

文章编号: 1001-8166(2009)06-0577-11

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*

高金耀¹, 吴招才¹, 王健², 杨春国¹, 张涛¹

(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)

摘要:磁静区与磁异常条带不同, 具有宽缓的低幅值磁异常特征, 但可能同样包含了从陆壳张裂到海底扩张早期的构造活动和演化信息。为了加深认识南海北部陆缘磁静区, 归纳了全球深海和边缘两大类型磁静区的物理、化学及构造三大成因, 主要包括大西洋和西太平洋侏罗纪磁静区, 以及北太平洋、印度洋和南大洋白垩纪磁静区, 强调磁静区与不同程度地幔柱活动、斜交扩张初始产生的小型错断磁源体及隐含弱磁条带关系的重要性。总结了南海北部陆缘磁静区的研究现状, 并从区域综合地球物理和地幔热活动作用两方面探讨了南海北部陆缘磁静区的可能成因机制, 最后阐述了需要关注的研究重点及其研究意义。

关键词:磁静区; 南海北部陆缘; 全球大洋; 成因机制

中图分类号: P318.4; P736.1 **文献标志码:** A

1 引言

自 Roff 等^[1]在大西洋北美陆缘发现海底磁条带以来, 因这种异常幅值在 200 ~ 400 nT 之间、宽度不过数十公里的条带状磁异常与海底扩张关系密切^[2], 对其的调查研究一直备受重视。但在大洋中还存在另一种形态的磁异常, 幅值较小, 在海面上的异常值一般不超过 ± 75 nT, 而宽度一般超过 100 km, 并且多数位于洋盆靠近陆架的转折带, 这样的磁异常区域称之为磁静区 (Magnetic Smooth 或 Quiet Zone, MQZ)。1961 年, King 等^[3,4]在一条穿过北大西洋海盆的磁异常剖面中首次发现 300 ~ 500 km 宽的低幅值磁静区, 随后在南大西洋、印度洋和太平洋均发现有磁静区的存在^[5]。作为海底扩张重要证

据之一的海底磁条带, 通过地磁极性年代表的比对, 能够完整地反映海底扩张的历史和模式。同样, 大量研究表明磁静区并不缺乏海底构造活动信息, 可能反映了陆壳张裂及海底扩张早期的构造演化的重要特征, 甚至扩张期间地磁极性变化的某种特征。研究磁静区成因机制, 并从中提取弱磁条带、磁极倒转、扩张过程和构造扰动等信息, 有助于了解大陆边缘张裂的构造演化过程。Taylor 等^[6]最先提出了南海北部陆缘磁静区的存在, 其后该区进行过大量地质、地球物理调查, 但该磁静区的起源还不是十分清楚。从磁静区的角度看, 其起源不管是岩浆活动的某种方式还是地磁极性变化某种特征的反映, 都有助于加深认识南海北部被动大陆边缘的火山型或非火山型的初始张裂演化过程。

* 收稿日期: 2008-11-11; 修回日期: 2009-02-28.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“南海北部大陆边缘磁静区的构造成因及其动力学意义”(编号: 40776036); 国家重点基础研究发展计划项目“南海大陆边缘动力学及油气资源潜力”(编号 2007CB411702); 我国近海海洋综合调查与评价专项“我国近海海洋地球物理调查研究”(编号: 908-ZC-1-06) 联合资助。

作者简介: 高金耀(1962-), 男, 浙江平湖人, 研究员, 理学博士, 博导, 主要从事海洋地球物理和海底构造研究。

E-mail: jygao@mail.hz.zj.cn

2 全球大洋中的磁静区研究

2.1 磁静区及起源研究

总体来讲,磁静区的起源,有些是因为地磁极性长时间没有反转,或者地磁场虽有反转但强度长时间很低,因而造成具有全球同期性的磁静区;有些由于构造状态、热作用等原因将原先记录的磁异常抹掉,也能造成磁静区,这些是局部性的。在全球地磁异常背景上,图 1 标出了全球大洋中已知的主要磁静区相应位置。

大洋中的磁静区可归为两类:一类是远离陆缘的深海磁静区,多数对称于洋中脊,其起源一般和地磁极性不变期有关。中生代存在 3 个地磁极性不变间隔期:白垩纪正地磁极性期(称为 Mercanton 期,120 ~ 70 Ma BP);侏罗纪正地磁极性期(称为 Craham 期,200 ~ 150 Ma BP);二叠纪负地磁极性期(称为 Kiaman 期,270 ~ 230 Ma BP)^[7]。Larson 等^[8]对太平洋和中北大西洋的磁异常进行比对,将海底扩张所记录的地磁倒转时间表上推到早侏罗纪,表明白垩纪和侏罗纪存在地磁极性不变期,并造成白垩纪和侏罗纪磁静区。南大西洋、印度洋和北太平洋中的深海磁静区已证实了与白垩纪地磁极性不变间隔期有关,而在中北大西洋和南太平洋中还有待证实。西太平洋马里亚纳弧附近的磁静区与侏罗纪地磁极性不变间隔期有关^[5]。

这种地磁极性不变期不但经历的时间长,而且白垩纪正地磁极性期洋壳生长速率比出现磁条带的洋壳正常增长快 50% ~ 75%,具有突然爆发的特征^[9]。从太平洋洋壳生长情况来看,顶峰期为 120

~ 100 Ma BP,100 ~ 80 Ma BP 期间逐渐降低,并在 80 ~ 30 Ma BP 期间总体处于减弱的过程中,但在 65 Ma BP(即白垩纪和第三纪交界)附近出现了第二次高峰。同时,这个时期的古地磁强度却只有新生代的 1/3,而且在它之前的侏罗纪古地磁强度最低又只及它的 1/4^[10]。全球白垩纪磁静区与全球广泛分布的岩浆活动省(LIP)具有空间上的相关性,而这些区域反映了 125 Ma BP 时起源于核幔边界的超级地幔柱的作用^[11],现在的南太平洋的超级隆起可能就是原始超级地幔柱上升流的残余。在白垩纪之前,太平洋向南漂移,并发生 30° 的顺时针旋转,之后这种趋势慢慢减弱;从晚白垩纪开始向北漂移,这与伴随超级地幔柱的地幔动力改变海底扩张方式有关^[12]。因此,全球性深海磁静区记录到的白垩纪长约 41 Ma 的地磁极性不变期,进一步隐含了全局性的核幔边界温度结构的变动和外核对流模式的变化,即其本身就可能说明了地磁极性不变的机理。

另一类是紧邻陆缘的边缘磁静区,它常与陆缘初始张裂相伴生,可能与泛古陆裂解生成板块系统的过程有关。边缘磁静区涉及到陆壳张裂、海底扩张、岩浆和沉积作用等,成因较为复杂,有些与地磁极性不变间隔期有关,而有些则与其关系不明显。对于首先发现的北大西洋磁静区,其成因从一开始就有众多的解释。地磁极性不变间隔期被认为是磁静区起源的一个重要原因,同时可能受快速扩张和地壳沉降等过程综合影响。事实上,综合不同海区边缘磁静区的研究现状,其成因方式是多种多样的,可概括为表 1 说明的构造成因、化学成因和物理成因 3 个方面。

