

DOI: 10.13745/j.esf.yx.2016-11-49

# 中国东部及近海磁异常特征及大地构造意义

吴招才, 高金耀\*, 沈中延, 杨春国, 张涛

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

WU Zhaocai, GAO Jinyao\*, SHEN Zhongyan, YANG Chunguo, ZHANG Tao

Key Laboratory of Submarine Geosciences(State Oceanic Administration), Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

WU Zhaocai, GAO Jinyao, SHEN Zhongyan, et al. Magnetic anomaly in eastern China and adjacent sea, and its tectonic significance. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(1): 210-217

**Abstract:** On the basis of the latest shipboard magnetic data merging with the world digital magnetic anomaly, we have calculated the reduction to the pole (RTP) anomaly, pseudo-gravity anomaly, analytic signal and tilt angle, and used the wavelet decomposition and frequency spectrum analysis for the RTP anomaly. The results revealed the magnetic signature of the main tectonics in eastern China and adjacent sea. The distributions of paleo-continental nucleus in the North China block were indicated as well as the boundaries of Yangzi block. It was pointed out that the volcanic belt in the coastal area of Zhejiang and Fujian provinces connects to the Dongsha Uplift, and both of them are Mesozoic subduction volcanic arc. The NW-oriented fault may be the boundary fault in which Paleo-Tethys tectonic domain converted to the Pacific tectonic domain, and controlled the subduction process during the Late Mesozoic and the conversion from the active continental margin to the passive continental margin since the Mesozoic at the Northern South China Sea continental margin.

**Key words:** eastern China and adjacent sea; magnetic anomaly; data merging; tectonic significance

**摘要:**根据全球磁异常数据和我国近海高精度、高分辨率的海洋船磁资料,通过频率域的迭代下延方法,将两种不同分辨率的数据进行融合,得到了覆盖我国东部及近海的大面积地磁异常数据。对磁异常进行大范围变倾角化极,并进行了小波分解和频谱分析,计算、分析磁源重力异常、磁异常解析信号及倾斜角等转换场。结果显示中国东部及近海主要地质构造单元的磁异常特征,揭示了华北地块古陆块分布和扬子地块的南北边界走向,并指出浙闽火山岩带向西南可能和东沙隆起相连,都是中生代古俯冲的火山弧,南海北部 NW 向断裂可能是古特提斯构造域向太平洋构造域转换边界断裂,对中生代古俯冲及由主动陆缘向被动陆缘转化过程都有控制作用。

**关键词:**中国东部及近海;磁异常;数据融合;构造特征

**中图分类号:**P318.43;P54 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2018)01-0210-08

中国东部及邻近海域经历了华北、扬子、华夏等地块从晚古生代后期开始到中生代结束的拼合过程,不同块体的结合部位有强烈的碰撞、挤压及剪切作用,形成造山带和各种形式的断裂带,又往往与岩浆活动、变质作用相联系。同时,中国东部海域是西太平洋边缘海构造体系的一个重要组成部分,其形成演化过程与欧亚大陆、太平洋板块、菲律宾板块之间的相互作用有着密切关系,中、新生代滨太平洋陆缘活动强烈,特别是晚中生代古太平洋板块的俯冲,造成中国东部区域大规模的岩浆活动。一般而言,岩浆岩比变质岩、沉积岩的磁性强,因此磁异常对揭示区域磁性基底特征、与岩浆活动有关的断裂展布,

**收稿日期:**2016-05-03; **修回日期:**2016-06-08

**基金项目:**国家海洋局“全球变化与海气相互作用”专项(GASI-02-SCS-DWZP1, GASI-GEOGE-01-05);科学技术部科技基础性工作专项(2013FY112900);国家重点研发计划项目(2016YF0600402)

**作者简介:**吴招才(1980—),男,副研究员,从事海洋地球物理和海底构造研究。E-mail:wuzc@sio.org.cn

\* **通讯作者简介:**高金耀,男,研究员,博士生导师。E-mail:jygao@mail.hz.zj.cn

以及造山带、俯冲带的分布情况十分有效。刘光鼎<sup>[1-2]</sup>最早结合地球动力学特征和地质构造分析了中国海地球物理场特征,进而讨论中国大地构造格架及演化历史,提出对中国海的油气资源看法。郝天珧等<sup>[3]</sup>对中国东部及邻近海域的地球物理场及大地构造意义进行了分析;戴勤奋<sup>[4]</sup>对中国海区及邻域地磁场进行分析,并划分了六大基底岩相区;滕吉文等<sup>[5]</sup>利用中国东南大陆与陆缘地带的地面磁场观测资料研究了板内构造带的地磁异常场响应;李春峰等<sup>[6]</sup>通过对中国东部及邻近海域磁异常数据的化极和上延处理,分析不同构造块体和区域深大断裂的磁异常特征和空间展布,并反演计算出区域居里等温面的深度分布。本文首先对最新公布的全球磁异常数据和近海实测的高精度、高分辨率船载磁异常数据进行融合,得到覆盖中国东部和近海的完整磁异常数据,在此基础上对其进行化极,并对化极异常进行了小波分解与功率谱分析,计算出解析信号和磁源重力,以便更好地反映中国东部及近海陆海一体的地壳结构及大地构造特征。

