

doi:10.3799/dqkx.2010.120

南海北部陆缘的磁异常特征及居里面深度

吴招才¹, 高金耀¹, 赵俐红^{1,3}, 张涛¹, 杨春国¹, 王健²

1. 国家海洋局海底科学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江杭州 310012

2. 中国地质大学资源学院海洋科学与工程系, 湖北武汉 430074

3. 山东科技大学, 山东青岛 266510

摘要: 为了研究南海北部张裂大陆边缘的地壳热结构, 利用船载测量磁力数据, 通过功率谱方法反演南海北部陆缘居里等温面, 并结合深地震剖面、区域断裂及大地热流分布, 讨论了深部热结构状态。结果显示研究区居里面深度在 13~26 km 之间, 在上下陆坡转换带处与莫霍面相交, 北东向断裂多位于居里面梯度带上, 北西向断裂多具有分割、错断的特点, 居里面深度和大地热流值具有相关性。结果揭示了陆架、上陆坡地区磁性体可能主要位于上地壳和下地壳上部, 下陆坡及洋壳区地壳与地幔顶部有被磁化的迹象。磁静区位于居里面上隆区边缘, F3 断裂和 F4 断裂之间可能是残留古洋壳。潮汕凹陷和台西南盆地中央隆起是发生底侵的主要区域, F2 断裂为其北界。

关键词: 南海; 居里面深度; 功率谱分析; 磁异常; 热流。

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2010)06-1060-09

收稿日期: 2010-03-20

Characteristic of Magnetic Anomalies and Curie Point Depth at Northern Continental Margin of the South China Sea

WU Zhao-cai¹, GAO Jin-yao¹, ZHAO Li-hong^{1,3}, ZHANG Tao¹, YANG Chun-guo¹, WANG Jian²

1. Key Laboratory of Submarine Geosciences of SOA, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China

Abstract: In order to investigate thermal state of crust in northern continental margin of the South China Sea, we calculated the Curie point depths with the shipboard magnetic anomaly by employing the method of power-density spectrum analysis. Combining with the seismic section, faults, and the heat flow distribution, the deep thermal structure was discussed in the study area. The result shows that Curie point depths were between 13 and 26 km. NE-directed faults were mostly distributed in the gradient belt of Curie point isotherm, while NW-directed faults had the features of segmentation and fragment. The correlations were apparent between the Curie point depths and heat flow data. It reveals that magnetic bodies in shelf and upper slope were mostly distributed over upper crust and upper part of lower crust; and the crust and the top of mantle in under slope and the oceanic areas were subject to magnetization. Magnetic quiet zone was located at the margin of the uplift of the Curie point isotherm. Residue ancient oceanic crusts extended from F3 fault to F4 fault. Chaoshan depression and centre uplift of the Southwest Taiwan basin were the main areas of underplating, and F2 fault was the north boundary.

Key words: South China Sea; Curie pointdepth; spectral analysis; magnetic anomaly; heat flow.

南海北部陆缘地处欧亚板块、太平洋板块和菲律宾海板块交汇拼合部, 经历了自中生代以来由主动陆缘到被动陆缘、大陆张裂到海底扩张等复杂的

构造演化过程(李家彪和金翔龙, 2008), 存在丰富的构造作用、岩浆活动等地质现象, 是研究陆缘张裂及模式的有利场所。经过近 20 年来在南海北部开展的

国际合作地质—地球物理研究,发现南海北部陆缘上陆坡靠陆侧存在高磁异常带,下陆坡靠海侧存在磁静区,同时地震剖面还揭示下地壳存在高速层,并多被认为与中生代西太平洋俯冲有关的晚侏罗—中白垩的火山活动和与陆缘张裂有关的地幔底侵作用关系密切,对南海北部张裂大陆边缘的成因类型也极其重要(Taylor and Hayes, 1980, 1983; Nissen *et al.*, 1995a; 张毅祥, 2002; Yan *et al.*, 2001; 夏戡原等, 2004; Wang *et al.*, 2006)。

在南海北部陆缘,这一系列的地质现象所反映的南海北部深部的地幔、岩浆活动对深部的热结构状态有深刻影响。Nissen *et al.* (1995c)根据 ESP 剖面及重力和热流数据模拟结果认为简单剪切模型和纯剪切模型都低估了热流数据,相对来说,纯剪切模型与区域地质背景更吻合,但也不排除两种模式结合的可能。施小斌等(2000)认为海底热流由陆架往陆坡、海盆方向增高,其中地幔热流占主导,壳内脆—韧性转换深度约为 16~20 km,其中陆架及上陆坡区略厚;中、下地壳在拉张前也可能存在韧性层。张健和汪集旻(2000)得出南海北部陆缘岩石圈上地壳和岩石圈地幔温度相对低、下地壳相对高的“三明治”结构,低温脆性上地壳以简单剪切方式变形,能沿已有断裂或断层面滑动;下地壳表现为塑性,以延性流动为主。Tanaka *et al.* (1999)利用 CCOP 地磁异常数据按 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 网格间距反演计算了东亚及东南亚的居里面深度,并与一维热导模型做了对比,结果显示南海的居里面在海盆内北部(14~20 km)明显比南部(20~30 km)浅得多,在北部陆缘东部由北往南变浅(26~20 km),但其分辨率严重不足。

