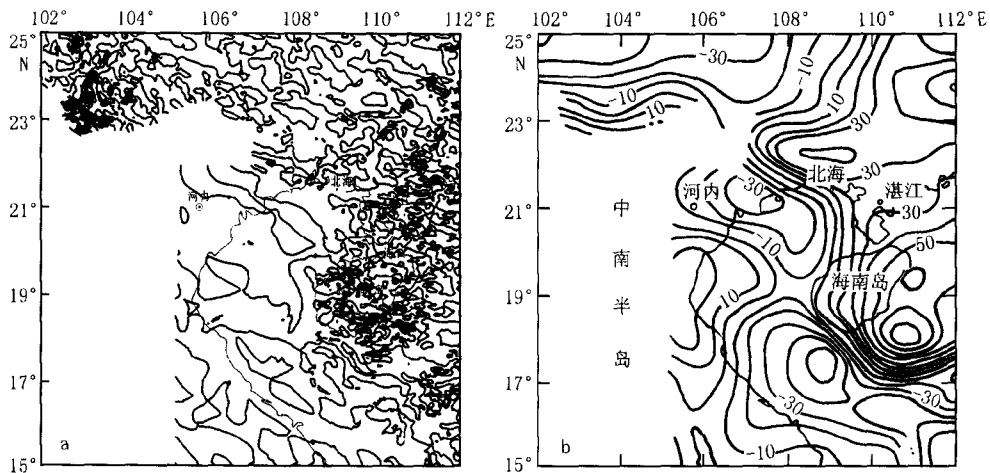


图 5 磁异常小波一阶细节变换(a)、小波四阶逼近变换(b)图

Fig. 5 Map of one-step detail (a) and four-step approach (b) wavelet transforms of magnetic anomalies

3 研究区地壳结构特征

3.1 应用重力资料反演地壳结构

研究区的岩石物性是推断解释地球物理场异常的主要依据,是联系地质与地球物理资料之间的纽带,根据对南海北部盆地钻井取芯样品的测试结果^[7],可以得出研究区的岩石密度的主要特征。同时参考了穿过南海的东、西部两条地学断面^[8]、近期进行的海底地震记录^[9,10]和南海北部陆缘地壳结构探测^[11]结果。在该区域下地壳地震层速度一般为 $6.5\text{--}7.3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,莫霍反射面的层速度一般为 $8.1\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,由此可以得出反演地壳起伏所需的界面密度差与进行沉积层改正的密度参数。

根据以上密度参数并参考研究区反射地震取得的沉积层平面分布^[7]、水深分布对布格重力异常进行了沉积层改正,应用调和级数法^[12]进行了莫霍界面起伏的反演计算(图 6),采用的计算参数为:

- (1) 全部区域内按 $10\text{km}\times 10\text{km}$ 的网格距取重力值;
- (2) 选取标准地壳深度为 27km ;

(3) 地壳底部与上地幔顶部的界面密度差选用 $0.47\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

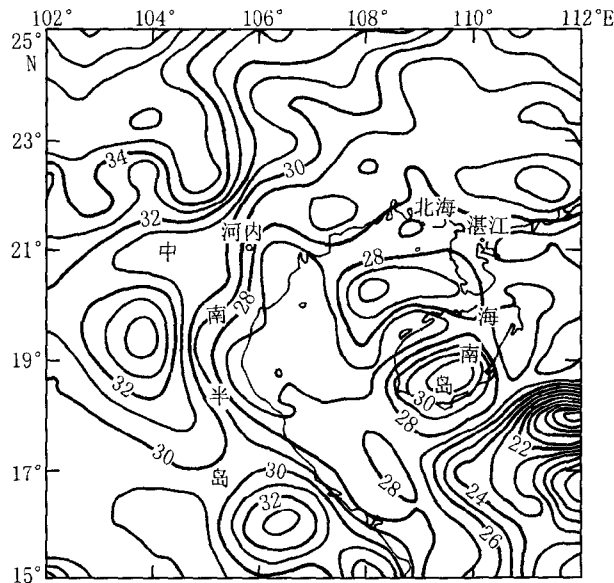


图6 研究区莫霍界面深度图(单位:km)

Fig. 6 Map of Moho depth of study area(unit: km)

从图6可以看出,研究区地壳厚度在17—38km之间变化。大陆地区地壳厚度29—38km,总的趋势是向海域逐渐减薄,在河内西南地区存在一上地幔凹陷区,该地区地壳厚度大于34km,此地区以南地壳厚度自北向南逐渐减薄到28km左右。北部湾盆地地壳厚度变化较为平缓,为29km左右。莺歌海盆地地壳厚度变化同样也较为平缓,为27—28km。而琼东南盆地地壳厚度起伏较为剧烈,在20—28km之间变化,同时在盆地中部地壳厚度最薄(22—23km),说明该区域为上地幔隆起区。在海南岛周边地区地壳厚度存在着陡变带,而岛中部地壳厚度较厚,为31km左右,同地形起伏成镜像关系。地壳厚度最薄(17km左右)处在研究区的东南部(西沙群岛的西北部),自该地区向东南地壳厚度迅速减薄,由于该地区已位于研究区的边缘,因此本文不作过多讨论。从莫霍界面图上可知,研究区存在着多处上地幔隆起区,说明该区域具有复杂的地壳结构。

