

冯丽丽, 王粲, 陈斌, 袁浩浩. 2015. 基于 MF6, EMM2010 和 CGRF2010 模型的中国大陆地壳磁异常特征. 地震学报, 37(6): 997–1010. doi:10.11939/jass.2015.06.010.

Feng L L, Wang C, Chen B, Yuan J H. 2015. Crustal magnetic anomaly characteristics of Chinese mainland based on MF6, EMM2010 and CGRF2010 models. *Acta Seismologica Sinica*, 37(6): 997–1010. doi:10.11939/jass.2015.06.010.

基于 MF6, EMM2010 和 CGRF2010 模型的中国大陆地壳磁异常特征^{*}

冯丽丽^{1,2),*} 王 粲¹⁾ 陈 斌¹⁾ 袁浩浩¹⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国西宁 810001 青海省地震局

摘要 利用地磁场全球模型 MF6, EMM2010 和基于地面观测数据建立的 2010.0 中国地磁参考场(CGRF2010)等 3 个模型分别计算了中国大陆地区岩石圈磁场,发现 3 个模型各有其特点:基于卫星数据建立的 MF6 模型分辨率有限,其磁异常条带呈蠕虫状;EMM2010 模型岩石圈磁场概貌与 MF6 模型相似但细节特征十分突出;CGRF2010 模型可信度较高,其分辨率东西部差异较大,异常形态以团状为主.通过分析 3 个模型得到的中国大陆地区岩石圈磁场垂直分量 ΔZ 的强度及其分布特征发现: ΔZ 分量在准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地及四川盆地等地区均为正值,而在天山、大巴山等地区为负值; ΔZ 分量分布在华北岩石圈地块与华南岩石圈地块吻合程度较高;在青藏高原南部、西域岩石圈地块北部以及松辽岩石圈地块,全球模型与 CGRF2010 模型存在显著差别.

关键词 地壳磁异常 岩石圈磁场 CGRF2010 EMM2010 MF6

doi:10.11939/jass.2015.06.010 中图分类号: P318.4⁺3 文献标志码: A

Crustal magnetic anomaly characteristics of Chinese mainland based on MF6, EMM2010 and CGRF2010 models

Feng Lili^{1,2),*} Wang Can¹⁾ Chen Bin¹⁾ Yuan Jiehao¹⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, China

Abstract: The 2010.0 Epoch China Geomagnetic Map and its related models based on ground observation could describe the lithospheric magnetic field of Chinese mainland (refer to as Chinese geomagnetic reference field on 2010 epoch, CGRF2010 for short). We can also use global geomagnetic models, MF6 and EMM2010 for example, to calculate the lithospheric magnetic field of Chinese mainland. Based on the three models, the lithospheric magnetic fields of Chinese mainland were calculated in this paper. Each of them has its own characteristics. MF6 model, which was based on satellite data, has limited res-

* 基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(DQJB13B09)和 2013 年度地震行业科研专项(201308009)共同资助.

收稿日期 2015-03-10 收到初稿, 2015-04-23 决定采用修改稿.

* 通讯作者 e-mail: ynufl@sina.com

olution and wormlike magnetic anomaly stripes. The model EMM2010 has a very similar overview general picture with the model MF6 but has a lot more details. The model CGRF2010, which has many clustery anomalous areas, is highly reliable, although the resolution of the model is quite different from east to west. The analyses on the vertical component ΔZ of lithospheric magnetic field and its distribution characteristics indicate that the three model-based ΔZ are consistently positive at Junggar, Tarim, Qaidam and Sichuan basin and negative at Tianshan and Dabashan. The ΔZ component distribution of the three models at North China lithospheric block agrees well with that at South China lithospheric block. However, ΔZ component based on global geomagnetic models is notably different from that based on the model CGRF2010 at southern Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, northern Xiyu lithospheric block and whole Songliao lithospheric block.

Key words: crustal magnetic anomaly; lithospheric magnetic field; CGRF2010; EMM2010; MF6

引言

地磁场由主磁场、岩石圈磁场、变化磁场和感应磁场等 4 部分组成. 从地磁场中减去主磁场, 再消去变化磁场和感应磁场, 剩余部分称为岩石圈磁场, 又称为地壳磁场或地磁异常场. 岩石圈磁场的异常分布是由岩石圈物质磁化强度的不均匀分布所引起的, 具有空间分布极其复杂、而时间上却异常稳定的特点. 在地震过程中岩体受力产生形变直至破裂, 岩石磁性会伴随这一过程发生变化, 并表现为岩石圈磁场的变化. 若这种变化引起的量级能够被地面仪器观测到, 则可以利用这种效应(地震磁效应)获知震源岩体的受力状态和运动过程, 进而可以根据岩体应力、应变状态并结合地体条件预测地震(丁鉴海等, 2011); 岩石圈磁场能够反映地壳和上地幔的结构特征和物质组成, 可为地球物理构造研究提供依据(车自成等, 2002; 吴招才等, 2011); 根据磁异常并结合地质及地球物理资料可以圈定岩体和划分不同岩性区, 推断断裂、破碎带及褶皱位置及产状, 并圈定和划分成矿区(熊光楚, 1994; 管志宁, 1997; 李才明, 李军, 2013).

岩石圈磁场一直是地磁学中的重要研究对象. 得益于美国、德国、前苏联和丹麦等国家陆续发射的多颗磁测卫星, 对全球范围的地磁场实现了高密度连续观测. 现有大部分全球地磁模型都是基于卫星资料建立的, 如 Pomme 模型(Maus *et al.*, 2010)和综合磁场(magnetic field, 简称为 MF)模型(Maus *et al.*, 2008)等. 美国和英国的科研人员将卫星、航空、海洋和地面磁测数据综合汇编, 建立了分辨率达到 56 km 的 NGDC-720 模型及增强模型(enhanced magnetic model 2010, 简称为 EMM2010)(Maus, 2010). 该模型是利用球谐分析法描述岩石圈磁场精度最高的模型之一. 利用上述全球模型提供的球谐系数可以计算中国地区的地磁场强度.

基于实际需要, 我国地磁科研人员开展了大量关于中国区域地磁场模型的研究工作. 1950—2000 年期间, 每 10 年绘制出版一次中国地磁图, 2000 年以后每 5 年绘制出版一次中国地磁图. 目前最新一代中国地磁图为《2010.0 年代中国地磁图》, 该地磁图及与其相配套的 2010.0 年代中国地磁参考场(Chinese geomagnetic reference field on 2010 epoch, 简写

为 CGRF2010)模型描述的是 2010.0 年代地球主磁场和岩石圈磁场在中国地区的分布状态.

在建立地磁场模型过程中, 由于地磁场观测数据来源不同, 以及建立地磁场模型所选用方法不同, 可能导致不同地磁模型存在较为显著的差异. 因此, 在开展研究工作时, 根据实际需要选择适当的地磁场模型十分重要. 本文首先分别计算了第六代综合模型 MF6 及 EMM2010 模型在中国大陆地区内 (18°N — 54°N , 73°E — 136°E) 内岩石圈磁场各要素, 研究了垂直分量 ΔZ 的强度及其分布特征; 然后对 MF6 模型、EMM2010 模型及 CGRF2010 模型的岩石圈磁场分布特征进行了对比, 指出 3 个模型的差异, 并分析造成差异的可能原因; 最后分析了各模型的优点和不足, 以便根据研究的实际需要选择适当的模型进行计算.