作为常用的地球物理探测方法之一,磁异常对地壳中具有磁性岩浆活动的反应十分有效,而这种岩浆活动与地壳深部的热流状态又有紧密联系,因此磁异常常常用来研究与地壳深部热状态有关的动力学过程,居里面深度反演就是手段之一。居里面是指磁性岩石在地温的作用下失去铁磁性而变为顺磁性的等温度面,它反映岩石圈的热状态而非地质构造面,为岩石圈磁性层的下界面,其深度的变化反映了地壳深部的热结构。本文利用国家海洋局第二海洋研究所多年来在南海北部大陆边缘及周围地区积累的高分辨率的船测磁力数据,通过谱分析方法(Tanaka *et al.*, 1999)来反演南海北部陆缘居里面深度,以了解研究区的地壳热状态和动力特征。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文研究范围为 $114.5^{\circ} \text{E} \sim 120^{\circ} \text{E}$, $18^{\circ} \text{N} \sim 23.5^{\circ} \text{N}$,实际计算中为了避免边缘效应,参与处理的数据范围向四周均扩大了 1.5° ,但文中图件只显示了研究范围内的数据。所使用的磁异常数据主要来源于国家海洋局第二海洋研究所在南海北部多年来的磁力调查资料,此外还包含了所收集到的其他单位的船载磁测资料,同时为了数据的完整性,在研究区左上角陆地部分加入了 CCOP 磁力数据(Geological Survey of Japan and CCOP, 1996)。采用墨卡托投影, WGS84 椭球,中央经线 117°E ,标准纬线 22°N 。研究区内海洋磁力测线数据采集的时间跨度为 20 世纪 90 年代至 2009 年,新采集的数据主要集中在研究区的北部近海。在数据编辑时采用了 2009 年最新修订的第 11 代国际地磁参考场 IGRF 球谐系数(<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>)进行了统一的正常场改正,并以 2009 年新测区块数据为基准进行新老数据的归一化调差和拼接处理(高金耀等, 2006),编辑后的测线交点均方差不超过 4 nT,最终研究区内 ΔT 磁异常如图 1 所示。

1.2 计算方法

目前,关于居里面频率域反演方法主要有界面反演法和功率谱法两种,前者是基于界面频谱反演三维磁性层下界面的方法,后者是基于直立棱柱体的方法(管志宁, 2005)。由于研究区位于南海北部海盆边缘的陆坡地区,存在较多岩浆活动,所以在此用离散型棱柱体模型的功率谱法来反演居里深度点。

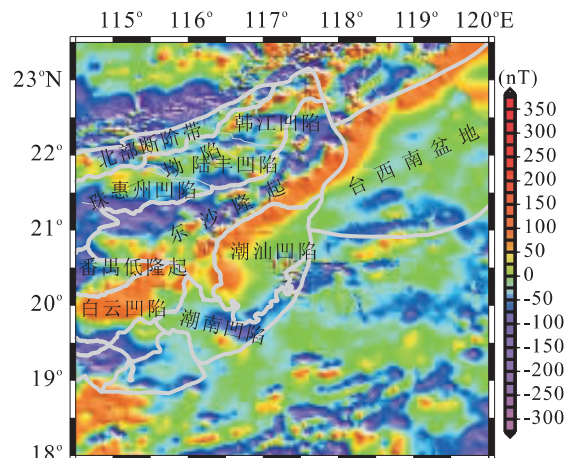


图 1 南海北部陆缘磁异常(ΔT)

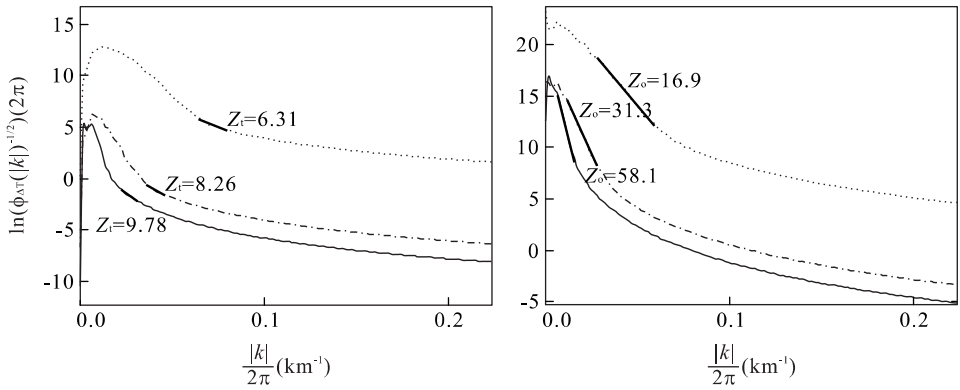


图 2 频谱分析

Fig. 2 Map of spectral analysis

虚线、点划线和实线依次是四阶、五阶和六阶细节的平均径向能谱曲线

以直立棱柱体为模型的功率谱法反演居里面的传统过程为:(1)根据全区磁异常情况,确定一适当大小的方形窗口及其滑动距离,滑动窗口纵横向可以重叠,计算窗内数据的对数功率谱;(2)根据对数功率谱计算直立棱柱体的顶深 Z_t 、中心深度 Z_c 或底面深度 Z_b ,并把底面深度值放在窗口中心作为该点处的居里面深度;(3)按照滑动距离移动窗口至下一个位置,重复(1)和(2)两步,直至得到全区反演居里面结果. 这种方法是基于 Spector-Grant 在统计模型的基础得出的“等效理论”,即多个横向随机分布物体磁场频谱的统计平均值与单个物体磁场等效 (Spector and Grant, 1970). 这种以区域磁异常组合为基础的方法在世界很多地方得到了讨论和应用 (Connard *et al.*, 1983; Blakely, 1988; Okubo and Tsu, 1992; Tanaka *et al.*, 1999; 胡旭芝等, 2006; 李春峰等, 2009).

(1)区域磁性层异常的提取. 实测磁异常是地下各磁性体磁异常总和,包括了区域磁性体上界面和下界面(即居里面)及地下孤立磁性体磁场. 局部和区域磁性体磁异常在波长上具有很大差异,传统方法中一般采用圆滑滤波法去掉浅层的高频成分,用趋势分析法消除大区域的甚低频成分(申宁华等, 1986; 郝书俭等, 1982). 也有直接采用上延某个高度后的结果作为居里面反演的磁异常(胡旭芝等, 2006).