重力资料的沉积层改正需要详细的沉积厚度分布资料,由于资料的缺乏,因此沉积层改正不够,对反演结果有一定影响,实际的地壳厚度较根据重力资料反演计算得出的厚度薄。根据计算可知,一般沉积层改正值在10 mGal时,可使地壳厚度相应减小1km左右。

3.2 地震层析成像结果

为进一步探讨研究区的地壳结构,我们计算了研究区的地震层析成像结果,并进行了分析对比。地震记录主要来自云南、广西、广东、海南等省78个台站自1981—1998年记录的722个地震的P波到时数据。由于缺乏在中南半岛和南海的地震记录,因此地震层析成像结果在研究区南半部的结果有一定的误差。根据在研究区利用天然地震计算的33km(相应的参考速度为 $7.8\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)处层析成像结果(图7)可以看出,红河北部与南部出现低速圈闭,湛江及邻近地区也为低速区,海南岛基本上为低速区,说明这些地区地壳

相对较厚。自大陆向海区,速度逐渐增加,说明地壳厚度应为逐渐减薄。由于缺乏中南半岛与南海海域的地震记录,因此在这里只能进行定性的对比,给出趋势性的解释,这在缺少地震勘探资料的地区也是一种有效的方法。

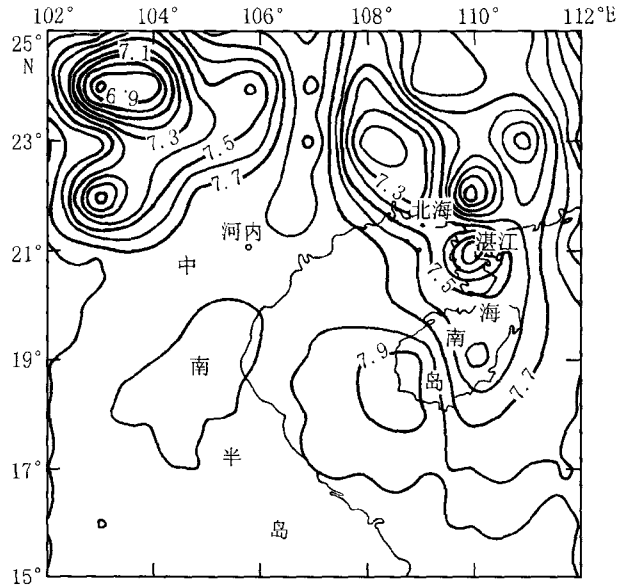


图7 33km地震层析成像结果图

Fig. 7 Seismic tomographic imaging result of 33km

地震层析成像计算的结果同利用重力资料计算结果十分相似,由于两个结果是在独立情况下计算得出的,因此可以认为两者之间相互进行的验证是可信的。

4 讨论与结论

为进一步探讨研究区的地壳结构与地下深部地幔应力场的关系及其地球动力学特征,我们引用了黄培华等^[13]利用地球球谐函数与地幔对流模式之间的关系计算出的地幔对流在岩石圈底部产生的切向应力场(图8)的分布进行了分析。不同阶的应力场反映不同深度的地幔流源对岩石层底面产生的牵引力。一般认为低阶反映长波长地幔流的影响,它可达核幔边界,而高阶则反映为短波长地幔流源,一般可达地下50—260km处。低阶场取决于大范围的密度分布差异,与区域性的板块运动有密切关系。高阶场取决于较浅层小范围内密度分布差异,因而与板内构造或浅层地质构造关系较为密切。

为探讨地幔对流对地壳深部结构的影响,我们以低阶地幔对流的计算结果为基础,探讨了地幔对流与地壳深部结构之间的关系。根据地幔低阶应力场图(图8)可以看出,东亚陆缘低阶地幔应力场总体呈自大陆向海域一侧发散,其方向由WN向ES,南海明显向ES方向发散,这一特征明显地表明中南半岛和南海北部大陆边缘向海洋的扩张,暗示地幔物质运移可能驱使研究区岩石层整体是以SE向为主的运动。根据地热学、流变学、重力学的方法计算得出的结果^[14]具有相似之处。以上的计算结果同研究区地壳厚度自大

陆地区向海域逐渐减薄的趋势一致,说明了研究区深部的地球动力学特征对地壳结构的影响很大,在构造扩张的背景下,整个岩石层拉伸、减薄和裂隙,大陆至南海中央海盆地壳厚度逐渐减薄,直到出现洋壳。