1 建模理论

1.1 高斯球谐分析

高斯在 1837 年将球谐分析法应用于对地磁场的数学描述中. 地磁场 B 是一个位场, 其位函数可以用一个标量函数 U 来描述, 即

$$B = -\nabla U. \quad (1)$$

在地表与电离层底部之间的自由空间, 地磁位 U 满足拉普拉斯方程, 即

$$\nabla^2 U = 0. \quad (2)$$

在球坐标系下展开拉普拉斯方程:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \lambda^2} = 0, \quad (3)$$

则式(3)的解可写为

$$U = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left[\left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) + \left(\frac{r}{a} \right)^n (j_n^m \cos m\lambda + k_n^m \sin m\lambda) \right] P_n^m(\cos \theta). \quad (4)$$

式中中括号内有两项, 第 1 项表示内源场, 第 2 项表示外源场. 地球表面地磁场的绝大部分来源于地球内部, 地磁场中内源场部分为基本磁场, 其相应的位函数为

$$U = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left[\left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \right] P_n^m(\cos \theta). \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)得

$$\begin{cases} B_r = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left[(n+1) \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \right] P_n^m(\cos \theta), \\ B_{\theta} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left[- \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \right] \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta}, \\ B_{\lambda} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left[\left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} (g_n^m \sin m\lambda - h_n^m \cos m\lambda) \right] \frac{m P_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta}, \end{cases} \quad (6)$$

式中: $B_r = -Z$, $B_{\theta} = -X$, $B_{\lambda} = Y$; X , Y 和 Z 分别为球坐标系下地磁场北向分量、东向分量和垂直分量; λ 和 θ 分别为球坐标系中经度和余纬; a 为地球参考半径 ($a = 6371.2 \text{ km}$); r 为离开地心的径向距离; $P_n^m(\cos \theta)$ 为缔合勒让德函数; n 为球谐级数的阶, m 为球谐级数的次; g_n^m 和 h_n^m 为球谐系数.

1.2 曲面样条拟合

在磁异常拟合中, 常用曲面样条函数拟合, 即

$$\begin{cases} B(x, y) = a + bx + cy + \sum_{i=1}^N F_i r_i^2 \ln(r_i^2 + \epsilon), \\ \sum_{i=1}^N F_i = \sum_{i=1}^N F_i x_i = \sum_{i=1}^N F_i y_i = 0, \end{cases} \quad (7)$$

式中: x 和 y 分别为待拟合点的空间横坐标和纵坐标; x_i 和 y_i 分别为第 i 个原始测点的横坐标和纵坐标; a, b, c 和 F_i 为曲面样条拟合系数; $r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$ 为待拟合点 (x, y) 与第 i 个原始测点的距离; N 为原始数据个数; ϵ 为曲率因子, 控制曲面拟合数值与原始数值的最大差值. Harder 和 Desmarais(1972)首次将该方法用于地表离散数据的插值, 安振昌和徐元芳(1981)将该方法引入到中国地区地磁场模型计算中.

2 模型简介

2.1 全球模型

近年来日益发展的近地表磁测(地面、海洋和航空磁测)以及卫星磁测积累了大量的地磁场观测数据. 其中, 卫星磁测手段对地磁场研究作出了突出贡献. 卫星磁场测量的显著优点是能够在地表以上数百千米的高度对地磁场进行高密度扫描式的测量, 可获得国境线以外地区及自然条件恶劣地区的地磁测量数据, 弥补了其它地磁观测手段所不能覆盖的监测空白. 以高斯理论为基础并结合大量地磁场实测资料, 已建立了多种全球地磁场模型.

2.1.1 MF 系列模型

MF 模型是利用 CHAMP 卫星数据构建的系列模型. 第 1 版 MF1 模型于 2002 年发布, 用 15—80 阶球谐函数代表岩石圈磁场的可见部分(Maus *et al*, 2008). 随着 CHAMP 卫星磁测数据的不断积累, 陆续建立了新的 MF 系列模型. 其中, MF6 模型使用 2004—2007 年的观测数据建立, 最大截止阶数提高到 133 阶, 所对应的最小空间波长为 300 km. 该模型是第一个基于卫星解决海底磁条带方向的岩石圈磁场模型, 可以揭示海洋地壳的年龄结构. 由 MF6 模型计算得到的中国大陆及其邻区岩石圈磁场如图 1 所示. 可以看出, 其正负异常条带似蠕虫状相间分布, 条带宽度约为 150—300 km.

2.1.2 NGDC-720 模型和 EMM2010 模型

NGDC-720 模型是由地面、航空、海洋和卫星磁测数据综合汇编而成. 该模型建立过程中使用了经扫描数字化后的中国大陆地区航磁图数据. 由于卫星数据决定的长波长场更为可靠, 故波长大于 330 km 的成分由 CHAMP 卫星得到的地壳磁场所代替. 最后, 由最小二乘法反演求出地磁位的球谐系数. NGDC-720 模型提供了 16—720 阶球谐级数展开来表示地壳场, 对应于 2500—56 km 的空间波长范围. 720 阶的截断阶数相当于角波长为 30 弧分, 即模型分辨率为 15 弧分. 从此意义上看, 该模型具有极高的空间分辨率.

作为 EMM 模型的前身, NGDC-720 模型将不再进行更新. 以后的版本则称为 EMM2010 模型. 该模型包含 1—720 阶的球谐级数, 时间跨度为 2000—2015 年. 其中 2000—2010 年的主磁场(1—15 阶)是由 POMME7 模型的前 15 阶所代替. 岩石圈磁场部分(16—720 阶)则来源于 NGDC-720 模型. 由 EMM2010 模型计算得到的中国大陆及其邻区岩石圈磁场分布如图 2 所示. 理论上该模型分辨率可达到 56 km, 因此其所显示的磁异常细节特征十分显著, 碎屑状磁异常散布于整个区域. 在大规模盆地及山脉地区, 一般可出现较大尺度的片状磁异常区.