小波多尺度分解能将重磁异常精细的分解到多个不同的尺度上,以反映不同尺度(频率)和深度上的异常,常被用于区域场的分解和分析(侯遵泽和杨文采, 1997; 高德章等, 2000). 刘天佑等(2007)将谱分析方法和小波多尺度分解结合起来分析各个尺度的似深度,并通过模型和实际数据表明具有较好的

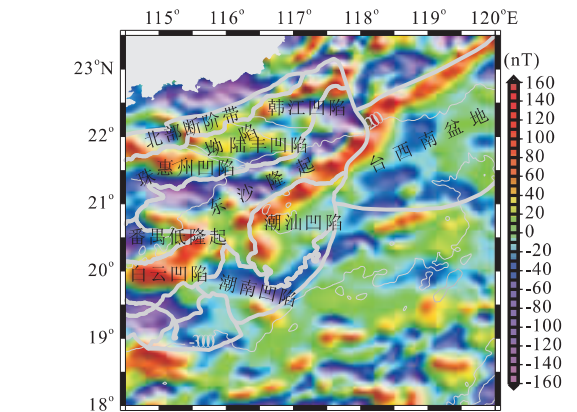


图 3 南海北部陆缘磁异常四阶小波细节

Fig. 3 4th-order wavelet detail of magnetic anomalies

效果. 因此,本文采用小波多尺度分解方法来分离区域磁性层的异常. 图 2 为四、五、六阶小波分解细节的平均对数功率谱,根据平均径向能谱在高频段和低频段直线段拟合的结果,并结合该地区的地质构造情况,认为五阶和六阶细节的计算结果偏大,四阶细节结果最合适(图 3).

(2)滑动窗口的选择. 因为频谱计算与剖面长度有关,所以应选择合适的计算居里面深度的滑动窗口尺度以保证计算频谱的准确性. Okubo *et al.* (1985, 1989)认为窗口尺度应该在磁源质心深度的 12 至 13 倍以上,才能获得较好的居里面深度估计值. Ross *et al.* (2006)通过系统地改变窗口尺度,使波长小于频谱峰值点的波长,认为此时的窗口可以确定磁性层的底. 并且没有采用传统方法中的固定窗口等距滑动的计算方式,而是将子窗口中心放置于具有完整磁异常特征区域的中心,在不同磁场特征区采取不同的窗口尺度,在磁场相对平滑的长波区适当放大窗口尺度,而在相对波动的短波磁场区

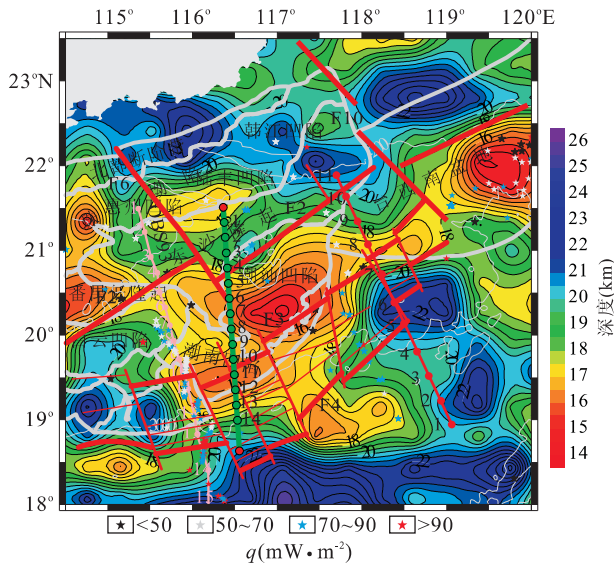


图 4 居里面深度

Fig. 4 Curie point isotherms

适当缩小窗口尺度. 本文由于计算面积不大, 故仍采用传统方法. 研究区内磁性层平均中心深度在 12~13 km 左右, 所以采用子窗口尺寸为 160 km × 160 km, 滑动窗口尺寸为 40 km × 40 km. 在每个子窗口中, 低频段统一采用 0.025~0.060 频段来拟合计算 Z_0 , 高频段统一采用 0.06~0.08 频段来拟合计算 Z_1 (图 2). 图中 $|k|$ 为波数, 单位为 1 km, 计算居里面深度结果如图 4 所示.

2 结果分析与讨论

2.1 南海北部陆缘磁异常特征

南海北部陆缘由 NW 向 SE 分布着 5 个近 NE 向相互平行的构造带, 分别是北部拗陷带、中央隆起带 (即东沙—澎湖—北港隆起带)、南部拗陷带、下陆坡过渡带及海盆区. 相应地, 磁异常也可由北向南分为北部复杂异常区、高磁异常带、陆坡平缓磁异常区 (即南海北部陆缘磁静区) 和海盆磁条带区. 研究区内北部复杂磁异常主要对应的构造为北部断阶带和珠一拗陷, 该区局部磁异常正负相间明显, 靠陆侧多分布细小、杂乱磁异常, 可能反映了海陆过渡区的断裂破碎带; 靠海侧多分布较宽缓的负异常区, 反映了珠 I 拗陷内部的小型沉积凹陷, 如惠州、陆丰、韩江等凹陷.

东沙—澎湖—北港隆起相对应的高磁异常带与华南主要构造带走向近于平行, 位于大陆架边缘, 没有延伸到陆陆过渡带, 幅值在 50~200 nT 之间. 以

100 nT 异常等值线的分布来看, 该高磁异常带自西向东由 4 个高磁异常圈闭组成, 连续性并不好. 异常带向北被台湾岛截断, 向西终止于西沙海槽和西北北海盆北侧, 显示出受新生代构造活动改造和南海扩张改造的迹象. 虽然该高磁异常带的成因尚存在争议, 但普遍认为与晚中生代主动陆缘的构造活动有关. 许东禹等 (1997) 认为高磁异常带可能是和浙闽沿海侏罗—白垩纪岩浆构造带的同期产物, 在后期的构造作用下与其断裂、分离. 周蒂等 (2006) 也认为其与浙闽东部具有高剩磁的中酸性火山岩成因相似, 代表着与中生代俯冲增生带相伴的火山弧. 李家彪和金翔龙 (2008) 认为该带是晚白垩世北移的大陆型地壳碎块与亚洲大陆东南缘碰撞形成的地壳重熔性岩浆岩带.