综上所述,研究区的地壳结构与地球深部的地幔物质对流、岩石层热结构及流变特征关系密切,对地壳深部地球动力学特征等问题的探讨将有助于研究区地壳结构的研究。

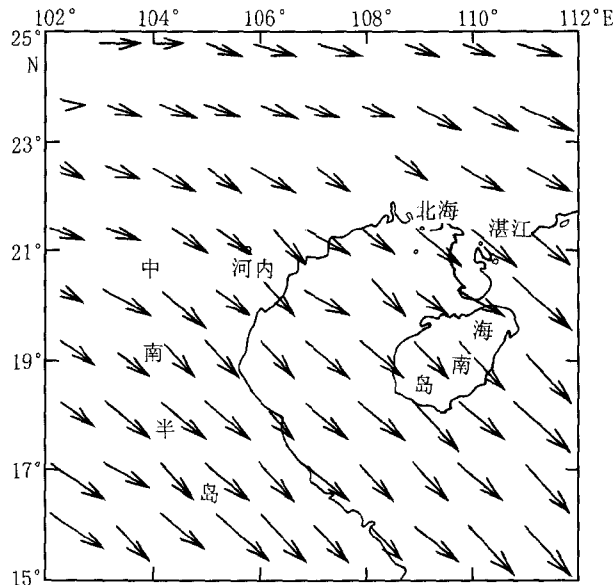


图 8 研究区地幔流低阶应力场图

Fig. 8 Map of lower-step stress field of study area

通过对研究区地球物理场特征与地壳结构的探讨,可以得出以下结论:

(1)研究区域内,布格重力异常以西北低的负值、东南高的正值为特征,局部地区存在异常的圈闭。海域的重力场与大陆地区重力场相连接,说明是大陆重力场的延伸。

(2)磁异常的变化程度可分为 3 个变化区,即磁异常平静区、剧变区及缓变区。磁异常平静区位于研究区的西部,即莺歌海盆地所在位置。剧变区位于海南岛。磁异常平缓区位于平静区及剧变区之外的其它地区,琼东南盆地、北部湾盆地的磁异常具有此特征。

(3)研究区地壳厚度在 17—38km 之间变化,区内存在多处上地幔隆起区,说明该区域具有复杂的地壳结构。

参考文献:

- [1] 刘光鼎主编. 中国海区及邻域地质地球物理特征[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [2] 张启明主编. 莺歌海盆地石油地质论文集[C]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [3] 许东禹, 刘锡清, 张训华, 等. 中国近海地质[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [4] 宋海斌. 南海基底构造格架及张裂大陆边缘的综合地球物理研究[R]. 中国科学院地球物理研究所博士后研究报告, 1998.
- [5] 任纪舜, 金小赤. 红河断裂的新观察[J]. 地质评论, 1996, 42(5): 439—442.

- [6] 郝天珧, 刘建华, 宋海斌, 等. 华南及其相邻边缘海一些重要断裂的地球物理证据[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 13—23.
- [7] 中国科学院地球物理研究所四室. 南海北部陆架西区盆地地球物理特征及深部结构研究[R]. 中国科学院地球物理研究所研究成果报告, 1994.
- [8] 地矿部广州海洋地质调查局(第二海洋地质调查大队). 南海海洋地质联合调查中方报告(第二阶段), 第一分册[R]. 1992.
- [9] 丘学林, 周 蒂. 南海西沙海槽地壳结构的海底地震仪探测与研究[J]. 热带海洋学报, 2000, 19(2): 9—18.
- [10] Qiu X, Ye S. Crustal structure across the Xisha Trough, northwest South China Sea[J]. Tectonophysics, 2001, 341: 179—193.
- [11] 阎 贫, 刘海龄. 南海北部陆缘地壳结构探测结果分析[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 1—12.
- [12] 江为为. 调和级数法与重力资料反演的研究[J]. 中国科学技术大学研究生院学报, 1989, 6(1): 96—104.
- [13] 黄培华, 付容珊. 应用卫星重力数据研究全球岩石层下地幔对流应力场[J]. 中国科学技术大学学报, 1982, 12(2): 20—29.
- [14] 张 健, 熊亮萍, 汪集畅. 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.

CHARACTERS OF GEOPHYSICAL FIELDS AND DEEP CRUSTAL STRUCTURES OF NORTHWESTERN SOUTH CHINA SEA AND HONGHE REGION

JIANG Wei-wei, SONG Hai-bin, XU Yi

(*Institute of Geology and Geophysics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract: This paper analyzed characters of geophysical fields in the northwestern South China Sea and Honghe region. One-step detail and four-step approach wavelet transforms of gravity and magnetic anomalies of the study area were calculated. Crustal structure of the study area was retrieved based on gravity data, testing results of core logging in the northern basins of South China Sea, and seismic probing results of the study area. The results show that the crustal structure of the study area is complex, with the Moho depth from 17 to 38km; the crustal thickness decreases from land to ocean, indicating that the crust has the characters of continental crust and transitional crust. The result obtained from seismic tomographic imaging was used to contrast and validate the result from gravity data. The relationship between deep crustal structure and geodynamical features of study area was discussed on the basis of mantle convection results.

Key words: characters of geophysical field; crustal structure; wavelet transform