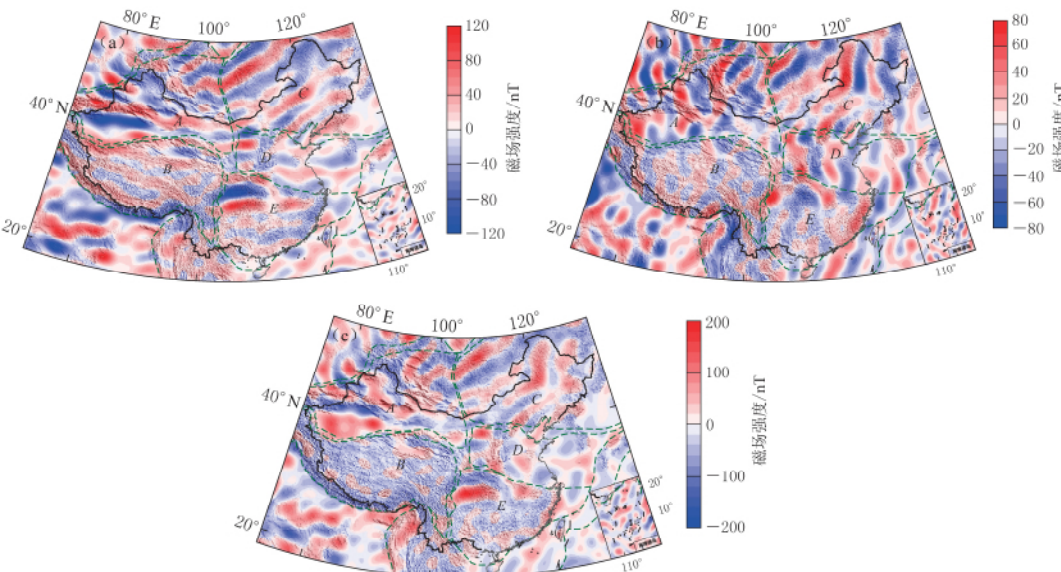


图 1 由 MF6 模型得到的中国大陆及其邻区岩石圈磁场北向分量 ΔX (a)，
东向分量 ΔY (b)和垂直分量 ΔZ (c)

A—E 分别为西域岩石圈、青藏岩石圈、松辽岩石圈、华北岩石圈和华南岩石圈地块，下同

Fig. 1 The north component ΔX (a), east component ΔY (b) and vertical component ΔZ (c) of lithospheric magnetic field of Chinese mainland and its adjacent areas obtained by the model MF6
The capital letters A, B, C, D, E represent the Xiyu, Qinghai-Xizang (Tibet), Songliao, North China and South China lithosphere block, respectively, the same below

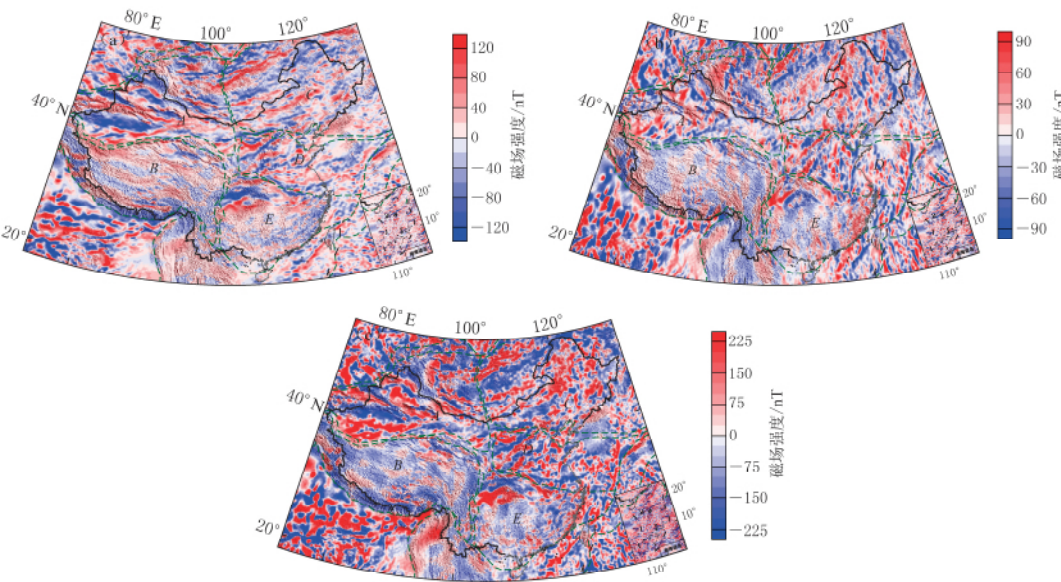


图 2 由 EMM2010 模型得到的中国大陆及其邻区岩石圈磁场北向分量 ΔX (a)，
东向分量 ΔY (b)和垂直分量 ΔZ (c)

Fig. 2 The north component ΔX (a), east component ΔY (b) and vertical component ΔZ (c) of lithospheric magnetic field of Chinese mainland and its adjacent areas obtained by the model EMM2010

2.2 2010.0 年代中国区域地磁场曲面样条模型

2008—2009 年, 中国地震局地球物理研究所承担了中国大陆地区共 851 个野外地磁三分量测量点的测量工作(陈斌, 2013). 这些测点的观测数据是《2010.0 年代中国地磁图》的主要数据来源. 除此之外, 2002—2004 年 431 个测点的观测数据也参与到《2010.0 年代中国地磁图》的编制过程中. 另外, 《2010.0 年代中国地磁图》还使用了邻近海岛及周边国家 190 个测点的历史地磁观测数据, 以及 32 个国内地磁台和 11 个周边国家地磁台的观测数据. 将全部测点的地磁观测数据进行日变化改正和长期变化改正后, 统一归算到 2010 年 1 月 1 日午夜北京时 00—03 时的地磁场均值中. 为降低边界效应, 还在计算区域边缘均匀补充了 36 个测点的国际地磁参考场计算值.

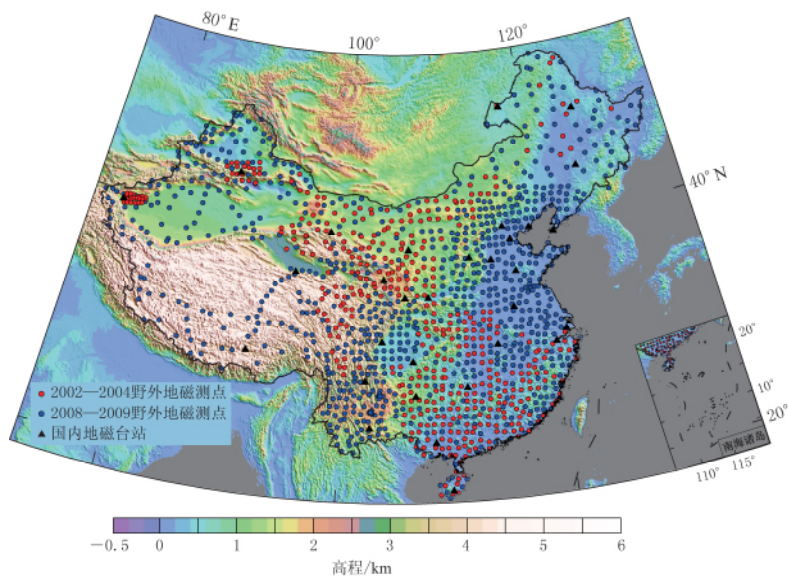


图 3 2010.0 年代中国地磁参考场模型野外地磁测点和台站分布

Fig. 3 Distribution of stations and observatories of the model CGRF2010

对上述数据直接进行曲面样条拟合, 计算了中国大陆地区地磁场, 得到了 2010.0 年代中国地区地磁场曲面样条模型. 该数据已经进行了日变化改正, 扣除了外源场的影响. 由于测量过程中避开了快速变化的外源磁场活动时段, 降低了感应磁场的影响, 故建模过程中可忽略这部分能量, 可以认为拟合得到的模型中包含了主磁场和岩石圈磁场. 其中主磁场部分根据 2010.0 年代中国地区地磁场球冠谐模型(陈斌, 2013)计算得到. 该模型利用 8 阶球冠谐函数拟合中国地区 851 个测点的流动地磁观测数据, 得到主磁场; 将其从 2010.0 年代中国地区地磁场曲面样条模型中消除, 即可得到 2010.0 年代中国地区岩石圈磁场.