位于高磁异常带和海盆磁条带区之间的磁静区表现为 0 nT 左右的大面积低值异常, 明显不同于其南北两侧的异常特征. 细致分析还可发现存在内外磁静区的差异 (高金耀等, 2009; 吴招才等, 2010). 至于这种低幅值磁异常的成因和该区地壳性质也还存在较大的不确定性. 在南海北部陆缘 OBS 地震剖面揭示的下地壳高速层 (Yan *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2006), 普遍认为其成因是岩浆上涌至地壳下部底侵、增厚形成. 而磁静区与减薄的下地壳及其下的高速层具有很好的对应性, 并多认为与中生代残留古洋壳的存在有关 (夏戡原和黄慈流, 1995; Kido *et al.*, 2001).

2.2 居里面起伏特征及与地震剖面的对比

从图 4 中的反演结果看到, 南海北部陆缘居里面深度变化范围在 13~26 km 之间. 但它的走向明显不同于该区呈 NE 走向的磁异常, 而是大体呈 EW 走向, 由北向南有 3 个隆拗相间的特征区. 珠 I 凹陷、台西南盆地中的北部凹陷及北侧的台湾浅滩地区等地居里面下拗; 番禺低隆起, 潮汕凹陷、潮南凹陷及台西南盆地中央隆起带处居里面上隆; 惠州凹陷和陆丰凹陷南侧及西北海盆北侧存在小的局部居里面上隆, 深度浅于 18 km; 在白云凹陷和潮汕凹陷东南侧的北坡海山和笔架海山海域存在局部下拗, 深度在 22 km 以上; 东沙隆起的居里面深度变化平缓, 处于由北往南变浅的过渡带, 深度在 20 km 左右. 位于下陆坡处的外磁静区处于上隆区的边缘, 居里面深度在 18 km 左右.

OBS93 剖面震相分析和射线追踪模拟得到的地壳厚度从陆架的 22 km 减薄至海盆区的 8 km, 下地壳底部存在平均厚度为 3~5 km 的高速层,

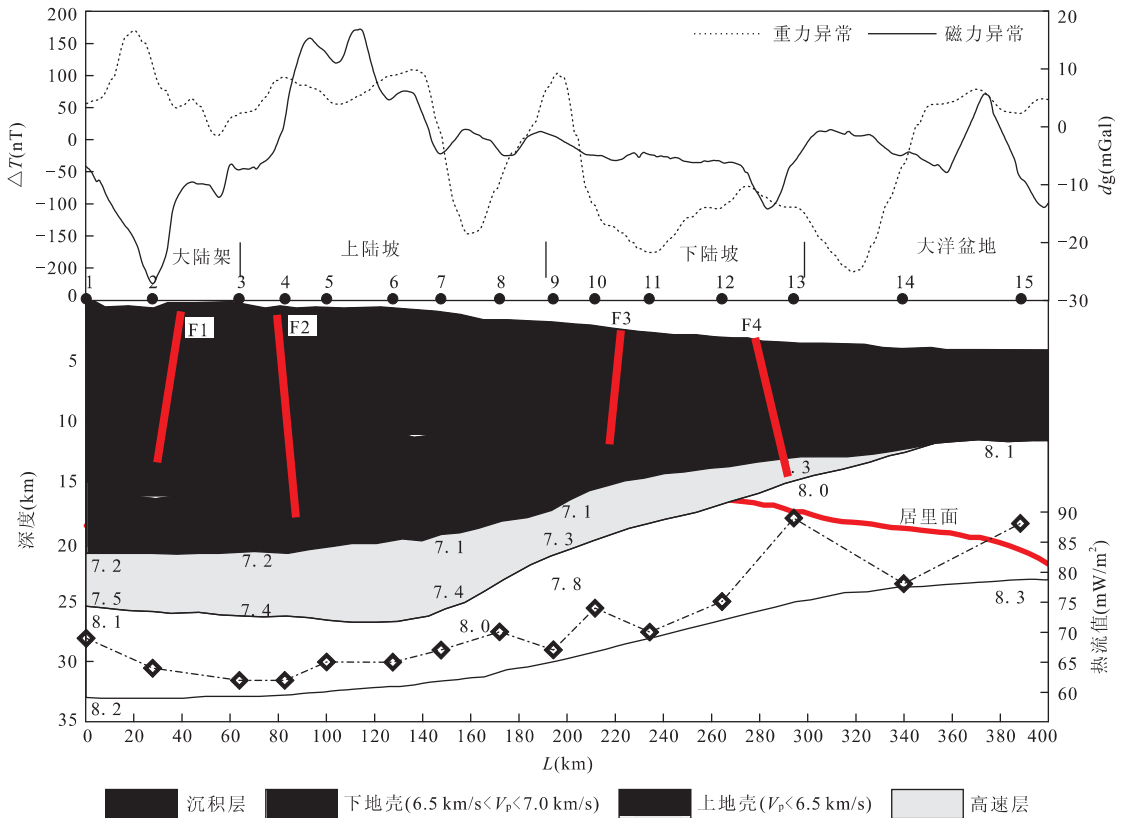


图 5 OBS93 速度结构剖面与重磁、居里面深度及大地热流值对照

Fig. 5 OBS93 velocity section and its magnetic anomaly, Curie point isotherms and heat flow profile