表 1 边缘磁静区成因总结

Table 1 Main origins of marginal quiet zones

类型	成因解释	成因例子	参考文献
构造成因	无磁性的原始地壳	美国东海岸边缘海	Drake 等 ^[14]
	位于磁赤道附近,受低倾角磁化	北大西洋西部陆缘	Vogt 等 ^[15]
化学成因	变质作用、侵蚀作用或热液活动使玄武岩磁性减弱	北美东部陆缘	Taylor 等 ^[16]
	洋壳成岩过程中结晶速度慢,热剩磁性减小	冰岛北部海区	Vogt 等 ^[17]
物理成因	磁源岩宽度小,深度大	非洲西北部摩洛哥边缘海	Luyerdyk 等 ^[18]
	斜交扩张导致磁源体破碎程度大,反向磁化增加	拉布拉多边缘海	Roots 等 ^[19]

2.2 磁静区与磁条带的关系

磁静区中的地壳结构、基底形态可能与由海底扩张生成的正常洋壳相似,但两者的磁异常特征具有明显差别^[20]。人们越来越认识到磁静区本身有可能与磁条带一样,代表了一种扩张机制和一段扩

张历史,在大陆边缘则代表了某种初始张裂方式和洋壳初期形成历史,那么从磁静区中恢复或提取所隐含的规模上或强度上弱的磁条带也就变得越来越重要。

Roots 等^[19]结合多道地震结果,提出北大西洋

拉布拉多海中北部磁静区起因于陆缘斜交扩张初始产生的小型错断磁源体。在25号磁条带时期,扩张脊位置和方向发生跳变,北部扩张脊方向转为 45° ,南部转为 90° ,导致北部的扩张方向和陆缘边界是斜交的,而扩张脊由一系列小偏移距的转换断层切割的小片段组成。在这种几何形态的约束下,每个小片段洋脊生成的磁性体被周围地磁极性相反的小片段磁性体所包围,这种磁性体单元越靠近陆缘越小,产生的磁异常在海平面上分辨不出磁条带,而表现出边缘磁静区特点。

Larson等^[21]根据DSDP32初步报告确认美国东海岸外面的磁静区是比144 Ma BP(侏罗纪)的M24号磁条带还要老的海底。Hayes等^[22]根据非洲西北马德拉(Madeira)和佛德角(Cape Verde)岛之间海域的详细地球物理调查结果识别出该区中生代的海底磁条带。Barrett等^[23,24]根据在西北大西洋中的一个调查区内的磁力和地震的详细测量结果,在调查区的磁静区中识别出M26、M27、M28号磁异常条带,扩张速率达 1.74 cm/a 。通过和陆地岩石的古地磁研究结果的对比确定这3个磁异常条带对应的年龄分别为154 Ma、159 Ma和164 Ma。这些结果大大深化了对西北大西洋的扩张历史和磁静区起源的认识。Roeser等^[25]通过磁力梯度测量等地球物理手段在北大西洋东南部摩洛哥近海侏罗纪磁静区中识别出微弱的磁条带,并和M25~M41号磁条带的对比确定该区的单侧扩张速率为 2.2 cm/a ,洋壳生成于170~155 Ma BP之间。

Candea等^[26]在西太平洋中发现幅值低于100 nT的侏罗纪磁静区,并认为这些磁异常具有条带状结构,可以和Phoenix、夏威夷和日本海附近的磁条带进行对比。基于此他们认为该磁静区所反映的海底扩张早于M25号磁条带,也即是在153 Ma之前。磁静区可能是由晚侏罗纪一系列磁极倒转期间磁场幅值较小引起的。

Handschemacher等^[27]在西太平洋侏罗纪磁静区中利用航磁数据识别出低幅值的磁条带,并确定这些磁条带在M29之前,编号为M30~M38。因此将地磁极倒转时间表向前扩展了近8 Ma,并据此推断了前白垩纪太平洋板块的构造演化史。白垩纪磁静区在北太平洋同样也有记录,对应于34号磁条带之前法拉隆板块分解出太平洋板块和库拉板块^[28]。

1998年美国Woods Hole海洋研究所Sager等^[29]利用1992年在西太平洋Pigafetta海盆进行的深拖地磁测量结果,在侏罗纪磁静区(JQZ)内识别

出跨度约11 Ma的M27~M41号微弱磁条带,对应的时间约为156~167.5 Ma。2006年Tivey等^[30]根据2002年在该海区新采集的深拖磁测结果,将该海区洋壳年龄扩展到170 Ma,发现磁极倒转速率在160~167 Ma BP期间随着洋壳年龄的增加,以 10 rev/Ma 的速率增加;磁场幅值则在155~162 Ma BP期间逐渐减小,形成显著的低幅值带(LAZ);认为JQZ可能是磁异常的低幅值和快速起伏变化联合造成的。2008年Tominaga等^[31]根据该区的前两次的深拖剖面 and 附近的磁测和钻孔结果,并假定所有磁异常均有地磁极倒转引起,构建了该区M30~M45(约157.8~169.7 Ma BP)的地磁倒转时间表。

在印度洋,斯里兰卡南部近海和印度半岛的孟加拉湾也存在白垩纪磁静区,相应于M0~A34号磁条带(118~84 Ma BP)期间发育,可能记录了印度板块从冈瓦纳大陆裂解过程中留下的痕迹^[32~36]。在南极和澳大利亚共轭大陆边缘存在白垩纪磁静区,有微幅正值出现,起初被标以A22号磁条带,后被修改成A34号磁条带,与地震剖面上显示的洋陆分界相对应,并由此推断大陆裂解的年龄为 $96 \pm 5\text{ Ma}$ ^[37]。

3 南海北部陆缘磁静区的研究现状分析

3.1 磁静区和磁条带的衔接

南海北部被动大陆边缘东段的地磁异常分布存在鲜明的特点,在陆架上沿东沙—台湾浅滩—北港隆起一线为高值正磁异常带,在洋壳部分则是正负差异显著的线性磁异常条带,它们之间陆坡和洋陆过渡带则为平缓变化的磁静区。

南海东北部磁力异常(图2)具有磁静区和磁异常条带的两种分布特征。可以看到磁静区内磁异常幅值在 $\pm 50\text{ nT}$ 之间,其南侧边界越过了洋盆边界。目前,就南海明显的磁条带和其它证据提供给我们关于南海扩张的时序认识上还存在3种可能性:整体同步扩张^[38]、西南扩张早^[39~41]和北部扩张早^[42~44]。台湾学者许树坤等^[45]在南海东北部陆缘侧识别出17~15号磁条带,靠近海沟侧识别出12~10号磁条带,将南海东部海盆的扩张年代推早到37 Ma BP。那么,南海北部磁静区内是否存在弱磁条带,是否记录了陆缘张裂到海底扩张期间的洋壳生长信息?如果答案是肯定的,磁静区和磁条带就可能没有明确的界限,这方面的继续研究显然有助于追溯南海张裂和扩张早期的历史。