### 1 磁异常数据的融合与化极

本文使用的磁异常数据近海部分是国家海洋局

第二海洋研究所多年来在我国近海积累的船载磁力调查数据,这部分数据经过统一调差、编辑后的交点均方差小于 4 nT,数据网格为 1 弧分;外围磁异常采用 2007 年 7 月公布的第一版世界数字化磁异常图(WDMAM)<sup>[7]</sup>,海拔 5 km,分辨率 3 弧分(约 5 km)。在这两种不同高度和分辨率的数据融合过程中,我们采用迭代向下延拓方法<sup>[8]</sup>,将研究区内的 WDMAM 数据集向下延拓到海平面,再网格化到与船载磁力数据相同的间距,然后将两种数据的重叠部分按权重进行融合,在拼接边缘按照线性权重,内部则完全采用实测船载数据,这样既保证了拼接边缘的光滑,也最大程度地保留了实测数据的完整性。最后所得的研究区磁异常数据如图 1 所示,主要构造参考了李三忠等<sup>[9]</sup>的划分体系。

化极后的磁异常与磁性体之间的对应关系更加明显,尤其是南部低纬度地区,而研究区纬度跨度较大,单一倾角化极难以真实反映整个区域的磁异常变化,为此采用区域变倾角化极方法。将研究区由北到南分为 10 个带,每带 3°,中央经线为 117°E,表 1 是 10 个分带的地磁倾角和偏角分布情况。同时,由于南部属于低磁纬度,因此我们采用迭代的平衡能量法来进行低纬度化极,这样在保证恢复异常形态的同时,也保证异常的幅值更真实<sup>[10]</sup>。图 2 是化极后的磁异常。

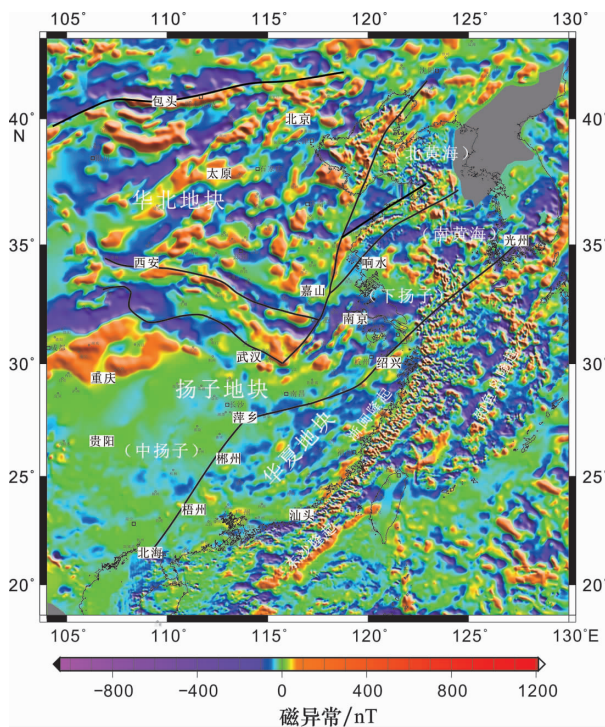


图 1 中国东部及近海磁异常

Fig. 1 Magnetic anomaly in eastern China and adjacent sea

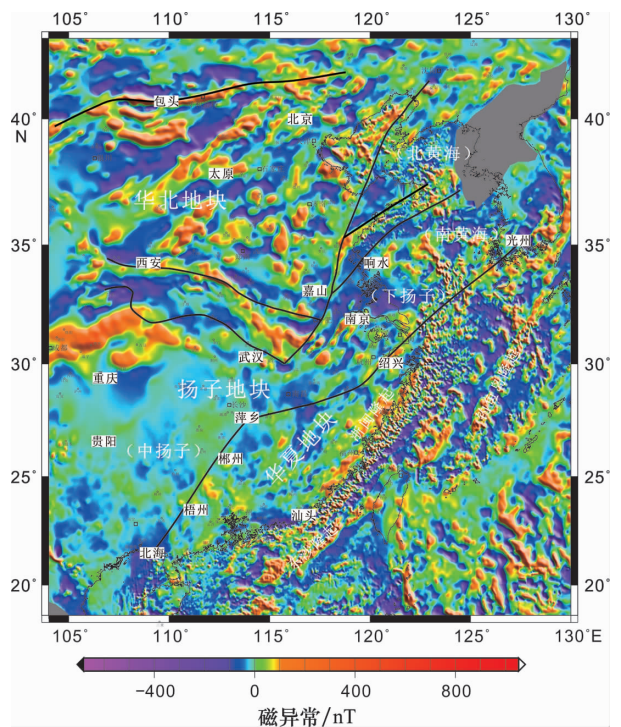


图 2 中国东部及近海化极磁异常

Fig. 2 RTP-magnetic anomaly in eastern China and adjacent sea

表 1 变倾角化极的各带地磁倾角、偏角

Table 1 The geomagnetic inclination and declination angle for the varied RTP zone

序号	纬度/(°)	地磁倾角/(°)	地磁偏角/(°)
1	42	60.616	-6.921
2	39	57.187	-6.219
3	36	53.462	-5.528
4	33	49.403	-4.850
5	30	44.975	-4.186
6	27	40.189	-3.538
7	24	34.907	-2.909
8	21	29.250	-2.301
9	18	23.196	-1.718
10	15	16.795	-1.162

## 2 小波分解与功率谱分析

一般认为地壳磁异常由浅层局部磁性体异常、中等深度的磁性基底异常和深部的磁性层下界面异常组成,小波多尺度分解能够将场源分离成多个尺度的逼近和细节,通过某阶的逼近或细节或者某几阶的逼近或细节组合能够更好地反映目标场。根据位场频谱理论,功率谱斜率增大正比于场源埋藏深度的增加,由此可以估算出小波多尺度分解出来的各细节和逼近对应的场源深度,使小波多尺度分解结果有对应的深度概念,称之为视深度。