12—14号站之间对应磁静区(Yan *et al.*, 2001), 3—7号站之间对应高磁异常带,消除受斜磁化影响后对应的是2—4号站位(吴招才等,2010)。由图5可以看出,居里面和莫霍面刚好在F3断裂处相交,在北侧居里面高于莫霍面,居里面深度在18 km左右,比莫霍面深度浅4 km左右,推测受到地壳拉伸减薄后的深部热作用控制;而在F3断裂南侧居里面深度逐渐变大,莫霍面逐渐变浅,两者最大相差在10 km以上。由此可以推测,南海北部陆缘从陆架到上陆坡,磁性源体可能主要集中于上地壳和下地壳上部,3号站位下的下地壳界面上升变浅可能是高磁异常的起因之一;而在下陆坡至洋盆区,岩石圈上地幔则可能有被地球磁场磁化的迹象。

南海北部陆缘的热一流变结构分析表明,在东部陆架区及上陆坡区,埋深大于20 km左右的地壳的流变性质表现为韧性,而在下陆坡及洋壳区地壳与地幔顶部构成统一的脆性层,底界埋深达30~32 km,莫霍面温度在陆架区可达500~700 °C,而在海盆、下陆坡区为200~300 °C(施小斌等,2000;施小斌,2008),这与居里面深度反映的结果也一致,说明了利用磁力异常来反演居里面的可靠性,可以用

来评价区域热结构。

2.3 居里面变化与主要断裂的对应性分析

在主要断裂处,居里面都有明显的起伏变化特征。NEE向的3条主要断裂中,F4断裂(也称中央海盆北缘边界断裂)为陆壳与洋壳的分界,也是居里面的明显变化带,北侧为主要隆起区,南侧为下拗区,大地热流值在此也表现为高热流带(施小斌等,2003)。此断裂为岩石圈断裂,南侧为海底扩张早期已冷却的洋壳,北侧为岩浆底侵作用活动区,可能由此导致两侧居里面深度不同。

F2断裂为东沙隆起的南侧边界,是南海东北陆缘区的初始裂陷带(孙珍等,2005),北侧为东沙隆起区,南侧为拉伸的陆壳,莫霍面深度由27 km抬升到16 km左右。该断裂两侧的居里面深度也具有截然不同的特征,这可能说明岩浆的底侵活动仅仅在地壳的拉伸减薄部位发生。

F3断裂位于上下陆坡的转换带,也称为中陆坡断裂带,北侧为具有中生代沉积的潮汕凹陷和白云凹陷,南侧则为具有弱正异常特征的外磁静区,其两侧的居里面变化不大,主要位于由上隆向下拗的过渡区内。

NW 向的 F6 断裂位于东沙群岛西南,切割 NE 向和 NEE 向断裂,是潮汕凹陷的西界,其两侧基底构造差异表明其在中生代和新生代具有长期活动性(陈汉宗等,2005). 该断裂在居里面上的特征表现为隆起区的错断,与其错断高磁异常带的特征相似.

F10 断裂位于台西南盆地西侧,地震剖面上走滑活动迹象明显(钟广见等,2008),重磁异常上表现为重力梯度带及高磁异常带错动(郝天珧等,2002;陈汉宗等,2005). 其在居里面上的特征与 F6 断裂类似,也是表现为隆起区的错断.

2.4 居里面起伏及与海底大地热流值相关性探讨

海底大地热流的大小与地球内部热过程、构造作用、浅部构造及地壳和上地幔结构密切相关. 南海目前的热流数据主要来源于海底热探针、石油钻井与深海钻孔的系统测温数据,前者易受到浅层因素的干扰,后者多存在测温时间偏短的问题,且在整体上较为分散,质量偏低. 居里面能够反映地壳深部热状态,居里面起伏与大地热流分布具有一定相关性. 本研究中系统收集了研究区内 308 个大地热流数据(<http://www.heatflow.und.edu/>; Nissen *et al.*, 1995b; Shyu *et al.*, 1998; 徐行等,2006; 施小斌,2008; 米立军等,2009),并将其叠放于居里面深度图上(图 4). 除去一些孤立的散点外,可以看到居里面深度和大地热流值具有一定的相关性,较低的热流值分布于居里面下拗区或下拗边缘,较高的热流值分布于居里面上隆区. 图 5 中显示了 OBS93 剖面上 15 个站位的大地热流值,在过 F3 断裂往南大地热流值逐渐升高,与居里面深度相关.“热”岩石圈底界埋深在北部大陆架区可达 96 km,往陆坡方向逐渐抬升,洋壳区抬升至 60 km 左右(施小斌,2008),也与居里面深度有对应关系.

2.5 讨论

高磁异常带所对应的东沙隆起构造多被认为是与中生代俯冲增生带相伴的火山弧(周蒂等,2006),结果显示其正好处于居里面变化平缓的过渡带上,表明其深部不存在大规模的热活动. 此带的化极磁异常表现为高背景值上叠加小异常圈闭(吴招才等,2010),推测可能是地壳物质在中生代晚期发生挤压、增生,重熔后导致深部物质磁性增强. 而后期岩浆活动沿其南侧的 F2 断裂侵入形成火山弧.

潮汕凹陷及南侧是研究区主要的居里面上隆区,可能反映了与下地壳高速层有关的地幔底侵,热物质上涌,这与 LF35-1-1 钻井结果相一致(杨树春等,2008);西侧与之相邻的白云凹陷则是居里面下

拗区,该区在拉张变形前具有一个热减薄的初始地壳(张云帆等,2007),可能受地幔底侵的热活动影响较小. 台西南盆地中央隆起居里面也是隆起明显,可能反映了中生代古俯冲带在台西南盆地的影响. 而其西南面的北坡海山和笔架海山附近海域的居里面下拗深度在 22 km 以上,该区与白云凹陷类似,位于 NE 向和 NW 向断裂相交的构造转换带上,脆性地壳或上地幔部分熔融,岩石圈强烈减薄,在 NW 向基底断裂的控制下(孙珍等,2005, 2009)上涌并向北东方向运移形成底侵.