3.2 磁静区的起源研究

由于南海北部大陆边缘磁静区本身的研究程度

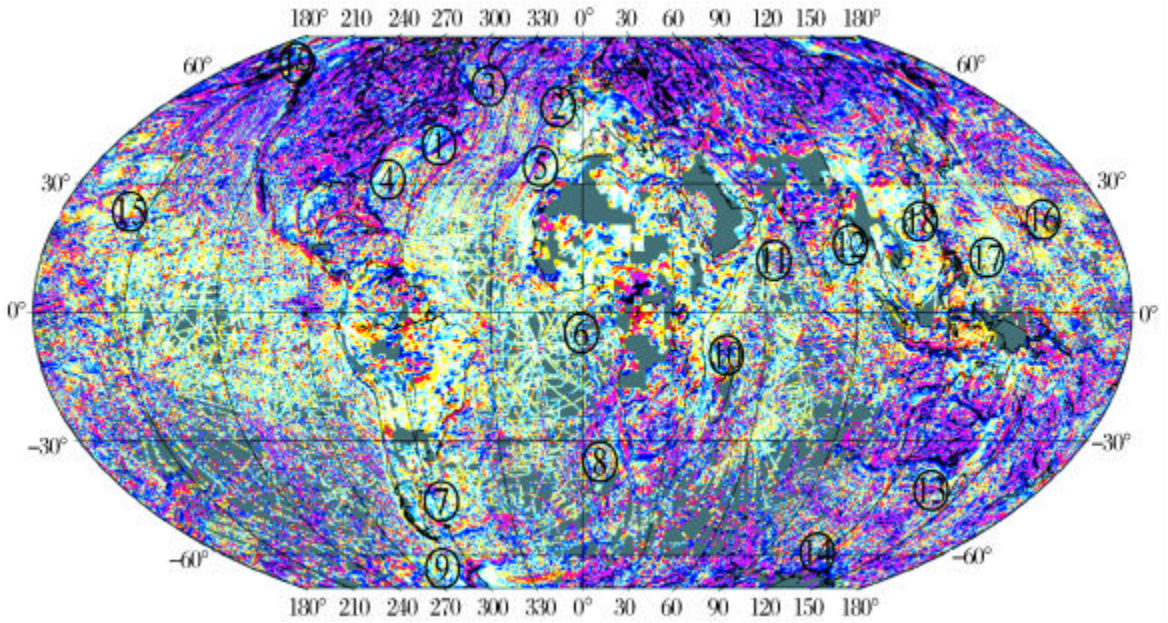


图 1 全球磁静区分布图^[13]

Fig. 1 Global distribution of magnetic quiet zone^[13]

北大西洋:①西部陆缘带,②东部陆缘带,③拉布拉多海边缘带;中北大西洋:④西部陆缘带,⑤东部陆缘带;南大西洋:⑥边缘带,⑦西部深海区,⑧东部深海区,⑨威德尔海边缘带;印度洋:⑩索马里海盆边缘带,⑪阿拉伯海边缘带,⑫孟加拉湾边缘带,⑬澳大利亚边缘带,⑭南极边缘带;北太平洋:⑮中央深海区,⑯西部深海区,⑰菲律宾深海区,⑱南中国海边缘带;北极洋:⑲加拿大海盆边缘带。全球磁异常背景图来自 NGDC

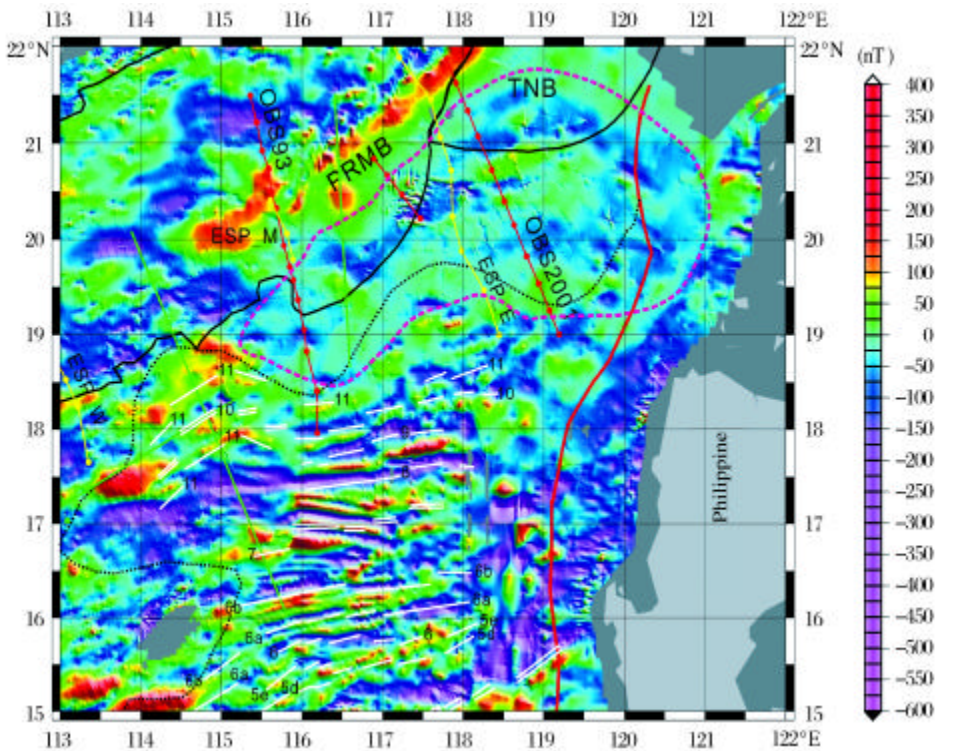


图 2 南海东北部磁静区和磁条带的分布

Fig. 2 Distribution of magnetic quiet zone and magnetic lineation in northeast South China Sea

PRMB:珠江口盆地;TNB:台西南盆地;白色短线:磁条带(Briais, 1993);黑色虚线:洋盆边界;红色实线:马尼拉海沟;红色虚线:磁静区分布范围

有限,关于其磁静区的成因尚无定论。Taylor 等^[46]通过均衡重力异常的计算认为其不同于大西洋边缘的磁静区,不是由于扩张前的一次地磁极性不变期所产生,而是由于洋陆过渡区深部物质密度变化形成的。