图 4 为由 CGRF2010 模型得到的中国大陆岩石圈磁场. 可以看出, 该区域岩石圈磁场以串珠状磁异常为主, 东部与西部存在较大差异. 东部由于测点密集, 显示出大量的磁异常细节, 而西部尤其是青藏高原地区由于测点稀少分辨率则较低. 在 CGRF2010 模型中中国大陆岩石圈磁场存在若干大尺度的异常区, 下文将作进一步讨论.

3 中国大陆地区岩石圈磁场

中国大陆位于欧亚、印度-澳大利亚和太平洋(菲律宾)三大板块交汇部位, 经历了漫

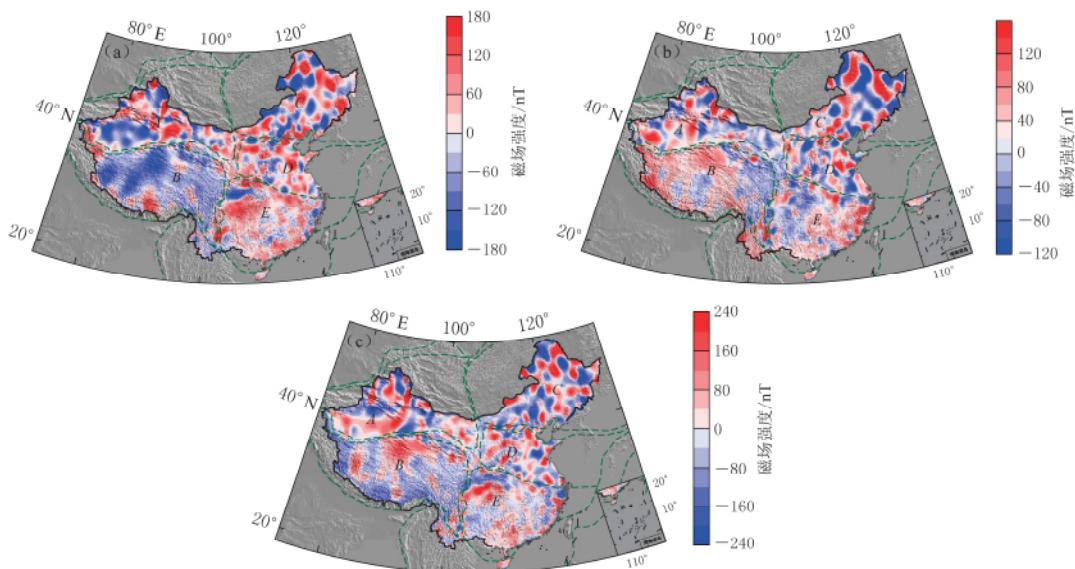


图 4 由 CGRF2010 模型得到的中国大陆岩石圈磁场北向分量 ΔX (a), 东向分量 ΔY (b) 和垂直分量 ΔZ (c)

Fig. 4 The north component ΔX (a), east component ΔY (b) and vertical component ΔZ (c) of lithospheric magnetic field of Chinese mainland obtained by the model CGRF2010

长的地质演化历史, 地质构造十分复杂, 岩石圈结构颇具特色. 根据李廷栋(2006)研究可以将中国大陆划分为 5 个岩石圈地块, 分别为西域岩石圈、青藏岩石圈、松辽岩石圈、华北岩石圈和华南岩石圈地块. 下面分别讨论由 3 个模型计算得出的岩石圈磁场垂直分量 ΔZ 在 5 个岩石圈地块内的分布特征. 由于 EMM2010 模型正负磁异常区分布概貌与 MF6 模型十分类似, 因此将二者作为全球模型共同讨论.

3.1 西域岩石圈地块

西域岩石圈地块以康西瓦断裂带—阿尔金断裂带—祁连北缘断裂带与青藏岩石圈地块为分界, 东部为南北构造带, 北部和西部延伸至境外. 地壳表层构造为近东西向造山带与构造盆地相间排列的构造格局, 形成“三山二盆”结构, 从北到南依次为阿尔泰山、准噶尔盆地、天山、塔里木盆地和昆仑山. 各模型计算得出的西域岩石圈地块 ΔZ 分量分布如图 5 所示. 可以看出, 全球模型 ΔZ 分量山脉沿线以负磁异常为主, 盆地地区多为正磁异常. 具体表现为:

1) 阿尔泰山负异常. 由 MF6 和 EMM2010 模型得出的岩石圈磁场在该地区均表现为负磁异常, 最大异常强度均在一 110 nT 左右. 异常区边缘磁场水平梯度大, 向内逐渐趋于平缓.

2) 南北天山负异常. 沿南北天山出现呈 V 字型分布的负异常. 在南天山南部负异常区范围向南扩散到塔里木盆地北部, 覆盖了 40°N 以北的大部分地区. 由 MF6 模型得到的该地区岩石圈磁场最大负异常为 $-150\text{ nT}(85.4^{\circ}\text{E}, 41.8^{\circ}\text{N})$; 由 EMM2010 模型得到的该地区岩石圈磁场最大负异常为 $-223\text{ nT}(88^{\circ}\text{E}, 41^{\circ}\text{N})$.

3) 准噶尔盆地正异常. 准噶尔盆地除小部分边缘地区以外, 岩石圈磁场均表现为正磁异常. 由 MF6 和 EMM2010 模型得到的该地区岩石圈磁场最大强度分别为 $87\text{ nT}(84.7^{\circ}\text{E},$

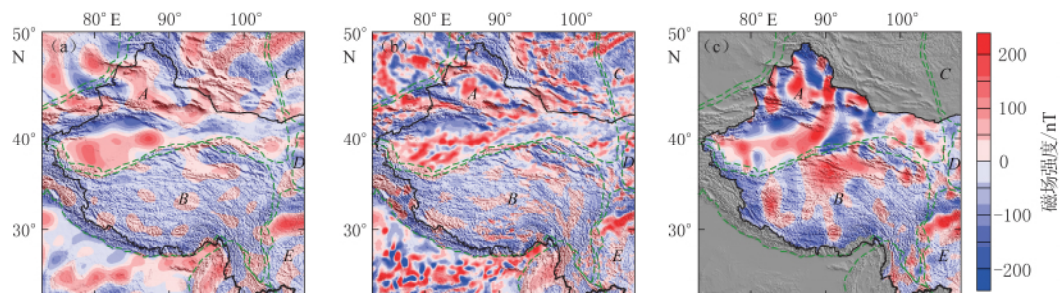


图 5 由 MF6(a), EMM2010(b)和 CGRF2010(c)模型得到的中国大陆西部地区岩石圈磁场垂直分量 ΔZ

Fig. 5 The vertical component ΔZ of lithospheric magnetic field of western Chinese mainland obtained by the models MF6 (a), EMM2010 (b) and CGRF2010 (c)

46.4°N)和 207 nT(85.5°E, 45.2°N). EMM2010 模型相比于 MF6 模型的一个显著特征表现为: 在准噶尔盆地中部, 存在一条贯穿东西、略向南凸出的狭窄负磁异常带, 强度约为 -110 nT. 该特征与赵俊猛等(2008)提供的航磁异常图相符合.