我们对化极磁异常做五阶小波分解,得到一至五阶的小波细节和一至五阶的小波逼近结果,对这些结果分别做频谱分析,计算各自代表的视深度,频谱分析结果如图 3 所示。可以看到,一阶小波细节的频谱曲线没有表现出低频段的“直线”特征,表明一阶小波细节主要是高频随机干扰;二阶细节频谱的视深度为 9.92 km,三阶、四阶和五阶细节分别为 25、46.6 和 77.3 km;一至五阶逼近的视深度分别为 17.4、25.6、44.8、77.1 和 142 km。三阶逼近和四阶细节、四阶逼近和五阶细节的场源视深度很接近,表明在三阶分解以后,小波分解越来越多地把深

部异常信息表现在细节信号中,而逼近信号能量越来越少。因此认为,化极磁异常的三阶分解已经能够区分磁异常的浅、中、深部信息,三阶小波逼近反映了磁性层下界面磁异常(如图 4)。可以看到,三阶逼近磁异常避免了海域和陆域数据分辨率不同造成的影响,华北地块主要是几个大型的线性异常带,走向各异;南黄海中部出现 NW 向的高异常带;在东南沿海和东海陆架,主要有 NNE 向浙闽沿海高值带和钓鱼岛高值带,前者在汕头附近错断后可以延伸至东沙隆起,而后者在台湾岛北部消失。

## 3 磁源重力异常与解析信号

磁源重力异常是由重磁位之间的泊松公式为基础导出的,前提是假设异常体重磁同源,由磁异常换算磁源重力异常的频率域转换因子为

$$\frac{4\pi\sigma G}{M} \cdot \frac{2\pi(u^2+v^2)^{\frac{1}{2}}}{q_{10} \cdot q_{11}}$$

其中: $\sigma$ 为磁源体密度异常; $M$ 为磁源体磁化强度; $G$ 为引力常数; $q_{10}$ 和 $q_{11}$ 分别为地磁场单位矢量和磁异常磁化强度单位矢量的方向余弦; $u$ 和 $v$ 分别为波数。为使上式计算简单,且不影响磁源重力异常特征,常设 $\sigma G/M=1^{[11]}$ 。实际上,从其转换公式推导过程看,磁源重力异常即相当于化极异常的垂向积分,因此从其假设的重磁同源可以这样理解,磁源重力异常大的地区相当于磁源体体积规模较大。图 5 是研究区的磁源重力异常结果,华南与华北地块也表现出明显的区别,华北地块主要被几个大面积的高值区占据,在华南地块,除了东南沿海外,其余都是低值平静区。在海域,由北向南也表现出截然不同的特征:渤海全为高值区;黄海,包括苏北地区,至东海陆架北部,都为低值区,只有在南黄海中部隆起和东海陆架的钓鱼岛隆起为高值区,但幅值要低很多。在东海陆架南部,至台湾海峡,南海北部为中等高值区,只在东沙隆起和台湾岛北端附近出现局部高值区。

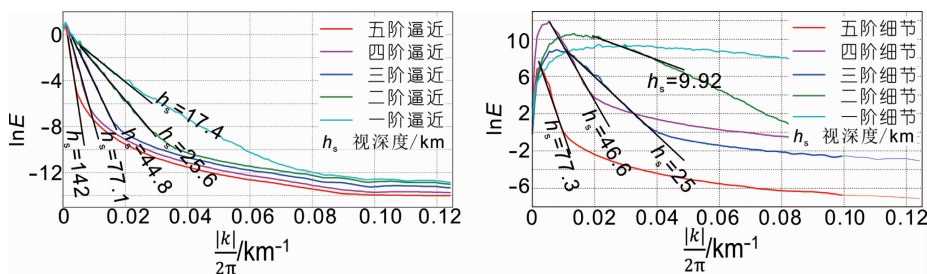


图 3 化极磁异常多尺度分解结果的频谱特征

Fig. 3 The power spectrum of multiscale analysis of RTP-magnetic anomaly



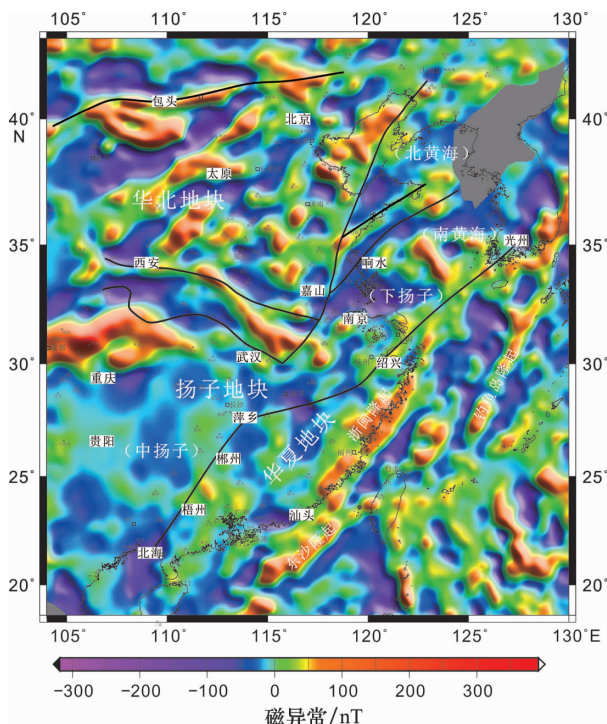
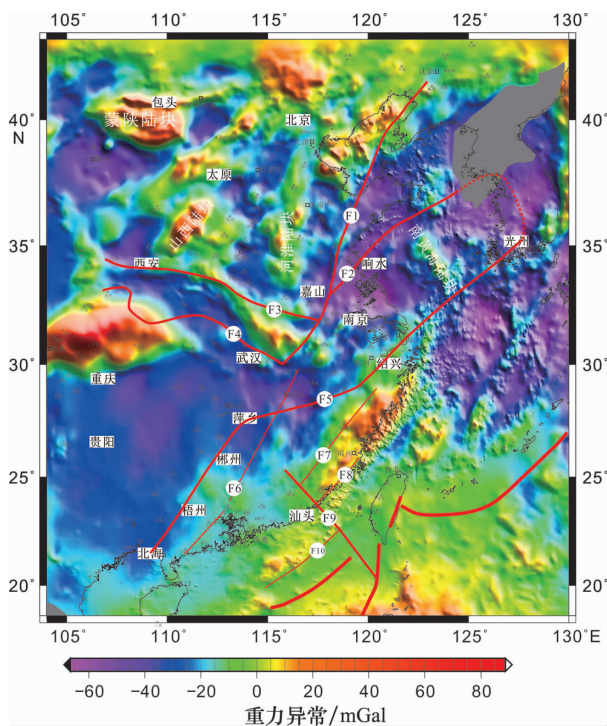