张毅祥等^[47]根据地震与磁力异常的联合反演,将磁静区地壳分为 2 个磁性层,下层即下地壳是均匀磁化物质,厚度为 6 ~ 8 km,磁性和厚度稳定,磁性强度中到强;上层厚度为 1 ~ 2 km,是中等磁性的反向磁化物质,认为与中生代较长时间的磁场倒转相关,厚度和磁化强度十分类似于大洋地壳中的层 2。夏戡原等^[48]提出该反向磁性层可能是早第三纪古洋壳,为中生代特提斯的残留洋壳。

从南海北部被动大陆边缘偏于火山型边缘角度出发,一种观点认为其磁静区极有可能代表陆块最终破裂和海底扩张开始前的大规模火成活动产物,反推过来,则认为南海北部边缘东段存在大量的火成活动^[49]。基于南海北部大陆边缘磁静区的折射地震探测成果^[50~53],有学者注意到磁静区与减薄的下地壳及其下的高速层(7.1 ~ 7.4 km/s)的分布跨度具有很好的对应性^[54,55],但这方面定量的、确切的关系少见专门论述。其中, Yukari Nakasa 等^[56]认为南海北部陆缘的磁异常源于表层沉积物和下地

壳的上部(称为 M 层),磁静区或许是由于非磁物质或弱磁及逆磁化的 M 层引起的。M 层退磁的一个原因可能是下面的高温地幔物质的热流蚀变作用,另一个解释是水平排列的玄武岩块体具有相反的磁化方向。赵俊峰^[57]认为磁静区是一个动态的概念,是正常磁性层经过热改造后形成的一种地质现象,在洋陆边界由于年青的火山和岩墙温度很高造成磁静区居里面抬升,磁性层减薄,从而形成磁异常低缓变化的磁静区。

3.3 磁静区及周围的综合地球物理研究

Tanaka 等^[58]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,我们注意到一个有趣现象,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,在北部陆缘东段由北往南变浅(26 ~ 20 km),与折射地震探测剖面反映的下地壳高速层深度接近,但其分辨率严重不足。图 3 展示了中国科学院南海海洋研究所与日本东京大学在南海北部联合实施的 OBS93 地震剖面(纵向比例放大 5 倍)的解释结果及相应的磁异常,显示磁静区对应着上地壳减薄和高速层尖灭的地带,南海东北部地壳在减薄过程中岩浆活动有可能并不发育^[59]。郝天珧等^[60]对南海东北部洋陆过渡带地区进行了地震约束的二维重磁

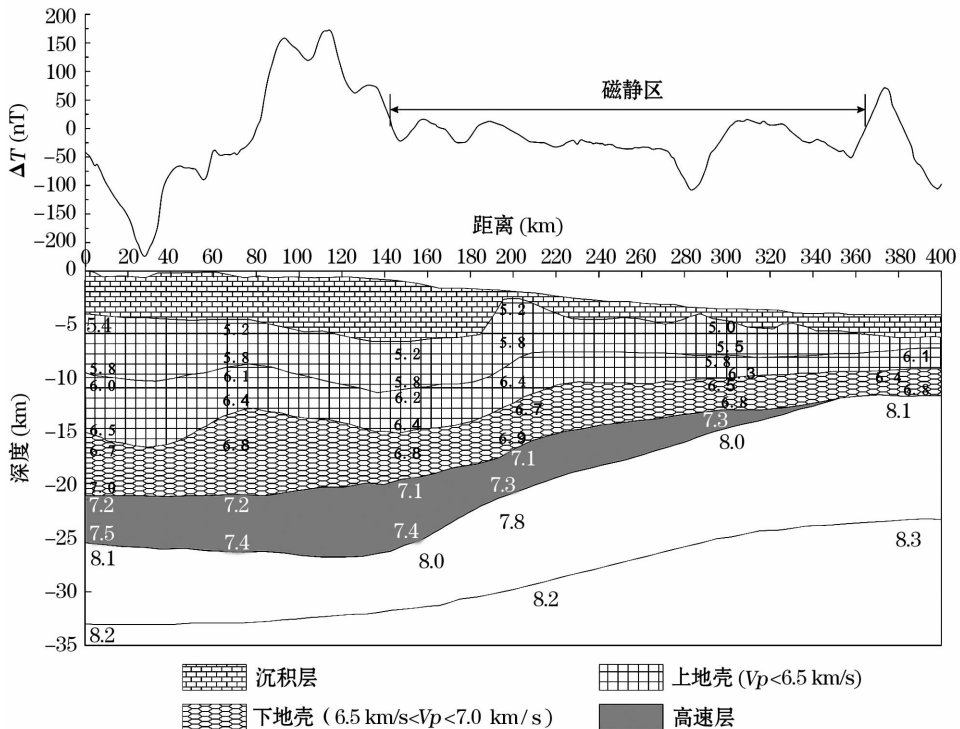


图 3 OBS93 地震剖面及相应的磁力剖面^[59]

Fig. 3 OBS93 velocity section and its magnetic profile^[59]

反演,支持地壳结构中存在下地壳高速层的观点,但认为构造属性倾向于火山岩型。

目前,已由多位学者使用海底热流数据推演南海北部岩石圈内部温度场^[49,61~63],并以此来探讨南海北部陆缘的动力机制。施小斌等^[61]通过对南海北部陆缘 3 条折射地震剖面岩石圈热结构的计算,得出海底热流由陆架往陆坡、海盆方向增高,其中地幔热流由陆架的 66%~69% 增加到海盆的 88%,海盆和坡脚处的地幔热流在海底热流中所占比例实际可能更高;陆架区“热”岩石圈厚度约为 90 km,向陆坡方向渐薄,在洋壳和海槽区为 60 km 左右;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。张健等^[63]得出南海北部陆缘岩石圈温度的“三明治”结构:上地壳和岩石圈地幔相对低、下地壳相对高,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;下地壳的有效粘滞系数为 $10^{21} \sim 10^{22}$ Pa·s,表现为塑性,以延性流动为主;岩石圈地幔又低一个数量级,为地质时间尺度下的地幔对流提供了物理条件。

显然,上述磁静区及周围的磁性、速度、密度和温度结构的综合地球物理推断解释,有助于促进磁静区磁源结构的恢复,但目前为止这项工作与磁静区磁源结构挂钩还有待深入开展。

3.4 磁静区及周围的地幔热活动作用研究

深部构造活动既可能对磁静区的起源,也可能对磁静区的改造发挥作用,其中地幔热活动作用则是关键性的。

源于地幔的火山岩浆活动有可能出现在南海北部陆缘盆地拉张沉降的各个阶段。从珠江口盆地以及台西南盆地的拉张沉降可以追寻南海新生代活动的历史,甚至将南海的拉张历史可以追溯到白垩纪^[52,64,65]。Wang 等^[66]根据潮汕拗陷晚中生代与第三纪之间的巨大不整合及厚达 4 000 m 左右的地层缺失量认为,地幔的隆起在南海扩张之前的白垩纪晚期,推断南海成因属于地幔柱性质,在南海东北部陆缘坡脚洋陆分界线附近的地震剖面上,发现在上、中地壳中存在火山和火成岩^[67]。龚再升等^[68]认为地幔柱引起的局部对流,加之与岩石圈底部的摩擦力导致大面积的伸展,可以解释南海不同方向、不同构造部位的盆地得以在早第三纪同期伸展。