而且,对比南海北部陆缘的主要断裂分布和居里面变化特征可以发现,在 F6 和 F10 两条 NW 向断裂与 NE 向 F2 断裂的两个相错断点的东南侧分别存在潮汕凹陷和台西南盆地中央隆起的居里面上隆区,而在相对的西南侧分别存在白云凹陷和笔架海山海域的居里面下拗区. 这可能反映了断裂对该区深部热状态的重要控制作用,从这个角度可以推测,底侵作用可能只局限在 F2 断裂以南.

另外,位于 F3 和 F4 断裂之间的磁静区位于居里面隆起区的边缘,F3 断裂处的居里面和莫霍面相交,可能预示着其两侧地壳性质不相同. 从磁静区成因角度来看,多认为是残留古洋壳在底侵作用下而导致磁性减弱,因此 F3 和 F4 断裂之间可能是残留古洋壳的分布范围.

3 结论

本文通过对船测磁异常的功率谱反演得到南海北部陆缘居里面深度,结合该区的断裂和大地热流分布,探讨了南海北部地壳深部热结构状态,主要结论如下:(1)南海北部陆缘居里面深度在 13~26 km 之间,由北向南有 3 个隆拗相间. 在上下陆坡转换带处的 F3 断裂居里面和莫霍面相交,其北侧居里面深度比莫霍面深度浅,南侧居里面比莫霍面深;陆架到上陆坡,磁性源体可能主要集中于上地壳和下地壳上部;下陆坡及洋壳区地壳与地幔顶部有被磁化的迹象.(2)居里面起伏变化与主要断裂对应关系明显,NE 向断裂多位于居里面上隆与下拗的过渡区域,而 NW 向断裂多是具有分割、错断的特点,在 NE 向和 NW 向断裂相交形成的构造转换带是居里面局部下拗区,在其 NE 方向形成上隆区,反映了断裂对深部热状态的重要控制作用,底侵作用可能只局限在 F2 断裂以南.(3)居里面深度和大地热流值具有相关性,较低的热流值分布于居里面下拗区或

下坳边缘,较高的热流值分布于居里面上隆区. 潮汕凹陷和台西南盆地中央隆起 2 个居里面隆起区的主要区域. 磁静区位于居里面上隆区的边缘, F3 断裂和 F4 断裂之间可能是残留古洋壳.

References

- Blakely, R. J., 1988. Curie temperature isotherm analysis and tectonic implications of aeromagnetic data from Nevada. *Journal of Geophysical Research*, 93 (10): 11817—11832. doi:10.1029/JB093iB10p11817
- Chen, H. Z., Wu, X. J., Zhou, D., et al., 2005. Meso-Cenozoic faults in Zhujiang River Mouth basin and their geodynamic background. *Journal of Tropical Oceanography*, 24(2): 52—61 (in Chinese with English abstract).
- Connard, G., Couch, R., Gemperle, M., 1983. Analysis of aeromagnetic measurements from the Cascade Range in Central Oregon. *Geophysics*, 48: 376—390. doi: 10.1190/1.1441476
- Gao, D. Z., Hou, Z. Z., Tang, J., 2000. Multiscale analysis of gravity anomalies on East China Sea and adjacent regions. *Chinese Journal of Geophysics*, 43(6): 842—849 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J. Y., Wu, Z. C., Wang, J., et al., 2009. Review of researches on the magnetic quiet zone at the northern continental margin of the South China Sea and its comparison to those in the global oceans. *Advances in Earth Science*, 24(6): 577—587 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J. Y., Zhang, T., Tan, Y. H., et al., 2006. Constraint least-square adjustment for marine gravity and magnetic track-line data in irregular survey network with arbitrary error model. *Hydrographic Surveying and Charting*, 26(4): 6—10 (in Chinese with English abstract).
- Geological Survey of Japan and Coordinating Committee for Coastal and Offshore Geoscience Programmes in East and Southeast Asia (CCOP), 1996. Magnetic anomaly map of East Asia 1 : 4 000 000 CD-ROM version, Digital Geoscience Map 2, P—1.
- Guang, Z. N., 2005. Geomagnetic field and magnetic exploration. Geological Publishing House, Beijing, 249—255 (in Chinese).
- Hao, S. L., Gao, H. G., Wang, C. H., 1982. Isothermal surface of Curie temperature around the Beijing area and its relation to earthquakes. *Chinese Journal of Geophysics*, 25 (3): 264—269 (in Chinese with English abstract).
- Hao, T. Y., Liu, J. H., Song, H. B., et al., 2002. Geophysical evidences of some important faults in South China and adjacent marginal seas region. *Progress in Geophysics*, 17(1): 13—23 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Z., Yang, W. C., 1997. Wavelet transform and multi-scale analysis on gravity anomalies of China. *Chinese Journal of Geophysics*, 40(1): 85—95 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. Z., Xu, M. J., Xie, X. A., et al., 2006. A characteristic analysis of aeromagnetic anomalies and Curie point isotherms in Northeast China. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(6): 1674—1681 (in Chinese with English abstract).
- Kido, Y., Suyehiro, K., Kinoshita, H., 2001. Rifting to spreading process along the northern continental margin of the South China Sea. *Marine Geophysical Researches*, 22(1): 1—15. doi:10.1023/A:1004869628532
- Li, C. F., Chen, B., Zhou, Z. Y., 2009. Deep crustal structures of eastern China and adjacent seas revealed by magnetic data. *Science in China (Series D)*, 52 (7): 984—993. doi:10.1007/s11430-009-0096-x
- Li, J. B., Jin, X. L., 2008. East Asia tectonic events and West Pacific marginal seas evolution. In: Jin, X. L., Qin, W. S., Zhu, R. X., et al., eds., Research and progress of geology and geophysics in China—celebrating the 80 birthday of Academician Liu Guangding. Ocean Press, Beijing, 443—451 (in Chinese).
- Liu, T. Y., Wu, Z. C., Zhan, Y. L., et al., 2007. Wavelet multi-scale decomposition of magnetic anomaly and its application in searching for deep-buried minerals in crisis mines: a case study from Daye iron mines. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1): 135—140 (in Chinese with English abstract).
- Mi, L. J., Yuan, Y. S., Zhang, G. C., et al., 2009. Characteristics and genesis of geothermal field in deep-water area of the northern South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 30(1): 27—32 (in Chinese with English abstract).
- Nissen, S. S., Hayes, D. E., Buhl, P., et al., 1995a. Deep penetration seismic soundings across the northern margin of the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 100 (B11): 22407—22433. doi: 10.1029/95JB01866
- Nissen, S. S., Hayes, D. E., Yao, B. C., et al., 1995b. Gravity, heat flow, and seismic constraints on the processes of crustal extension; northern margin of the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 100 (B11): 22447—22483. doi:10.1029/95JB01868
- Okubo, Y., Graf, R. J., Hansen, R. O., 1985. Curie point depths of the island of Kyushu and surrounding areas, Japan. *Geophysics*, 50 (3): 481—494. doi: 10.1190/1.1441926
- Okubo, Y., Tsu, H., 1992. Depth estimate of two-dimensional source using spectrum of one-dimensional linear trending