4) 塔里木盆地中南部正异常. 塔里木盆地在 40°N 以南为正异常区, 该区域范围与盆地边缘基本吻合. 由 MF6 和 EMM2010 模型得到的该区域岩石圈磁场最大强度分别为 171 nT(87.3°E, 39.9°N)和 389 nT(82.4°E, 39.6°N). EMM2010 模型得到的岩石圈磁场在塔里木盆地南部可见一条东西向延展的狭窄负磁异常带, 几乎贯穿了整个盆地, 但其异常强度并不大, 约为 -20—-30 nT. 该结果与杨文采等(2012)的结论一致.

根据地磁场球谐理论, EMM2010 模型所描述的岩石圈磁场比 MF6 模型包含了更多的短波成分, 表明 EMM2010 模型所显示的小尺度异常与浅表的磁化率分布有关. CGRF2010 模型 ΔZ 分量与全球模型在该地区表现出显著的不同, 具体表现为:

1) 准噶尔盆地核心区正异常. 准噶尔盆地的岩石圈磁场分布较为不规则, 与地表构造的关系似乎并不明确, 其最大正异常值为 259 nT(86.4°E, 45.7°N).

2) 南北天山及塔里木盆地北部以负异常为主. 最大负异常为 -228 nT(83.6°E, 41.8°N), 其延展优势方向为东西向, 在东缘被一弧形正异常斩断, 而在北部似乎向北延伸出两条南北向负异常带.

3) 塔里木盆地中南部正异常. 其分布范围比全球模型略向北收拢, 最大正异常为 234 nT(88.8°E, 40.4°N). 虽然该区域几个核心位置的磁异常正负性并未见大面积反转, 但其异常区分布范围和形态均明显有别于全球模型. 尤其在北部地区, 全球模型异常条带基本沿东西向延展, 而 CGRF2010 模型似乎以南北向条带居多.

由于 CGRF2010 模型测点仅分布于境内, 阿尔泰山绝大部分地区由于缺乏磁场观测资料, 故在此不作讨论.

3.2 青藏岩石圈地块

青藏岩石圈地块包括整个青藏高原, 其北部康西瓦断裂带—阿尔金断裂带—祁连北缘断裂带与西域岩石圈地块相邻, 南部喜马拉雅主边界断裂带与印巴岩石圈地块相隔, 东部龙门山造山带与华南岩石圈地块相接. 各模型计算得到的青藏岩石圈地块 ΔZ 分量分布如图 5 所示. 全球模型 ΔZ 分量在青藏岩石圈地块的分布特征康国发等(2011)曾作过详细讨论, 在此简要说明以下两点:

1) 在 MF6 模型和 EMM2010 模型磁异常图上, 青藏高原地区岩石圈磁场总体表现为低值异常区, 与其周边地区(北部塔里木盆地强正异常区、西南部印度板块团状高值异常区)形成鲜明对比. 骆遥(2013)研究表明, NGDC-720 模型在青藏高原为一巨大资料空白区, 导致其不能反映高原内各地块分界, 并表现出低强度且均匀的负异常特征.

2) 在青藏高原低弱的负磁异常背景下, 柴达木盆地显示出较大范围的微弱正异常. 在 MF6 和 EMM2010 模型岩石圈磁场图上, 该地区磁异常强度不超过 50 nT, 且分布范围仅限于柴达木盆地东部.

CGRF2010 模型 ΔZ 分量与全球模型存在较大差异. 由于可可西里无人区自然条件过于恶劣, 因此缺乏有效的地面观测数据. 除该地区外, 西部地区地磁测点平均密度约为 150 km. 尽管地磁测点的空间分布密度远低于卫星磁测, 但将地面磁测数据用于中国地区地磁场建模能够真实有效地反映地表磁场. 基于地表的磁场观测相比于 350—400 km 高度的卫星观测包含了更多的磁场信息, 尤其是岩石圈磁场(短波长的岩石圈磁场成分会随着高度增加而迅速衰减). 数据源的差异使得 CGRF2010 模型相比于卫星模型得到的岩石圈磁场分布形态及异常强度均存在较大差异. 该模型得到的青藏岩石圈地块磁异常特征为:

1) 青藏高原东北部正异常. 在青藏高原东北部存在一个上千千米尺度的正异常区, 其范围覆盖了整个柴达木盆地且向南突出, 贯穿巴颜喀拉地块中段并延伸到羌塘地块中部. 该异常强度达到 231 nT(37°N, 91°E). 沿着该区域向东、西、南 3 个方向辐射有若干个异常条带, 但强度并不大.

2) 青藏高原南部南北向磁异常带. 与全球模型不同, CGRF2010 模型得到的岩石圈磁场在青藏高原南部存在明显的正负异常分区. 该异常条带优势方向为南北向, 与青藏高原南部已探明的南北向构造走向(薛典军等, 2006)一致. 与此同时, CGRF2010 模型得到的岩石圈磁异常强度普遍比全球模型高, 其最大正异常强度达到 208 nT(82.6°E, 32.7°N), 而最大负异常也达到 -178 nT(80.6°E, 32.3°N).

应指出的是, 由于测点分布稀疏, 监测空区(可可西里地区)磁场模型误差较大. 而在青藏高原南部分布有若干地磁测点, 从而保证了 CGRF2010 模型在该地区可信度较高.

3.3 松辽岩石圈地块

松辽岩石圈地块包括东北东部、松辽平原和大兴安岭地区南部. 该地块以中朝地台北缘断裂带为界与华北岩石圈地块相接; 向西向北可能包括了蒙古东部及俄罗斯外兴安岭以南广大地区; 向东连接锡霍特地区. 卫星磁异常条带走向以 ENE 向为主, 与控制该地区的主要构造走向一致(图 6). 全球模型 ΔZ 分量在该地区的主要分布特征如下:

1) 大兴安岭正异常. MF6 模型岩石圈磁场图上, 从西伯利亚东南部到该区域分布一系列 ENE 向近似平行延伸的蠕虫状正负异常条带. 在中国境内, 沿大兴安岭北段存在一条宽约 500 km 的正异常带, 强度达到 150 nT. 在 45°N 以南靠近阴山—燕山构造带北部地区异常条带转为 NE 向, 并向西延伸且逐渐向阴山—燕山构造带靠拢. EMM2010 模型得到的岩石圈磁场在整体上符合上述特征, 局部强度比 MF6 模型得到的异常强度要大.