根据板块重建结果^[69],非地幔柱观点认为南海打开时邻近没有热点,目前的南海海域也未见热点轨迹,很可能是一种非地幔柱过程,高速下地壳是陆

缘破裂时底侵作用形成的,与磁静区一起,作为准火山型大陆边缘的证据^[50,70]。

也有认为折射地震探测显示南海北缘缺少或只有较薄的下地壳高速层,是白垩纪以来非火山型大陆边缘的证据,对盆地资源评价十分有利^[71],吴世敏等^[72]和阎贫等^[73]分析对比华南沿海岩浆和火山活动与南海海底扩张历史后,指出南海扩张期间岩浆活动处于相对平静期,珠江口盆地东部的下地壳高速层不是裂谷拉张期间底侵的结果。

珠江口盆地以及台西南盆地的拉张沉降并不因南海海盆扩张而停止,可能延续到海盆扩张开始后的 5 Ma 左右^[74,75],甚至海盆扩张停止以后的岩浆活动事件干扰了岩石圈正常冷却过程,新的热冷却沉降使得坡脚附近出现快速沉降事件^[76]。Shi 等^[70]通过重力和热沉降等手段模拟结果认为珠二拗陷的快速沉降事件是 17 Ma BP 的玄武岩侵入引起的。

这样,南海北部陆缘磁静区自然涉及到地幔热活动与陆缘盆地拉张沉降之间的相互关系和共同作用。然而,目前对其拉张沉降研究主要集中于运动学模拟,主要关心简单剪切和纯剪切 2 个端元模型在不同地壳层次和演化阶段下的联合作用机制^[77~79]。虽然这些研究或多或少涉及岩石圈热一流变结构对陆缘拉张沉降的影响,但主要以现今状态下的热一流变学结构予以讨论。值得指出,Clift 等^[74,80]已经关注裂前岩石圈热一流变结构对南海共轭边缘拉张沉降的影响。Behn 等^[81]利用二维有限元连续力学拉张模型考察了岩石圈热一流变结构对正断层发育的影响,表明地壳厚度、地温梯度及流变学等是主控因素。

4 南海北部陆缘磁静区的研究意义及方法

南海是西太平洋最大的边缘海之一,其北部陆缘保留了大陆边缘的张裂、海底扩张的构造活动历史。该区又蕴藏着丰富的油气资源,地壳拉张减薄过程,岩浆火山活动等对油气的生、储有重要影响。南海北部陆缘磁静区包含了大陆边缘陆壳的张裂、减薄,洋壳生成及海底扩张等被动大陆边缘构造演化信息,对其进一步研究有助于加深认识大陆边缘及资源环境的重大基础理论问题。随着我国对南海大陆边缘资源权益的重视,各种国家项目计划在南海北部获得的重、磁测网数据精度和密度,以及多道地震和 OBS 深地震剖面都较以前研究依据的数据

质量有质的提高,为我们深化磁静区的研究提供了有利条件。图4是我们设计的南海北部陆缘磁静区地球物理综合推断解释的方案,通过深入认识磁异常形态、基底断裂、基岩及岩浆、地壳结构、物性特征

和洋、陆地壳性质的过渡规律,推断形成磁静区的构造磁源和成因机制,反映大陆边缘从拉张、破裂到初始海底扩张过程的构造演化特征。

首先,磁异常形态的追踪分析,使得磁静区与磁

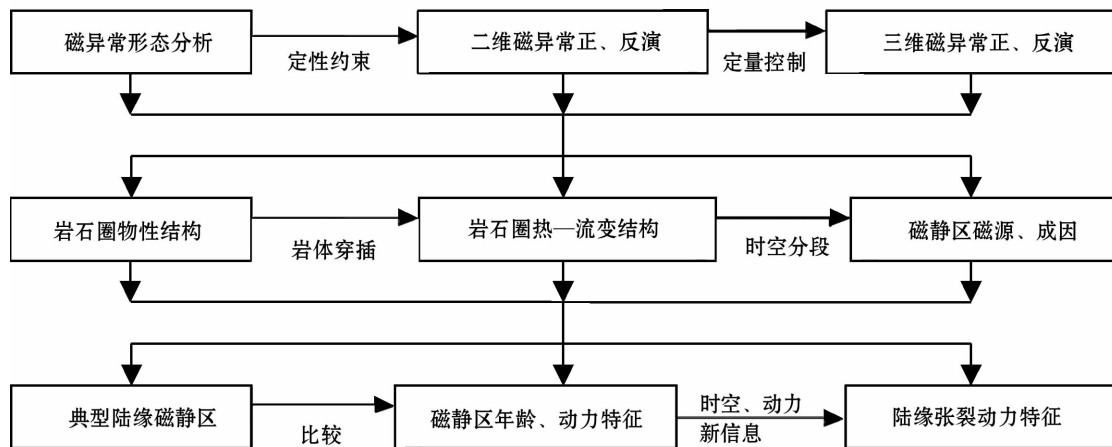


图4 南海北部陆缘磁静区的研究方案

Fig. 4 The scheme of research on magnetic quiet zone in northern south China sea

条带的模糊地带会曝露出一些精细信息,通过磁静区与磁条带之间的严格、定量区划、识别,在充分认识南海北部洋陆分界的同时,可以使南海扩张的时代和时序认识得到深化和统一;可以进一步佐证各种类型的断裂和地块,分析南海北部大陆边缘的构造环境特点,特别是南海东北部 NNE 向的陆缘延伸方向和可能存在的近 E-W 向的磁条带走向,可以探讨陆缘斜交扩张的可能性,以及相应磁源体破碎表现出来的磁静区。

其次,结合已有的深地震剖面进行系统的二维磁异常正、反演,可以更好地判断壳下高速层所代表的构造动力意义和与陆缘磁静区的确切关系,或是否存在中生代残留洋壳并保留了白垩纪正地磁极性期。目前为止,南海北部陆缘的所有深地震探测剖面的速度反演,基本上依据密度与速度关系,多进行重力异常的正演约束,而少对地层结构的磁化率或磁化强度进行可靠细致的地磁异常正、反演约束解释,或磁异常的拟合效果不理想。事实上,在岩性的鉴别上,磁性可以比速度、密度起到更大的作用。

再者,结合岩石圈热流、重力异常和地震的定量反演和综合解释,揭示南海北部陆缘的岩石圈物性结构特征,特别是与磁静区成因相关联的下地壳和岩石圈地幔的温度、强度和流变状态。如果高分辨率的居里面深度及反映的温度梯度与已有的海底热