- magnetic anomaly. *Butsuri Tansa*, 45:398—409.
- Okubo, Y., Tsu, H., Ogawa, K., 1989. Estimation of Curie point temperature and geothermal structure of island arcs of Japan. *Tectonophysics*, 159(3—4): 279—290. doi:10.1016/0040—1951(89)90134—0
- Ross, H. E., Blakely, R. J., Zoback, M. D., 2006. Testing the use of aeromagnetic data for the determination of Curie depth in California. *Geophysics*, 71(5): L51—L59. doi:10.1190/1.2335572
- Shen, N. H., Li, C. H., Zhang, G. B., et al., 1986. Curie isotherm depths calculation from aeromagnetic anomalies over Xikang and Yunan continental paleorift zone. *Chinese Journal of Geophysics*, 29(5): 496—502 (in Chinese with English abstract).
- Shi, X. B., 2008. Thermo structure of lithosphere in the northern margin on the South China Sea. In: Li, J. B., ed., *Evolution of China's marginal seas and its effect of natural resources*. Ocean Press, Beijing, 63—68 (in Chinese).
- Shi, X. B., Qiu, X. L., Xia, K. Y., et al., 2003. Heat flow characteristics and its tectonic significance of South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 22(2): 63—73 (in Chinese with English abstract).
- Shi, X. B., Zhou, D., Zhang, Y. X., 2000. Lithospheric thermal-rheological structures of the continental margin in the northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 45(22): 2107—2112.
- Shyu, C. T., Hsu, S. K., Liu, C. S., 1998. Heat flows off Southwest Taiwan; measurements over mud diapirs and estimated from bottom simulating reflectors. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 9(4): 795—812.
- Spector, A., Grant, F. S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35: 293—302 doi:10.1190/1.1440092
- Sun, Z., Pang, X., Zhong, Z. H., et al., 2005. Dynamics of Tertiary tectonic evolution of the Baiyun sag in the Pearl River Mouth basin. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 489—498 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Sun, L. T., Zhou, D., et al., 2009. Discussion on the South China Sea evolution and lithospheric breakup through 3D analogue modeling. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(3): 435—447 (in Chinese with English abstract).
- Tanaka, A., Okubo, Y., Matsubayashi, O., 1999. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia. *Tectonophysics*, 306(3—4): 461—470. doi:10.1016/S0040—1951(99)00072—4
- Taylor, B., Hayes, D. E., 1980. The tectonic evolution of the South China Sea basin. In: Hayes, D. E., ed., *The tectonic and geological evolution of Southeast Asian seas and islands 1*. *Am. Geophys. Union, Washington, D. C.*, 23: 89—104.
- Taylor, B., Hayes, D. E., 1983. 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 2*. *Am. Geophys. Union, Washington, D. C.*, 27: 23—56
- Wang, T. K., Chen, M. K., Lee, C. S., et al., 2006. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 412(3—4): 237—254. doi:10.1016/j.tecto.2005.10.039
- Wu, Z. C., Gao, J. Y., Zhao, L. H., et al., 2010. Magnetic field characteristics and its tectonic significance of the northern South China Sea. *Journal of Tropic Oceanography* (in press) (in Chinese with English abstract).
- Xia, K. Y., Huang, C. L., 1995. Ocean drilling program and the South China Sea. *Advance in Earth Sciences*, 10(3): 246—250 (in Chinese with English abstract).
- Xia, K. Y., Huang, C. L., Huang, Z. M., 2004. Deep structure characteristics of the Southwest Taiwan crust in northeast South China Sea. In: Chen, Y. T., et al., eds., *Advances in seismology and physics of earth's interior in China—in honor of Academician Zeng Rongsheng' 80th birthday*. Seismology Press, Beijing, 135—145 (in Chinese).
- Xu, D. Y., Liu, X. Q., Zhang, X. H., et al., 1997. *China offshore geology*. Geological Publishing House, Beijing, 240—260 (in Chinese).
- Xu, X., Shi, X. B., Luo, X. H., et al., 2006. Heat flow measurements in the Xisha trough of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(4): 51—58 (in Chinese with English abstract).
- Yan, P., Zhou, D., Liu, Z. S., 2001. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 338(1): 1—21. doi:10.1016/S0040—1951(01)00062—2
- Yang, S. C., Tong, Z. G., He, Q., et al., 2008. Mesozoic hydrocarbon generation history and igneous intrusion impacts in Chaoshan depression, South China sea; a case of LF35-1-1 well. *China Offshore Oil and Gas*, 20(3): 152—156 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Wang, J. Y., 2000. Deep geodynamic characteristics of tectonic spreading in continental margin of the northern South China Sea. *Science in China (Series D)*, 30(6): 561—567.
- Zhang, Y. F., Sun, Z., Zhou, D., et al., 2007. Stretching characteristics and its dynamic significance of the north-

ern continental margin of South China Sea. *Science in China (Series D)*, 51(3): 422–430. doi: 10. 1007/s11430-008-0019-2

Zhang, Y. X., 2002. Flat and low abnormality area of magnetics in northern South China Sea and its implications of geology. *The Fifth Symposium of Oceanology of the Seas Around Taiwan Island*, 146–147 (in chinese).