图4 中国东部及近海化极磁异常三阶逼近

Fig. 4 The 3rd order approximation of RTP-magnetic anomaly in eastern China and adjacent sea



F1—郯庐断裂;F2—嘉响断裂;F3—秦岭北缘断裂;F4—秦岭南缘断裂;F5—江绍断裂;F6—赣江—四会—吴川断裂;F7—丽水—政和—大浦断裂;F8—长乐—南澳断裂;F9—汕头—巴林塘断裂;F10—东沙隆起南缘断裂。

图5 中国东部及近海磁源重力异常

Fig. 5 Pseudo-gravity anomaly in eastern China and adjacent sea

解析信号是一种确定磁源体位置的有效方法<sup>[12]</sup>,

其幅值极大值一般刚好位于磁源体的正上方,不受磁化方向影响,因此对低磁纬度地区磁异常解释更有效,复解析信号可表示为

$$A = |A| e^{i\theta}, \text{ 其中 } |A| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2}$$

其中: $A$ 就是解析信号场; $f$ 是总场强度; $\theta$ 是倾斜角,可由垂向导数和水平导数模的比值来定义<sup>[13]</sup>,即

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\partial f / \partial z}{\partial f / \partial h}, \text{ 其中 } \frac{\partial f}{\partial h} = \left[ \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

倾斜角的一个独特性质是在场源体上方为正值,在边缘逐渐过渡到零值,而在场源体范围以外则为负值<sup>[14]</sup>。

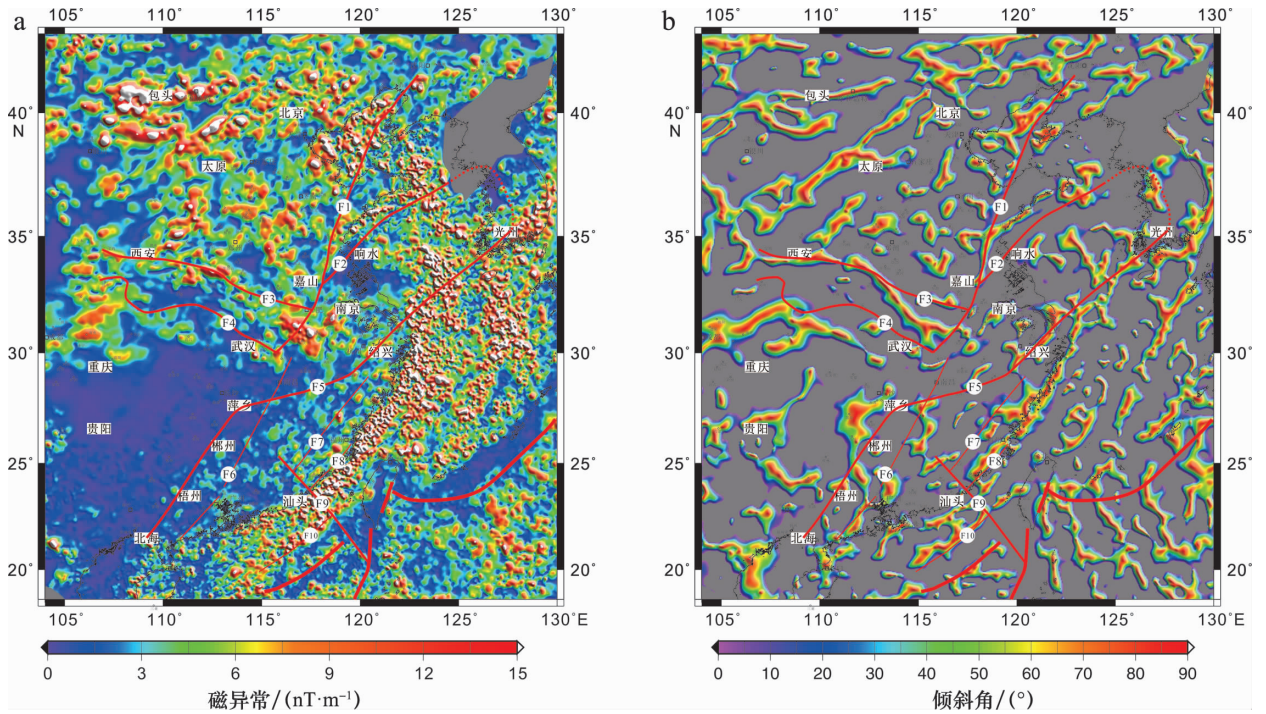
华南地块处于低纬度地区,斜磁化影响比较严重,使得磁异常形态更加复杂。解析信号很好地使磁异常归位,使其反映磁性体的位置,根据磁异常的解析信号变化特征,可以了解区域磁异常的分区及区域地质背景。图 6a 是研究区的解析信号,华北地块和华南地块表现出显著不同,华北地块为多个复杂的高值区组成,没有特定走向;华南地块由西向东幅值逐渐增强,中扬子地区为大面积低值平静区,向东南沿海逐渐增强,但没有华北地块高。在海域,由于数据分辨率高的缘故,使得解析信号变得更细小、复杂,幅值也更高,但在南海北部的海南岛附近海域,其幅值逐渐降低,逐渐有融入中扬子地区的趋势。图 6b 是研究区解析信号的倾斜角,主要反映了磁性体,尤其是浅部磁性体的走向,有些和地质构造走向一致性很好。在东南沿海,其走向发生明显的偏转,在浙闽沿海主要以 NE 向为主,而在粤南地区,主要以近 EW 向为主,可能反映了两种不同的构造应力状态在此发生转换。