流数据结合起来,可望提供更可靠的南海北部陆缘岩石圈热—流变结构,既有助于研究磁静区构造的成因类型和动力特征,又为南海北部陆缘拉张沉降的动力学模拟提供支持。从地幔热动力演化的角度看,南海北部陆缘磁静区和下地壳的低粘滞性及其下面的高速层性质之间关系方面具有很大的探索空间,是否发生了较大范围的火山岩浆活动,并记录了该段时间的弱地磁场活动,或者喷发、侵入时间很快而又发生在同一极性的地磁场阶段内?通过与研究较透彻的大西洋、印度洋、南大洋和其他海域的被动大陆边缘磁静区进行类比研究,进一步了解磁静区地壳的结构、年龄及磁性特征,有助于深化认识南海拉张、裂离和扩张的地球动力学机制。同时,研究张裂过程中岩浆热作用可能造成的磁静区化学成因,有助于追溯岩石圈热—流变状态的突变和渐变,回答裂前、拉张阶段和裂后的地幔热活动给陆缘拉张沉降带来的不同影响。

参考文献(References):

- [1] Raff A D, Mason R G. A magnetic survey off the west coast of North America, 40° N to 52.5° N [J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1961, 72: 1 259-1 265.
- [2] Vine F J, Matthews D H. Magnetic anomalies over oceanic ridges [J]. *Nature*, 1963, 199: 947-949.
- [3] King E R, Zietz I, Dempsey W J. The significance of a group of aeromagnetic profiles off the eastern coast of north America [J].

Geological Survey Professional Paper, 1961,424:299.

- [4] Heirtzler J R, Hayes D E. Magnetic boundaries in the north Atlantic Ocean[J]. *Science*,1967,157:185.
- [5] Poehls K A, Luyendyk B P, Heirtzler J R. Magnetic smooth zones in the world's oceans[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78:6 985-6 997.
- [6] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Sea Basin[C]//Hayes D E,ed. *The Tectonic and Geological Evolution of Southeast Asian Seas and Islands*, AGU, Geophysical Monograph,1980, 23:89-104.
- [7] McElhinny M, Burek P. Mesozoic paleomagnetic stratigraphy[J]. *Nature*,1971,232:98-102.
- [8] Larson R L, Pitman III W C. World wide correlations of Mesozoic magnetic anomalies and its implications[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1972, 83:3 645-3 662.
- [9] Larson R L. Latest pulse of the Earth: Evidence for a mid-Cretaceous super plume[J]. *Geology*, 1991, 19:547-550.
- [10] McElhinny M W, Larson R L. Jurassic dipole low defined from land and sea data[J]. *EOS*, 2003, 84(37):362-366.
- [11] Larson R L. Geological consequences of super plumes[J]. *Geology*,1991, 19:963-966.
- [12] Larson R L, Steiner M B, Erba E, et al. Paleolatitudes and tectonic reconstructions of the oldest portion of the Pacific plate: A comparative study[J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*,1992,129:615-631.
- [13] Maus S, Sazonova T, Hemant K, et al. National geophysical data center candidate for the world digital magnetic anomaly map [J]. *Geochemistry & Geophysics & Geosystems (G³)*, 2007, 8, Q06017, doi:10.1029/2007GC001643.
- [14] Drake C L, Ewing J I, Stockard H P, The continental margin of the eastern United States[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*,1968, 5:993.
- [15] Vogt P R, Lorentzen G R, Dennis L S. An aeromagnetic survey of the Kethley Inagnetic anomaly sequence between 34°N and 40°N in the western North Atlantic (abstract) [J]. *Translat American Geophysical Union*,1970,51:274.
- [16] Taylor P T, Zietz I, Dennis L S. Geologic implications of aeromagnetic data for the eastern continental margin of the United States[J]. *Geophysics*,1968,33:755.
- [17] Vogt P R, Ostenso N A, Johnson G L. Bathymetric and magnetic data bearing on seafloor spreading north of Iceland[J]. *Journal of Geophysical Research*,1970, 75:903.
- [18] Luyendyk B P, Bunce E T. Geophysical study of the northwest African margin of Morocco [J]. *Deep-Sea Research*, 1973, 20: 537-550 .
- [19] Roots W D, Srivastava S. Origin of the marine magnetic quiet zones in the Labrador and Greenland Seas[J]. *Marine Geophysical Researches*,1984, 6: 395-408.
- [20] Taylor P T, Greenwalb D. Geophysical transitions across the northwest Atlantic magnetic quiet-zone border [J]. *Earth and Planetary Science Letters*,1976,29(2):435-446.
- [21] Larson R L, Moberly R, Bukey D, et al. Initial Reprtorts of DS-DP, 32[R]. Washington US: Government Printing Office,1974.
- [22] Hayes D E, Rabinowitz P D. Mesozoic magnetic lineations and the magnetic quiet zone off northwest Africa[J]. *Earth and Planetary Science Letters*,1975,28(2):105-115.
- [23] Barrett D L, Keen C E. Lineations in the magnetic quiet zone of the north-west Atlantic[J]. *Nature*,1975 (253):423-425.
- [24] Barrett D L, Keen C E. Mesozoic magnetic lineations, the Magnetic Quiet Zone, and sea floor spreading in the northwest Atlantic[J]. *Journal of Geophysical Research*,1976,81(26):4 875-4 884.
- [25] Roeser H A, Steiner C, Schreckenberger B, et al. Structural development of the Jurassic magnetic quiet zone off morocco and identification of Middle Jurassic magnetic lineations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B10):2 207.
- [26] Candea S C, Larson R L, LaBrecque J L. Magnetic lineations in the Pacific Jurassic quiet zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*,1978,41(4):434-440.
- [27] Handschumacher D W, Sager W W, Hilde T W C, et al. Pre-Cretaceous tectonic evolution of the Pacific plate and extension of the geomagnetic polarity reversal time scale with implications for the origin of the Jurassic "Quiet Zone" [J]. *Tectonophysics*, 1988,155(1/4):365-380.
- [28] Mammerickx J, Sharman G F. Tectonic evolution of the north Pacific during the Creaceous quiet period[J]. *Journal of Geophysical Research*,1988, 93(B4): 3 009-3 024.
- [29] Sager W W, Weiss C J, Tivey M A, et al. Geomagnetic polarity reversal model of deep-tow profiles from the Pacific Jurassic Quiet Zone[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B3): 5 269-5 286.
- [30] Tivey M A, Sager W W, Lee S M, et al. Origin of the Pacific Jurassic quiet zone[J]. *Geology*,2006, 34(9): 789-792.
- [31] Tominaga M, Sager W W, Tivey M A, et al. Deep-tow magnetic anomaly study of the Pacific Jurassic Quiet Zone and implications for the geomagnetic polarity reversal timescale and geomagnetic field behavior[J]. *Journal of Geophysical Research*,2008, 113(B07110): 1-20.
- [32] Ramana M V, Subrahmanyam V, Sram K V L N S, et al. Record of the Cretaceous magnetic quiet zone A precursor to the understanding of Evolutionary history of the Bay of Bengal[J]. *Current Science*,1997, 72(9): 669-673.
- [33] Subrahmanyam A S, Murthy K S R, Lakshminarayana S, et al. Magnetic expression of some major lineaments and Cretaceous quiet zone in the Bay of Bengal[J]. *Geo-Marine Letters*,1997, 17: 202-206.
- [34] Sarma K V L N S, Ramana M V, Ramprasad T, et al. Magnetic basement in the central bay of Bengal[J]. *Marine Geophysical Researches*,2002, 23: 97-108.
- [35] Desa M, Ramana M V. Seafloor spreading magnetic anomalies south off Sri Lanka[J]. *Marine Geology*,2006, 229: 227-240.
- [36] Rajendran S. The cretaceous magnetic quiet zone of northern Indian Ocean [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2003,22:616.