Zhong, G. J., Wu, N. Y., Lin, Z., et al., 2008. Characteristics of faults on the northeastern continental slope of the South China Sea and their controls on basin evolution. *Geology in China*, 35(3): 456–462 (in Chinese with English abstract).

Zhou, D., Wang, W. Y., Wang, J. L., et al., 2006. Mesozoic subduction-accretion zone in northeastern South China Sea inferred from geophysical interpretations. *Science in China (Series D)*, 49(5): 471–482. doi: 10. 1007/s11430-006-0471-9

附中文参考文献

陈汉宗, 吴湘杰, 周蒂, 等, 2005. 珠江口盆地中新世代主要断裂特征和动力背景分析. *热带海洋学报*, 24(2): 52–61.

高德章, 侯遵泽, 唐健, 2000. 东海及邻区重力异常多尺度分解. *地球物理学报*, 43(6): 842–849.

高金耀, 吴招才, 王健, 等, 2009. 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. *地球科学进展*, 24(6): 577–587.

高金耀, 张涛, 谭勇华, 等, 2006. 不规则重磁测线网误差模型的约束最小二乘平差. *海洋测绘*, 26(4): 6–10.

管志宁, 2005. *地磁场与磁力勘探*. 北京: 地质出版社, 249–255.

郝书俭, 高华根, 王春华, 1982. 京津唐地区居里等温面及其与地震的关系. *地球物理学报*, 25(3): 264–269.

郝天璁, 刘建华, 宋海斌, 等, 2002. 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*, 17(1): 13–23.

侯遵泽, 杨文采, 1997. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析. *地球物理学报*, 40(1): 85–95.

胡旭芝, 徐鸣洁, 谢晓安, 等, 2006. 中国东北地区航磁特征及居里面分析. *地球物理学报*, 49(6): 1674–1681.

李春峰, 陈冰, 周祖翼, 2009. 中国东部及邻近海域磁异常数据所揭示的深部构造. *中国科学(D辑)*, 39(12): 1770–1779.

李家彪, 金翔龙, 2008. 东亚地质构造事件与西太平洋边缘海演化. 见: 金翔龙, 秦蕴珊, 朱日祥, 等编, *中国地质地球物理研究进展——庆贺刘光鼎院士八十华诞*. 北京: 海洋出版社, 443–451.

刘天佑, 吴招才, 詹应林, 等, 2007. 磁异常小波多尺度分解及

危机矿山的深部找矿, 以大冶铁矿为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(1): 135–140.

米立军, 袁玉松, 张功成, 等, 2009. 南海北部深水地区地热特征及其成因. *石油学报*, 30(1): 27–32.

申宇华, 李春华, 张贵宾, 等, 1986. 用康滇大陆古裂谷带地区航磁异常计算居里深度. *地球物理学报*, 29(5): 496–502.

施小斌, 2008. 南海北部陆缘岩石圈热结构. 见: 李家彪, *中国边缘海形成演化与资源效应*. 北京: 海洋出版社, 63–68.

施小斌, 丘学林, 夏戡原, 等, 2003. 南海热流特征及其构造意义. *热带海洋学报*, 22(2): 63–73.

施小斌, 周蒂, 张毅祥, 2000. 南海北部陆缘岩石圈热—流变结构. *科学通报*, 45(15): 1660–1665.

孙珍, 庞雄, 钟志洪, 等, 2005. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学. *地学前缘*, 12(4): 489–498.

孙珍, 孙龙涛, 周蒂, 等, 2009. 南海岩石圈破裂方式与扩张过程的三维物理模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(3): 435–447.

吴招才, 高金耀, 赵俐红, 等, 2010. 南海北部磁场特征及其构造意义. *热带海洋学报(待刊)*.

夏戡原, 黄慈流, 1995. 深海钻探与南海. *地球科学进展*, 10(3): 246–250.

夏戡原, 黄慈流, 黄志明, 2004. 南海东北部台湾西南海区深部地壳结构特征. 见: 陈运泰等, *中国大陆地震学与地球内部物理学研究进展——庆贺曾融生院士八十寿辰*. 北京: 地震出版社, 135–145.

许东禹, 刘锡清, 张训华, 等, 1997. *中国近海地质*. 北京: 地质出版社, 240–260.

徐行, 施小斌, 罗贤虎, 等, 2006. 南海西沙海槽地区的海底热流测量. *海洋地质与第四纪地质*, 26(4): 51–58.

杨树春, 仝志刚, 贺清, 等, 2008. 潮汕拗陷中生界生烃历史及火成岩侵入影响分析——以 LF35-1-1 井为例. *中国海上油气*, 20(3): 152–156.

张健, 汪集暘, 2000. 南海北部陆缘带构造扩张的深部地球动力学特征. *中国科学(D辑)*, 30(6): 561–567.

张云帆, 孙珍, 周蒂, 等, 2007. 南海北部陆缘新生代地壳减薄特征及其动力学意义. *中国科学(D辑)*, 37(12): 1609–1616.

张毅祥, 2002. 南海北部磁静区及其地质意义. *海峡两岸第5届台湾邻近海域海洋科学研讨会论文集(台北)*, 146–147.

钟广见, 吴能友, 林珍, 等, 2008. 南海东北陆坡断裂特征及其对盆地演化的控制作用. *中国地质*, 35(3): 456–462.

周蒂, 王万银, 庞雄, 等, 2006. 地球物理资料所揭示的南海东北部中生代俯冲增生带. *中国科学(D辑)*, 36(3): 209–218.