## 4 讨论

### 4.1 主要构造的磁异常特征

根据图 1 所示的原始磁异常和图 2 所示化极磁异常的对比可以看到,化极后的磁异常对主要的构造边界、断裂带和造山带勾画得更加清晰。各个地块不同的磁异常面貌特征也反映了不同的基底构造性质。

华北地块的磁异常以大面积负异常为背景,分布有众多块状或带状强正异常圈闭,带状正异常也各不相同,表明华北地块在形成演化过程中不存在



F1—郯庐断裂;F2—嘉响断裂;F3—秦岭北缘断裂;F4—秦岭南缘断裂;F5—江绍断裂;F6—赣江—四会—吴川断裂;F7—丽水—政和—大浦断裂;F8—长乐—南澳断裂;F9—汕头—巴林塘断裂;F10—东沙隆起南缘断裂。

图 6 中国东部及近海磁异常的解析信号(a)和倾斜角(b)

Fig. 6 Analytic signal(a) and tilt angle(b) in eastern China and adjacent sea

统一的应力场。古元古代的陆-陆碰撞造山<sup>[15]</sup>, 显生宙以来华北克拉通东部岩石圈的剧烈减薄<sup>[16]</sup>, 使得磁异常面貌更加复杂。研究表明早在太古宙时期, 华北地块存在多个块状强磁异常区, 多被认为是太古宙微陆块的反映, 如蒙陕微陆块、山西微陆块和河淮微陆块等<sup>[17]</sup>, 这些古陆块的磁源重力异常(图 5) 表现得更加明显, 均是对应大面积的高值异常圈闭。东部的渤海磁异常是主体为 NE 向、往东北逐渐变窄的条带状正值区; 而北黄海地区磁异常总体上较为平静, 负异常背景上相间分布有细小、杂乱的正负局部异常。这种差异可能来源于它们在地块内所处的不同构造位置, 与晚中生代以来华北克拉通东部破坏、郯庐断裂带活动性质的转变有关。

南黄海磁异常的一个明显特征是对应南黄海中部隆起的团块状高正磁异常, 并被认为是古陆块的体现。但也有分析认为该区存在上地幔低速层隆起, 引起深部热活动加剧, 地幔物质上涌入侵下地壳, 使下地壳基性物质组分增加而造成<sup>[18]</sup>。从磁源重力异常图上看, 该区可以和华北地块上古陆块的磁源重力异常规模相比; 区域磁场的三维反演发现在 25 km 深度上存在强磁性体, 推测是华北变质岩系的残留体<sup>[19]</sup>。重力反演莫霍面结果也表明, 南黄

海中部隆起带和南部盆地一起, 整体落于莫霍面抬升区, 浅于 24~26 km。综合推测认为该块状高磁异常也是古陆块的反映。围绕该块状高磁异常的是低负磁异常带, 对应的是南黄海北部盆地及向南与苏北—南黄海南部盆地, 反映了南黄海盆地区磁性较弱的基底。

东南沿海晚中生代火山-侵入岩系广泛发育<sup>[20]</sup>, 一般认为晚中生代古太平洋板块俯冲和陆内玄武岩浆底侵是其主要成因, 且随着俯冲角度的由缓变陡, 火山岩的成分和时序也存在着由西向东迁移的特征, 赣江断裂以西为强过铝花岗岩区<sup>[21]</sup>。丽水—政和—大浦断裂带西侧以壳源为主的 S 型花岗岩为主, 磁性较弱; 东侧以壳幔同熔的 I 型和偏碱性的 A 型花岗岩为主, 磁性明显增强。总体上具有从西到东、从早到晚, 幔源物质增多, 碱性增强, 从 I 型向 A 型转变的趋势<sup>[22]</sup>。该区磁异常相应地属于复杂变化区, 化极磁异常和磁源重力异常都表现出由西向东规模逐渐变大, 幅值逐渐升高, 解析信号(图 6a) 也表现出明显不同于华北地块的特征, 而与东海陆架表现出明显的关联性<sup>[23]</sup>。