- [37] Veevers J J. Breakup of Australia and Antarctica estimated as mid-Cretaceous (95 ± 5 Ma) from magnetic and seismic data at the continental margin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 77(1): 91-99.
- [38] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the south China basin [J]. *Geophysical Monograph Series*, 1983, 27: 23-56.
- [39] Lü Wenzheng, Ke Changzhi, Wu Shengdi. The characters of the magnetic anomaly and the revolution history in the South China Sea's central basin [J]. *The Chinese Oceanography*, 1987, 9(10): 69-78. [吕文正, 柯长志, 吴声迪, 等. 南海中央海盆条带磁异常特征及构造演化[J]. *海洋学报*, 1987, 9(10): 69-78.]
- [40] Chen Shengyuan. The magnetic anomaly map of South China Sea [C]//He Liansheng, Chen Bangyan, eds. Atlas of Geology and Geophysics of South China Sea. Guangzhou: Guangdong Province Map Press, 1987. [陈圣源. 南海磁力异常图[C]//何廉声, 陈邦彦主编. 南海地质地球物理图集. 广州: 广东省地图出版社, 1987.]
- [41] Yao Bochu, Zeng Weijun, Hayes D E, et al. The Geological Memoir of South China Sea Surveyed Jointly by China and USA [C]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994. [姚伯初, 曾维军, Hayes D E, 等. 中美合作调研南海地质专报[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.]
- [42] Wang Shugong, Gao Yang. Calculation on theoretical profiles of magnetic anomalies and preliminary analyses on magnetic lineation in South China Sea basin [J]. *Marine Sciences*, 1990, 11(6): 9-15. [王述功, 高仰. 南海海盆磁异常理论剖面的计算和磁条带的初步分析[J]. *海洋科学*, 1990, 11(6): 9-15.]
- [43] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 6 299-6 328.
- [44] Liu Jinping, Yan Pin, Zhao Minghui. Seismic reflective characteristics and the age of the southwest sub-basin in the South China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2003, 23(1): 67-72. [刘金萍, 阎贫, 赵明辉. 南海西南海盆地震反射特征及其形成时代[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(1): 67-72.]
- [45] Hsu Shu-Kun, Yeh Yi-ching, Doo Wen-Bin, et al. New bathymetry and magnetic lineations identifications in the northernmost South China Sea and their tectonic implications [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2004, 25: 29-44.
- [46] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin [C]//Hayes D E, eds. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Geophysical Monograph, AUG, Washington DC, 1983, 27: 23-56.
- [47] Zhang Yixiang. Flat and low abnormality area of magnetics in northern South China Sea and its implications of geology [C]//The Fifth Symposium of Oceanology of the Seas Around Taiwan Island, 2002: 146-147. [张毅祥. 南海北部磁静区及其地质意义[C]//海峡两岸第五届台湾邻近海域海洋科学研讨会论文集(台北), 2002: 146-147.]
- [48] Xia Kanyuan, Huang Ciliu, Huang Zhiming. Deep structure characteristics of the southwest Taiwan crust in northeast South China Sea [C]//Chen Yuntai, Teng Jiwen, Kan Rongju, et al, eds. Advances in Seismology and Physics of Earth's Interior in China—In Honor of Academician Zeng Rongsheng' 80th Birthday. Beijing: Seismology Press, 2004: 135-145. [夏戡原, 黄慈流, 黄志明. 南海东北部台湾西南海区深部地壳结构特征[C]//陈运泰, 滕吉文, 阚荣举, 等主编. 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, 2004: 135-145.]
- [49] Song Haibin, Zhang Jian. Northern continental margin rifting and dynamic mechanism in the South China Sea [C]//Li Jiabiao, eds. Evolution of China's Marginal Seas and Its Effect of Natural Resources. Beijing: Ocean Press, 2005: 220-228. [宋海斌, 张健. 南海北部大陆边缘张裂及其动力学机制[C]//李家彪主编. 中国边缘海形成演化与资源环境效应. 北京: 海洋出版社, 2005: 220-228.]
- [50] Nissen S S, Hayes D E, Buhl P, et al. Deep penetration seismic soundings across the northern margin of the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 22 407-22 433.
- [51] Nissen S S, Hayes D E, Yao B, et al. Gravity, heat flow, and seismic constraints on the processes of crustal extension: Northern margin of the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 22 447-22 483.
- [52] Yan Pin, Liu Zhaoshu, Jiang Shaoren. Deep seismic detection of crustal geologic structure in the north of the South China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1997, 17(2): 22-27. [阎贫, 刘昭蜀, 姜绍仁. 南海北部地壳的折射地震地质结构探测[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1997, 17(2): 22-27.]
- [53] Zhao Minghui, Qiu Xuelin, Ye Chunming, 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. [赵明辉, 丘学林, 叶春明, 等. 南海东北部海陆折射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.]
- [54] Xia Kanyuan, Huang Ciliu. Ocean drilling program and the South China Sea [J]. *Advances in Earth Science*, 1995, 10(3): 146-250. [夏戡原, 黄慈流. 深海钻探与南海[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(3): 146-250.]
- [55] Hajimu Kinoshita, Yukari Nakasa, Liu Zhaoshu, et al. Geophysical survey in the South China Sea for back-arc basin [C]//Xu Dongyu, eds. Marine Geology and Paleo-oceanography (30th International Geological Congress Papers, No. 13). Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-23. [Hajimu Kinoshita, Yukari Nakasa, 刘昭蜀, 等. 以弧后盆地形成为重点的南海地球物理调查[C]//许东禹主编. 海洋地质学古海洋学(第30届国际地质大会论文集, 第13卷). 北京: 地质出版社, 1999: 1-23.]
- [56] Yukari Kido, Kiyoshi Suyehiro, Hajimu Kinoshita. Rifting to spreading process along the northern continental margin of the South China Sea [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2001, 22: 1-