2) 松辽盆地正负异常交错分布. 在大兴安岭、小兴安岭及长白山环绕的松辽盆地, MF6 模型岩石圈磁场显示出西北负异常、东南正异常的格局, 异常强度不大. 而 EMM2010 模型磁异常分布十分复杂, 呈碎屑状正负异常交错分布, 意味着该地区岩石圈浅部磁化率分布不均匀程度高. 值得注意的是, 在正负异常错杂分布的大背景下, 在松辽

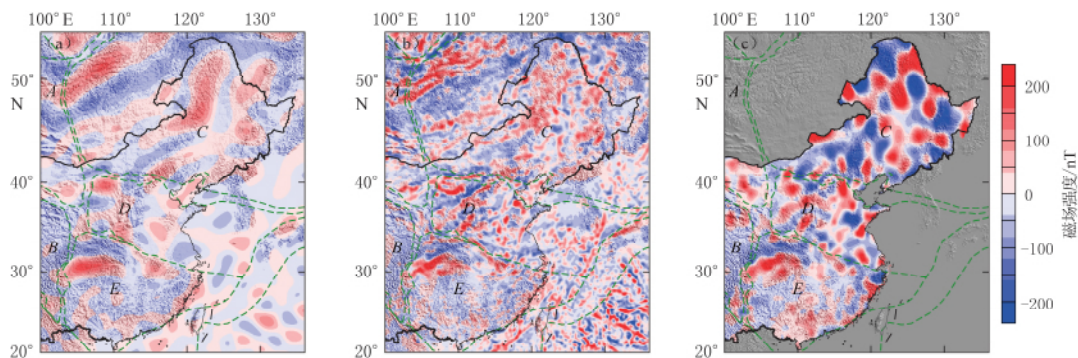


图 6 由 MF6(a), EMM2010(b) 和 CGRF2010(c) 模型得到的中国大陆东部地区岩石圈磁场垂直分量 ΔZ
 Fig. 6 The vertical component ΔZ of lithospheric magnetic field of eastern Chinese mainland
 obtained by the models MF6 (a), EMM2010 (b) and CGRF2010 (c)

盆地东北角, 小兴安岭与长白山交汇处所围的三角形地区存在范围约为 200 km 的正异常区, 该异常区可能与该地区较深的居里面有关(胡旭芝等, 2006)。

3) 长白山低值异常. 在松辽盆地东南部的长白山地区, MF6 模型得到的磁异常强度绝对值在 50 nT 以内, 从东北到西南呈正负异常相间排列. 而 EMM2010 模型得到的岩石圈磁场则以从东北部的三江平原地区延伸的负异常为背景, 在该背景下呈现小尺度的正异常零星分布。

CGRF2010 模型 ΔZ 分量在 42°E 以北地区, 地磁测点空间分布较为均匀, 平均间隔约为 110 km. 该地区岩石圈磁异常分布呈现十分明显的团状不均匀性, 磁异常强度大且区域内变化剧烈, 与同区域的卫星磁异常特征有着显著差别. 具体分布特征为:

1) 大兴安岭串珠状负异常. 在我国境内大兴安岭南段, 串珠状负异常沿北东向分布并向西南方向延伸, 最大强度约为 -340 nT (120°E, 45.5°N), 其两侧伴随有团状正异常, 沿西北方向磁异常变化剧烈; 在大兴安岭西南段, 负异常面积增大、强度减弱, 并逐渐转向东北偏东方向。

2) 松辽盆地正异常. 松辽盆地整体表现为数个正异常团, 北部正异常团强度最大, 超过 500 nT, 且该正异常范围在盆地东北部向长白山北缘突出, 这一细节特征与卫星模型磁异常图是一致的。

3) 长白山负异常. 除北部小区域外, 长白山脉沿线以负异常为主, 强度约为 150 nT。

3.4 华北岩石圈地块

华北岩石圈地块北以中朝地台北缘断裂带为界, 与松辽岩石圈地块相邻; 南以商丹断裂带—磨子潭断裂带—舟山断裂带为界, 与华南岩石圈地块相接; 西界为南北构造带; 向东包括黄海. 在大地构造上主要属于中朝地台范畴. 该区域地壳表层构造呈 NNE 向隆起与拗陷相间排列的构造格局. 全球模型 ΔZ 分量显示华北岩石圈地块磁异常与其东部松辽岩石圈地块存在较为明显差异(图 6). MF6 模型得到的岩石圈磁异常尺度较小, 正负异常形态多呈团状, 条带状不明显; 而 EMM2010 模型得到的岩石圈磁场则可以分辨出较为清晰的 NE 向正负异常条带, 但异常条带并不沿构造边界延展. 具体区域特征如下:

1) 鄂尔多斯 NE 向正负异常条带. 在 MF6 模型得到的岩石圈磁场图上该特征并不明显, 但在 EMM2010 模型得到的岩石圈磁场图上却显示了 4 条清晰的 NE 向正负异常条

带, 其分布方向与构造走向存在一个夹角。

2) 华北细碎的岩石圈磁场。在太行山以西, 相对于鄂尔多斯, MF6 模型得到的磁异常弱且平缓, 焦点异常值约为 70 nT (116.1°E , 34.8°N)。而 EMM2010 模型得到的岩石圈磁场则显示了非常细碎的正负异常细节, 除南部边界附近的狭窄异常带以外, 并未见其它显著的规律性分布, 焦点异常值约为 370 nT (117.8°E , 37.8°N)。

3) 南黄海陆上负异常。在 MF6 模型得到的岩石圈磁场图上, 郯庐断裂带南段(华北东部)与磁异常零值线基本重合。其西侧磁异常为正异常, 东侧南黄海陆地部分为负异常, 最大异常值约为 -75 nT (119.7°E , 32.5°N)。EMM2010 模型在负异常背景下显示了一些细碎的正异常, 似乎存在两条分别为 NE 向和 ENE 向负异常带从陆地向黄海延伸出去。陆上最大负异常值约为 -190 nT (120.4°E , 32°N)。

CGRF2010 模型 ΔZ 分量在该地区测点准均匀分布, 点间距为 $70\text{—}100 \text{ km}$ 。从该模型得到的岩石圈磁场图来看, 具有以下几个显著的区域特征:

1) 鄂尔多斯 NE 向磁异常带。该地区 CGRF2010 模型与 EMM2010 模型得到的岩石圈磁场类似。所不同的是, CGRF2010 模型得到的该地区正异常条带宽于负异常条带, 且 NE 向分布的正异常带有跨过构造边界向东延伸的趋势。该地区最大异常值约为 300 nT (111.2°E , 38.2°N)。

2) 华北团状磁异常。该地区 CGRF2010 模型得到的岩石圈磁场分布与卫星模型差异很大。泰山附近负异常显著, 异常值达到 -347 nT (117°E , 36.2°N); 北京及河北地区主要为正异常, 最大异常值为 373 nT (116.2°E , 39.4°N); 南部未见明显沿构造边界分布的磁异常条带。

3) 南黄海陆上团状磁异常。该地区范围不大, 但 CGRF2010 模型显示的岩石圈磁场分布却存在异常强度大、形态复杂的特点。可能是由于海上无实测数据, 导致海陆交界地区模型结果准确性降低。该模型与卫星模型得到的岩石圈磁场的显著区别在于该地区存在明显的正异常团, 例如: 南京附近 200 km 尺度的正异常团, 其最大强度为 265 nT (118.8°E , 31.8°N); 山东省境内郯庐断裂带东侧的正异常团。