钓鱼岛隆起带在化极磁异常上也表现为一条高值、变化复杂的磁异常带, 西起台湾东北角, NE 向



向东延伸至赤尾屿后转向 NNE 向延伸至日本五岛列岛, 其解析信号的带状特征也十分显著, 而磁源重力异常则具有一定的分段性, 可能反映了后期的 NW 向断裂的改造作用。有种观点认为, 它是中新世弧后扩张从琉球岛弧上分裂出来的岩浆岩带, 具有与琉球—台湾岛弧相近的基底<sup>[17]</sup>。但从磁异常的形态和规模上看, 也有认为钓鱼岛隆起带和南海北部东沙—北港隆起的高磁异常带相当, 两者存在某种联系, 可能都是晚白垩世古琉球岛弧<sup>[24]</sup>, 向西在 118°N 位置存在 NW 向走滑断层使其终止<sup>[25]</sup>。

南海北部磁异常 3 个特征明显的异常区分别是高磁异常带、磁异常平缓变化区和海盆磁条带区, 化极异常、解析信号和磁源重力异常均强化了这种分区特征。一般认为该区在晚中生代张裂前存在古俯冲带<sup>[26]</sup>, 高磁异常带是古火山弧的反映, 而磁异常平缓变化区则可能残留古洋壳<sup>[27]</sup>。

#### 4.2 扬子地块的南北边界

关于扬子地块和中朝地块的结合带划分问题存在较多争议<sup>[28]</sup>。在南京以东存在一条明显的 EW 向低磁异常向高磁异常的转换带, Li<sup>[29]</sup>认为这是扬子地块和华北地块在深部的缝合线, 上地壳和下地壳分离, 沿缝合线逆冲于华北地块之上, 并得到反射地震和层析成像结果的支持<sup>[30-31]</sup>。吴其反等<sup>[19]</sup>进一步指出, 这是“鳄鱼嘴”状楔入结构的深部界线。也有研究认为朝鲜半岛中部的京畿地块亲扬子地块, 南部岭南地块与华北地块相似, 在朝鲜半岛前寒武纪京畿地块中识别出一个含有榴辉岩的洪城变质杂岩, 并认为临津江带和沃川带不具备造山带的变质特征, 据此提出地壳拆离与逆冲模式, 即华北与扬子陆壳的碰撞带沿朝鲜半岛西缘, 大致呈 NS 向分布, 扬子陆壳俯冲带的深部超高压部分未出露地表, 下地壳的高压部分从俯冲带拆离, 并逆掩到地表形成洪城杂岩, 没有形成横穿半岛的变质(造山)带<sup>[32]</sup>。卫星重力异常的研究也认为在京畿地块的中部可能存在近 NS 向的断裂带, 与临津江带和沃川带共同构成中朝与扬子板块的结合带<sup>[33]</sup>。由此, 可以认为扬子地块和中朝地块在南黄海地区的结合带是以这种楔入—俯冲模型统一起来。扬子地块上地壳与下地壳分离, 上地壳向北逆冲于华北地块之上, 下地壳和下伏岩石圈俯冲于华北地块之下, 使得整个苏北—南黄海地区的磁异常面貌与中扬子地区和华北地块均不同。

扬子地块与华夏地块自新太古代—古元古代以

来, 经历了多期次的裂解与拼合, 直到志留纪末最后一次拼合才固结形成统一的华南大陆<sup>[34]</sup>, 在陆地上, 公认江绍断裂带为两大地块之间的界线。关于其西延和东延入海的走向问题, 前人也作过多种总结和研究<sup>[35-37]</sup>。由于华夏地块分布大量晚中生代岩浆岩, 两侧基底磁性差异大, 西北侧磁异常变化平缓, 东南侧异常剧烈跳动, 解析信号表现为低背景上的复杂高值区, 磁源重力异常同样表现为由低值背景区向高值背景区的转变。根据这些特征可以刻画该断裂的西延和东延走向, 可以认为萍乡—郴州—梧州—北海一线是江绍断裂的西延。东延从杭州湾 NE 向延伸至济州岛北侧, 转向 NNE 延伸至朝鲜半岛南部的沃川剪切带, 但并没有贯穿朝鲜半岛, 而是在光州附近终止, 此处出现在一条近 NS 向的断裂构造。

#### 4.3 华夏地块中生代东边界

很早人们就认为中国东南大陆外缘存在古太平洋的俯冲带, 古太平洋板块西缘与华南大陆的缝合带也是华夏地块中生代东边界, 李三忠等<sup>[38]</sup>对此做过详细论述, 并认为安第斯型东亚陆缘起始于晚三叠世, 但关于其位置展布还有争议。从磁异常上(图 1 和图 2)可以看到, 在南海东北部存在一条显著的、横贯东沙、与大陆边缘近于平行的高磁异常带, 关于其共识最多的是与中生代俯冲(或碰撞)的岩浆活动有关。根据华南地区的岩浆岩露头分析认为丽水—政和—大埔断裂以东为钙碱性中酸性火山—侵入杂岩区<sup>[21]</sup>, 地球化学特征指示其为活动陆缘岛弧环境<sup>[39]</sup>。而东沙隆起区的钻井和综合地球物理反演也都认为是中—酸性火山岩<sup>[40]</sup>, 与浙闽沿海火山岩性质更接近。穿过南海北部的最佳横波二维结构模型及波速比( $v_p/v_s$ )剖面结果也认为, 东沙隆起带的上地壳酸性火山岩组成<sup>[41]</sup>, 与福建沿海的大火山岩省的岩性一致。由此我们推测浙闽沿海向东南延伸至南海东北部东沙隆起的火成岩带可能指示了中生代东亚陆缘缝合带的位置。