- 15.
- [57] Zhao Junfeng. The reflection of magnetic quiet zone from the three magnetic components in the northern South China Sea[J]. *Chinese Geophysical Society*, 2003, 4: 300. [赵俊峰. 南海北部陆缘磁静区在三分量磁测资料中的反映[J]. 中国地球物理学会会刊, 2003, 4: 300.]
- [58] Tanaka A, Okubo Y, Matsubayashi O. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in east and southeast Asia[J]. *Tectonophysics*, 1999, 306: 461-470.
- [59] Yan Pin, Zhou Di, Liu Zhaoshu. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2001, 338: 1-21.
- [60] Hao Tianyao, Huang Song, Xu Ya, et al. Comprehensive geophysical research on the deep structure of northeastern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(6): 1785-1796. [郝天尧, 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.]
- [61] Shi Xiaobin, Zhou Di, Zhang Yixiang. Thermo-rheological structure of lithosphere in the northern margin on the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(15): 1160-1165. [施小斌, 周蒂, 张毅祥. 南海北部陆缘岩石圈热流变结构[J]. 科学通报, 2000, 45(15): 1160-1165.]
- [62] Zhang Jian, Xiong Liangping, Wang Jiyang. Characteristics and mechanism of geodynamic evolution of the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(5): 603-610. [张健, 熊亮萍, 汪集咏. 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): 603-610.]
- [63] Zhang Jian, Wang Jiyang. Deep geodynamic characteristics of tectonic spreading in continental margin of the northern South China Sea[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 30(6): 561-567. [张健, 汪集咏. 南海北部陆缘带构造扩张的深部地动力学特征[J]. 中国科学: D辑, 2000, 30(6): 561-567.]
- [64] Su D, White N, McKenzie D. Extension and subsidence of the Pearl river mouth basin, northern South China Sea[J]. *Basin Research*, 1989, 2: 205-222.
- [65] Wu Nengyou, Zeng Weijun, Song Haibin, et al. Tectonic subsidence of the South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2003, 23(1): 55-65. [吴能友, 曾维军, 宋海斌, 等. 南海区域构造沉降特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1): 55-65.]
- [66] Wang Chiyun. Some problems in understanding basin evolution [J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(3/4): 29-44.
- [67] Wang T, Chen M, Lee C, et al. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2006, 412: 237-254.
- [68] Gong Zaisheng, Li Sitian, Xie Taijun, et al. Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1997. [龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997.]
- [69] Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic plate reconstruction of the South China Sea region[J]. *Tectonophysics*, 1994, 235: 149-180.
- [70] Shi X, Burov E, Leroy S, et al. Intrusion and its implication for subsidence: A case from the Baiyun Sag, on the northern margin of the South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2005, 407: 117-134.
- [71] Jin Qinghuan. The Geology and the Petroleum Resources in the South China Sea[M]. Beijing: Geological Press, 1989. [金庆焕主编. 南海地质与油气资源[M]. 北京: 地质出版社, 1989.]
- [72] Wu Shimin, Zhou Di, Qiu Xuelin. Tectonic setting of the northern margin of South China Sea[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(4): 419-426. [吴世敏, 周蒂, 丘学林. 南海北部陆缘的构造属性问题[J]. 高校地质学报, 2001, 7(4): 419-426.]
- [73] Yan Pin, Liu Hailing. Analysis on deep crust sounding results in northern margin of South China Sea[J]. *Journal of Tropic Oceanography*, 2002, 21(2): 1-12. [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.]
- [74] Clift Peters, Lin Jian. Preferential mantle lithospheric extension under the south China margin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18: 929-945.
- [75] Clift Peter, Lin Jian, Barckhausen Udo. Evidence of low flexural rigidity and low viscosity lower continental crust during continental break-up in the South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19: 951-970.
- [76] Xie X, Muller R D, Li S, et al. Origin of anomalous subsidence along the northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23: 745-765.
- [77] Zhou D, Ru K, Chen H Z. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region [J]. *Tectonophysics*, 1995, 251: 161-177.
- [78] Yao B C, Hayes D E. Lithospheric deformation under the effect of extensional stress field [J]. *Journal of the Geological Society of China*, 1998, 41(4): 517-534.
- [79] Wu Shimin, Yang Tian, Zhou Di, et al. Discussion on the extension model for the conjugate margin of South China Sea [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(1): 105-110. [吴世敏, 杨恬, 周蒂, 等. 南海南、北共轭边缘伸展模型探讨[J]. 高校地质学报, 2005, 11(1): 105-110.]
- [80] Hayes D E, Nissen S S. The south China sea margins: Implications for rifting contrast [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237: 601-616.
- [81] Behn M D, Lin J, Zuber M T. A continuum mechanics model for normal faulting using a strain-rate softening rheology: Implications for thermal and rheological controls on continental and oceanic rifting [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 202: 725-740.

Review of Researches on the Magnetic Quiet Zone at the Northern Continental Margin of the South China Sea and Its Comparison with Those in the Global Oceans

GAO Jinyao¹, WU Zhaocai¹, WANG Jian², YANG Chunguo¹, ZHANG Tao¹

(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)

Abstract: Different from the magnetic lineations in oceans, magnetic quiet zone (MQZ), where magnetic anomalies are greatly subdued in amplitude with long wavelengths, also probably contains information of tectonic activities and evolutions from continental margin rifting to sea floor spreading. In order to deepen understanding in the MQZ at the northern continental margin of the South China Sea, this paper summarized three possible occurrences of the global MQZs originated from physical, chemical and structural processes, respectively, located at marginal zones and abyssal zones of the global oceans, mainly Jurassic MQZs both in the Atlantic and the western Pacific, Cretaceous MQZs in the northern Pacific, the Indian and in the Southern. Meanwhile, it is worth attaching importance to mantle plume activities in different scales, small magnetic sources induced by initially fragmented ridge oblique to the continental margin and faint magnetic lineations in those MQZs. And then, main advances of study of the MQZ at the northern continental margin of the South China Sea have been analyzed, and mechanisms of the MQZ formation have also been discussed from views of both regional integrated geophysics and mantle thermal activities. Finally, research emphases and their significances are clarified to catch attention for the MQZ.

Key words: Magnetic quiet zone; Northern continental margin of the South China Sea; Global oceans; Original mechanisms.

2009年第7期要目

利用主被动微波数据联合反演土壤水分…………… 赵天杰,张立新,蒋玲梅,陈 权,张志玉,张勇攀
 基于自回归神经网络的时间序列叶面积指数估算 …………… 柴琳娜,屈永华,张立新,梁顺林,王锦地
 行播作物地面方向性测量的视场不确定性分析…………… 陈 玲,阎广建,李 静,余莹洁
 基于时序 MODIS NDVI 的黑河流域土地覆盖分类研究 …………… 顾 娟,李 新,黄春林
 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析 …………… 王维真,徐自为,刘绍民,李 新,马明国,王介民