3.5 华南岩石圈地块

华南岩石圈地块北以商丹断裂带—磨子潭断裂带—舟山断裂带为界, 与华北岩石圈地块相隔; 南以滨海断裂带为界, 与南海岩石圈地块相邻; 西抵川滇南北向构造带; 向东包括东海和琉球岛弧隆起带。全球模型 ΔZ 分量沿北部边界可见狭窄的磁异常条带, 边界两侧磁异常特征迥异。与华北岩石圈地块的中小尺度团状磁异常不同, 华南岩石圈地块除四川盆地外, 其余地区磁异常强度低, 变化平缓, 且以负异常为主(图 6)。具体区域特征为:

1) 四川盆地正异常区及其北部负异常区。四川盆地及其北部地区在中国地区卫星磁异常图上十分显眼, 其原因在于该地区出现一对尺度约为 $800 \text{ km} \times 300 \text{ km}$ 、近东西向延展的正负异常对。其中四川盆地以强正异常为主, 由 MF6 模型得到的岩石圈磁场最大磁异常为 189 nT , 而 EMM2010 模型得到的最大磁异常达到 457 nT (106.4°E , 30.8°N); 四川盆地北部岩石圈磁场强度向北迅速衰减, 零值线沿盆地北缘展布; 继续向北沿大巴山脉以及汉中盆地存在一个与该正异常区尺度相当的负磁异常区, 由 MF6 和 EMM2010 模型得到的岩石圈磁场强度最大分别为 -90 nT (107°E , 32.7°N) 和 -205 nT (107.4°E , 32.6°N)。

2) 华南岩石圈地块其它区域岩石圈磁场低弱平缓。由 MF6 模型得到的岩石圈磁场显

示华南腹地为广泛宽缓的负值区,而一条低值正异常带沿华南地块北部边界、东海、台湾海峡及西部边界绵延不断将整个负异常区包围;EMM2010 模型与 MF6 模型得到的岩石圈磁场的区别在于,在大的区域异常背景之下,有大量细小的正负异常碎片散落各处.除西北部的四川盆地、大巴山地区以外,华南岩石圈地块其它区域显示了低弱的岩石圈磁场值,绝大部分地区 MF6 模型得到的岩石圈磁场强度在 50 nT 以下,EMM2010 模型得到的岩石圈磁场强度在 100 nT 以下.

CGRF2010 模型 ΔZ 分量在四川盆地为正异常区,其北部为负磁异常区,该形态特征与 MF6 及 EMM2010 模型得到的岩石圈磁场相近.但北部负异常区南北略微收紧呈带状,最大磁异常为 -367 nT(103.6°E, 31.8°N);南部正异常区几乎完整地覆盖了整个四川盆地,磁场强度为 395 nT(106°E, 30.8°N).在华夏复合陆内造山区(张国伟等,2013)则主要表现为正异常,除浙江丽水附近的强正异常团最大值达到 567 nT(120.1°E, 28°N)以外,其余地区均在 150 nT 以下.尤其值得指出的是:在东南沿海火成岩带为正异常;在正异常背景下有小范围负异常区,如杭州南部及武夷山沿线;江南造山带为断续低弱的负异常区;扬子地块南部以负异常为主,强度在 -110 nT 以下.

4 讨论与结论

本文通过对 MF6 模型、EMM2010 模型及 CGRF2010 模型分别计算的中国大陆地区岩石圈磁场 ΔZ 分量分布特征进行分析,得到以下结论:

1) 3 个模型 ΔZ 分量在准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地及四川盆地等地区均为正值,而在天山、大巴山等地区则为负值.异常强度 CGRF2010 模型最大,EMM2010 次之,MF6 最小,说明利用不同数据源计算得到的模型所包含的岩石圈磁场成分不尽相同.CGRF2010 模型主要使用地面磁测数据,最大限度地保留了地表以下岩石所产生的磁场信息;EMM2010 模型对航空磁场数据的应用以及高达 720 阶的截断阶数,使得其相对于 MF6 模型包含更多的磁场信息.3 种模型得到的岩石圈磁场异常区范围大致吻合,仅细节略有不同.岩石圈磁场 ΔZ 分量分布在华北岩石圈地块与华南岩石圈地块吻合程度高;在青藏高原南部、西域岩石圈地块北部及松辽岩石圈地块,全球模型与 CGRF2010 模型存在显著差别.

2) MF6 模型能够显示出大尺度构造单元所反映的岩石圈磁场轮廓,如塔里木盆地和四川盆地正异常,大兴安岭—阴山、南北天山和大巴山负异常等.由于该模型是由卫星数据建立,因此利用该模型能够计算得到中国及周边地区的岩石圈磁场强度,对于研究跨国界的构造及地震活动性具有重要意义.但由于卫星飞行高度为地表以上数百千米,不能对地磁场的短波成分形成有效观测,因此仅仅基于卫星数据建立的 MF6 模型其分辨率较低,不能满足对中小尺度构造的研究.

3) EMM2010 模型显示的磁异常背景与 MF6 模型相似,但在细节上却不尽相同.例如塔里木盆地和四川盆地正异常,南北天山、大巴山和大兴安岭—阴山负异常等大尺度异常区,在主体异常背景之下可见小范围细碎的相反性质的磁异常分布,体现了地表浅层磁性物质分布的复杂性.尤其在松辽岩石圈地块和华北岩石圈地块,该模型岩石圈磁场细节特征显著,可能代表着该地区浅表磁性物质分布相当复杂.

由于整合了全球的地面、航空、海洋及卫星磁测数据并将球谐函数的截断阶数提高到

720 阶, 故 EMM2010 模型能够显示全球范围的岩石圈磁场细节, 高达 56 km 的空间分辨率主要依托稀疏的地面台站观测数据及航空磁测数据。但在青藏高原等航空磁测空区 EMM2010 模型的准确性还有待进一步论证。

4) CGRF2010 模型得到的岩石圈磁场与前两者有较大区别, 尤其在中国西部地区更为明显。青藏高原地区存在较强磁异常区, 例如柴达木盆地, 以及在青藏高原南部存在若干个南北向展布的正异常区, 与已探明的南北向构造特征相符。而在西域岩石圈地块北部地区, CGRF2010 模型地磁异常则表现出强度强、梯度大的特点, 且有南北向展布的趋势。东部地区由于地磁测点分布密集, 保证了该模型的分辨率及可靠性。相邻岩石圈地块显示出了独特的磁异常特征: 松辽岩石圈地块的团状强磁异常, 华北岩石圈地块细碎的正负异常, 华南岩石圈地块一对大规模磁异常区以及周边相对低弱而均匀的磁异常区。

CGRF2010 模型是基于中国大陆地面磁场观测数据建立的, 能在最大程度上准确真实地反映了中国大陆地区地磁场的空间分布特征, 尤其是地壳浅层磁性物质产生的磁场成分保存得比较完整。但由于受地理环境及自然条件制约, 地面磁场观测很难覆盖所有地区, 如可可西里无人区、国境线以外等地区。由于缺乏有效的数据控制, 地磁场模型在边界附近可能存在畸变, 且不能拟合境外的岩石圈磁场。在研究跨国界的地震活动和大地构造时, 需要能够描述边境附近岩石圈磁场的地磁模型。为满足上述要求, 值得探索的方法一是补充监测空白区的地面地磁测点; 二是整合多源数据, 如卫星磁测数据与地面磁测数据的整合, 能够从一定程度上增强对地面监测空区及国界周边地区的监测能力。