#### 4.4 汕头—巴林塘断裂

该断裂是依据磁异常特征划分的东南沿海地区重要的 NW 向断裂, 比前人所划的 NW 向九龙江—鹅銮鼻断裂<sup>[42]</sup>靠西, 根据磁异常所反映的特征, 该断裂向陆可延伸至 25°N 左右, 错断了浙闽沿海的 NE 向火山岩带磁异常和南海北部陆缘的高磁异常带, 在磁源重力异常上特征也十分明显。该断裂向海可延伸至 20°N 左右, 主要表现为居里面隆起带

的错断<sup>[43]</sup>,地震剖面上也存在走滑活动的迹象<sup>[44]</sup>。该断裂位置也和 Hsu 等<sup>[45]</sup>提出的南海最东北部一条在古转换断层基础上发育起来的吕宋—琉球转换板块边界(LRTPB)一致。研究认为在早中生代古太平洋板块和古特提斯板块是以一近 NS 向转换断层相联系,古特提斯构造板块沿该断层向亚洲大陆东部俯冲<sup>[46]</sup>。在中侏罗世中国东南部由古特提斯构造域向太平洋构造域转换,形成的 NE 向构造带叠加于早期和同期的近 EW 向构造带之上,早期的南岭东段地区为构造域转换的交接带<sup>[38,47]</sup>,该断裂的西侧呈现一定的 EW 向特征,与东侧的 NE 走向不同,这些特征可以在磁异常的倾斜角异常图(图 6b)上得到印证。

因此该断裂至少属于中生代的产物,对晚中生代古太平洋板块向东亚大陆俯冲过程有控制作用,将古太平洋俯冲的火山弧分为南海北部东沙隆起带和浙闽沿海火成岩带两部分,两者均表现为高磁异常,这也指示了长乐—南澳断裂在南海北部延伸的位置<sup>[48]</sup>。磁源重力异常图(图 5)上也可以发现,浙闽沿海火成岩带为磁源重力异常高值区,其形态可以延伸到南海北部陆架,幅值逐渐降低,其间被 NW 向断裂错断。而该断裂东侧的澎湖隆起至钓鱼岛隆起,并没有明显的高值区,表明该带上的磁性物质规模比北侧的火山岩带小很多,其成因可能也不相同。在晚中生代以来南海北部由主动陆缘到被动陆缘的转换过程中,这种 NW 向断裂可能也起到了一定的阻隔作用。

## 5 结论

利用世界磁异常图和我国近海船载磁测数据,拼接、融合得到了我国东部及近海磁异常图,在此基础上计算了化极磁异常以及化极磁异常的小波分解和频谱分析,磁源重力异常、磁异常解析信号及倾斜角,这些结果体现了中国东部及近海的区域大地构造特征。

(1)华北地块的高磁异常体现了元古宙变质基底,高磁源重力异常区体现了古陆核的分布,南黄海中部隆起的高磁异常也可能是华北地块古陆核的反映。

(2)扬子地块元古宙褶皱基底主要为低磁异常区,苏北盆地南部近 EW 向负磁异常反映了扬子地块和华北地块深部接触带;江绍断裂的西延可以定

为萍乡—郴州—梧州—北海一线,东延则可能是于朝鲜半岛西缘光州终止,没有穿过朝鲜半岛。

(3)华夏地块中生代火成岩带主要是高频复杂磁异常区,由西向东可以分为 3 个带,浙闽火山岩带向西南可以和东沙隆起相连,指示了其东部边界。汕头附近(118°N)NW 向断裂可能是一条至少在中侏罗世就存在的古老转换断层,控制了后期古太平洋板块的俯冲,对新生代以来的构造演化也有控制作用。

李三忠教授对论文提出的指导意见对提高本文质量发挥了重要作用,文中部分图件使用 GMT 软件<sup>[49]</sup>制作,在此一并表示衷心感谢!

## 参考文献

- [1] 刘光鼎. 中国海地球物理场和地球动力学特征[J]. 地质学报, 1992, 66(4): 300-314.
- [2] 刘光鼎. 中国海地球物理场特征[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 1-12.
- [3] 郝天珢, 刘伊克, 段昶. 中国东部及其邻域地球物理场特征与大地构造意义[J]. 地球物理学报, 1997, 40(5): 677-690.
- [4] 戴勤奋. 中国海区及邻域地磁场分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(2): 63-72.
- [5] 滕吉文, 闫雅芬. 中国东南大陆和陆缘地带板内构造界带的地磁异常场响应[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(2): 105-117.
- [6] 李春峰, 陈冰, 周祖翼. 中国东部及邻近海域磁异常数据所揭示的深部构造[J]. 中国科学: D 辑, 2009, 39(12): 1770-1779.
- [7] MAUS S, SAZONOVA T, HEMANT K, et al. National geophysical data center candidate for the world digital magnetic anomaly map[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8(6): Q6017.
- [8] 徐世浙, 沈晓华, 邹乐君, 等. 将航磁异常从飞行高度向下延拓至地形线[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1127-1130.
- [9] 李三忠, 李玺瑶, 赵淑娟, 等. 全球早古生代造山带(Ⅲ): 华南陆内造山[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016(4): 1-23.
- [10] LI X. Magnetic reduction-to-the-pole at low latitudes: observations and considerations[J]. *The Leading Edge*, 2008(8): 990-1002.
- [11] 管志宁. 地磁场与地磁勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [12] ROEST W R, VERHOETT J, PILKINGTON M. Magnetic interpretation using the 3D analytic signal[J]. *Geophysics*, 1992, 57(1): 116-125.
- [13] VERDUZCO B, AIRHEAD J D, GREEN C M, et al. New insights into magnetic derivatives for structural mapping[J]. *The Leading Edge*, 2004, 23(2): 116-119.

- [14] MILLER H G, SINGH V. Potential field tilt: a new concept for location of potential field sources[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1994, 32(2/3): 213-217.
- [15] 李三忠, 赵国春, 孙敏. 华北克拉通早元古代拼合与 Columbia 超大陆形成研究进展[J]. *科学通报*, 2016(9): 919-925.
- [16] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. *地学前缘*, 2010, 17(4): 64-89.
- [17] 车自成, 刘良, 罗金海. 中国及其邻区区域大地构造学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [18] 陈建峰, 张怡志. 苏北-南黄海磁性基底[M]//刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理特征. 北京: 科学出版社, 1992: 131-136.
- [19] 吴其反, 路凤香, 刘庆生, 等. 苏鲁地区地壳深部太古宙残留岩片: 来自航磁资料的证据[J]. *科学通报*, 2003, 48(4): 395-399.
- [20] 李兆鼎. 中国东部中、新生代火成岩及其深部过程[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [21] 徐鸣洁, 舒良树. 中国东南部晚中生代岩浆作用的深部条件制约[J]. *高校地质学报*, 2001, 7(1): 21-33.
- [22] 刘英会, 余学中, 黎津. 中国东南沿海不同类型花岗岩的磁性特征[J]. *物探与化探*, 2007, 31(6): 526-528.
- [23] 江为为, 郝天珧, 刘少华, 等. 中国东部大陆与东海海域地质构造的相关性分析[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(1): 75-90.
- [24] 吴时国, 刘展, 王万银, 等. 东沙群岛海区晚新生代构造特征及其对弧-陆碰撞的响应[J]. *海洋与湖沼*, 2004, 35(6): 482-490.
- [25] SIBUET J C, HSU S K. Geodynamics of the Taiwan arc-arc collision[J]. *Tectonophysics*, 1997, 274: 221-251.
- [26] 周蒂, 王万银, 庞雄, 等. 地球物理资料所揭示的南海东北部中生代俯冲增生带[J]. *中国科学: D辑*, 2006, 36(3): 209-218.
- [27] 吴招才, 高金耀, 李家彪, 等. 南海北部磁异常特征及对前新生代构造的指示[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3292-3302.
- [28] 唐贤君, 於文辉, 单蕊. 中国东部-朝鲜半岛中生代板块结合带划分研究现状与问题[J]. *地质学报*, 2010, 84(5): 606-617.
- [29] LI Z X. Collision between the North and South China blocks: a crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu Fault[J]. *Geology*, 1994, 22(8): 739-742.
- [30] 徐佩芬, 孙若昧, 刘福田, 等. 扬子板块俯冲、断离的地震层析成像证据[J]. *科学通报*, 1999, 44(15): 1658-1661.
- [31] 徐佩芬, 刘福田, 王清晨, 等. 大别-苏鲁碰撞造山带的地震层析成像研究: 岩石圈三维速度结构[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(3): 377-385.
- [32] 翟明国, 郭敬辉, 李忠, 等. 苏鲁造山带在朝鲜半岛的延伸: 造山带、前寒武纪基底以及古生代沉积盆地的证据与制约[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 415-428.
- [33] 金峰男, 杜劲松, 陈超. 中朝与扬子地块结合带东部的卫星重力异常特征研究[J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(4): 1219-1232.
- [34] 程裕淇. 中国区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [35] 郝天珧, 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[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(1): 13-23.
- [36] 郝天珧, 刘建华, 王谦身, 等. 对下扬子与华南边界结合带东延问题的地球物理探讨[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(2): 269-275.
- [37] 杨金玉, 徐世浙, 余海龙, 等. 视密度反演在东海及邻区重力异常解释中的应用[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(6): 1909-1916.
- [38] 李三忠, 余珊, 赵淑娟, 等. 东亚大陆边缘的板块重建与构造转换[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013(3): 65-94.
- [39] 李武显, 周新民. 中国东南部晚中生代俯冲带探索[J]. *高校地质学报*, 1999, 5(2): 164-168.
- [40] 陈冰. 南海东北部新生代沉积盆地基底的地球物理特征及其地质解释[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [41] ZHAO M H, QIU X L, XIA S H, et al. Seismic structure in the northeastern South China Sea: S-wave velocity and  $v_p/v_s$  ratios derived from three-component OBS data[J]. *Tectonophysics*, 2010, 480(1/2/3/4): 183-197.
- [42] 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清, 等. 南海地质[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [43] 吴招才, 高金耀, 赵俐红, 等. 南海北部陆缘的磁异常特征及居里面深度[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2010, 35(6): 1060-1068.
- [44] 钟广见, 吴能友, 林珍, 等. 南海东北陆坡断裂特征及其对盆地演化的控制作用[J]. *中国地质*, 2008, 35(3): 456-462.
- [45] HSU S K, YEH Y, DOO W B, 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] 高长林, 叶德燎, 黄泽光, 等. 中国中生代两个古大洋与沉积盆地[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(2): 95-102.
- [47] 余心起, 吴淦国, 张达, 等. 中国东南部中生代构造体制转换作用研究进展[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(10): 1167-1174.
- [48] 程世秀, 李三忠, 索艳慧, 等. 南海北部新生代盆地群构造特征及其成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012(6): 79-93.
- [49] WESSEL P, SMITH W H F. New, improved version of generic mapping tools released[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1998, 79(47): 579.