参 考 文 献

- 安振昌, 徐元芳. 1981. 局部地区高空磁场的计算方法[J]. 空间科学学报, 1(1): 68–73.
- An Z C, Xu Y F. 1981. Methods of computation of geomagnetic field at greater altitude in a local region[J]. *Chinese Journal of Space Sciences*, 1(1): 68–73 (in Chinese).
- 车自成, 罗金海, 刘良. 2002. 中国及其邻区区域大地构造学[M]. 北京: 科学出版社: 5–6.
- Che Z C, Luo J H, Liu L. 2002. *Geotectonics of China and Its Adjacent Areas*[M]. Beijing: Science Press: 5–6 (in Chinese).
- 陈斌. 2013. 区域地磁场时空变化特征及模型研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 52–60.
- Chen B. 2013. *Regional Geomagnetic Field Temporal-Spatial Variation Characteristics and Models Study*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 52–60 (in Chinese).
- 丁鉴海, 卢振业, 余素荣. 2011. 地震地磁学概论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社: 226–370.
- Ding J H, Lu Z Y, Yu S R. 2011. *A Brief Treatise on Seismomagnetism*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press: 226–370 (in Chinese).
- 管志宁. 1997. 我国磁法勘探的研究与进展[J]. 地球物理学报, 40(增刊): 299–307.
- Guan Z N. 1997. Researches and progresses of magnetic prospecting in China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 40(Suppl): 299–307 (in Chinese).
- 胡旭芝, 徐鸣洁, 谢晓安, 王良书, 张庆龙, 刘绍文, 解国爱, 冯昌阁. 2006. 中国东北地区航磁特征及居里面分析[J]. 地球物理学报, 49(6): 1674–1681.
- Hu X Z, Xu M J, Xie X A, Wang L S, Zhang Q L, Liu S W, Xie G A, Feng C G. 2006. A characteristic analysis of aeromagnetic anomalies and Curie point isotherms in northeast China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(6): 1674–1681 (in Chinese).
- 康国发, 高国明, 白春华, 韶丹, 冯丽丽. 2011. 青藏高原及邻区的地壳磁异常特征与区域构造[J]. 中国科学: 地球科学, 41(11): 1577–1585.

- Kang G F, Gao G M, Bai C H, Shao D, Feng L L. 2012. Characteristics of the crustal magnetic anomaly and regional tectonics in the Qinghai-Tibet Plateau and the adjacent areas[J]. *Science China: Earth Sciences*, **55**(6): 1028–1036.
- 李才明, 李军. 2013. 重磁勘探原理与方法[M]. 北京: 科学出版社: 256–285.
- Li C M, Li J. 2013. *The Principle and Method of Gravity and Magnetic Exploration*[M]. Beijing: Science Press: 256–285 (in Chinese).
- 李廷栋. 2006. 中国岩石圈构造单元[J]. *中国地质*, **33**(4): 700–710.
- Li T D. 2006. Lithospheric tectonic units of China[J]. *Geology in China*, **33**(4): 700–710 (in Chinese).
- 骆遥. 2013. 青藏高原在岩石圈磁场模型中的巨大空白: 同“青藏高原及邻区的地壳磁异常特征与区域构造”作者商榷[J]. *中国科学: 地球科学*, **43**(8): 1376–1378.
- Luo Y. 2013. A huge gap of the lithospheric magnetic field model in the Qinghai-Tibet Plateau: Comment on “characteristics of the crustal magnetic anomaly and regional tectonics in the Qinghai-Tibet Plateau and the adjacent areas”[J]. *Science China: Earth Sciences*, **56**(9): 1623–1626.
- 吴招才, 高金耀, 李家彪, 张涛, 沈中延, 杨春国. 2011. 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*, **54**(12): 3292–3302.
- Wu Z C, Gao J Y, Li J B, Zhang T, Shen Z Y, Yang C G. 2011. The characteristics of magnetic anomalies: Implications for Pre-Cenozoic tectonics of the northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(12): 3292–3302 (in Chinese).
- 熊光楚. 1994. 金属矿区磁法勘探的进展与展望[J]. *地球物理学报*, **37**(1): 437–443.
- Xiong G C. 1994. Development of magnetic exploration searching for metallic ore deposits in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **37**(1): 437–443 (in Chinese).
- 薛典军, 姜枚, 吴良士, 李庆庆, 汪兴旺. 2006. 青藏高原区域重磁异常的东西向分区及其构造地质特征[J]. *中国地质*, **33**(4): 912–919.
- Xue D J, Jiang M, Wu L S, Li Q Q, Wang X W. 2006. East-west division of regional gravity and magnetic anomalies on the Qinghai-Tibet Plateau and its tectonic features[J]. *Geology in China*, **33**(4): 912–919 (in Chinese).
- 杨文采, 王家林, 钟慧智, 陈冰. 2012. 塔里木盆地航磁场分析与磁源体结构[J]. *地球物理学报*, **55**(4): 1278–1287.
- Yang W C, Wang J L, Zhong H Z, Chen B. 2012. Analysis of regional magnetic field and source structure in Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(4): 1278–1287 (in Chinese).
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 李三忠, 董云鹏, 刘少峰, 何登发, 程顺有, 鲁如魁, 姚安平. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, **43**(10): 1553–1582.
- Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, Li S Z, Dong Y P, Liu S F, He D F, Cheng S Y, Lu R K, Yao A P. 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China: Earth Sciences*, **56**(11): 1804–1828.
- 赵俊猛, 卢造勋, 姚长利, 黎益仕, 刘占坡. 2008. 准噶尔盆地基底断裂的重磁学研究[J]. *地震地质*, **30**(1): 132–143.
- Zhao J M, Lu Z X, Yao C L, Li Y S, Liu Z P. 2008. Crystalline basement faults in Junggar Basin determined by gravity and geomagnetism[J]. *Seismology and Geology*, **30**(1): 132–143 (in Chinese).
- Harder R L, Desmarais R N. 1972. Interpolation using surface splines[J]. *J Aircr*, **9**(2): 189–191.
- Maus S, Yin F, Lühr H, Manoj C, Rother M, Rauberg J, Michaelis I, Stolle C, Müller R D. 2008. Resolution of direction of oceanic magnetic lineations by the sixth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite magnetic measurements[J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **9**(7): Q07021. doi:10.1029/2008GC001949.
- Maus S. 2010. An ellipsoidal harmonic representation of Earth's lithospheric magnetic field to degree and order 720[J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **11**(6): Q06015. doi:10.1029/2010GC003026.
- Maus S, Manoj C, Rauberg J, Michaelis I, Lühr H. 2010. NOAA/NGDC candidate models for the 11th generation International Geomagnetic Reference Field and the concurrent release of the 6th generation Pomme magnetic model[J]. *Earth Planets Space*, **62**(10): 729–735.