

陕西地壳磁异常特征研究*

韶 丹, 贾 宁, 孙 哲

(陕西省地震局, 陕西 西安 710068)

摘要: 利用 NGDC-720-V3 模型, 计算了陕西地区地壳磁异常不同分量网点值, 通过计算数据分析了该地区地壳磁异常基本形态及分区特征, 结果表明: (1) 陕西地壳磁异常各分量强度较弱, 分布形态以宽缓的条带为主。(2) 陕西北部三条正负相间的磁异常条带可能与基底大断裂有关, 反映了块体内部早期不同基底的拼合。(3) 陕西南部地壳磁异常总体表现为近东西向大面积的负异常, 东部和西部负异常强度有所不同, 可能与地壳内物性差异有关。

关键词: 地磁模型; 地壳磁异常; 陕西地区

中图分类号: P318

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)03-0396-05

0 引言

地壳磁异常也称岩石圈磁异常, 其主要产生于地壳和上地幔岩石的磁化率, 由于不同岩性的岩石有各自的磁化率特征, 复杂的构造运动也会导致区域差异, 所以地壳磁异常携带着丰富的地壳深部构造信息(徐文耀, 2009)。陕西省地处中国中部, 由中朝准地台、扬子地台和秦岭褶皱带这3个一级构造单元构成, 其中秦岭被认为是中国东西部地质转换和南北部地质衔接的枢纽地带, 地质构造尤为复杂。陕西北部为稳定的鄂尔多斯地块, 其周围断裂发育, 关中地区位处有名的渭河盆地, 历史上发生过多地地震(石军, 2008; 韩恒悦等, 2002)。因此研究陕西地区地壳磁场的分布特点、探索地壳磁异常与岩石圈区域构造的对应关系, 对认识该地区地壳构造及活动演化、探讨地震孕育机理有着重要意义。

很多学者利用航空磁测或者卫星磁测等资料对中国不同地区的磁场特征做了大量分析研究(安振昌等, 1992; 张昌达, 2005; 王月华, 1998), 然而单一资料对于分析区域磁场特征存在很大的局限性(康国发等, 2011), 所以将各种磁测资料融合在一起建立磁场模型用以研究地球磁场受到越来越多学者的关注。本文应用高阶磁场

模型探讨陕西地区地壳磁场强度、形态分布等特征, 分析其构造意义。

1 计算资料和方法

基于高斯球谐理论, 地磁位可表达为

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

式中, λ 和 θ 分别为地理经度和地理余纬, a 取地球平均半径 6 371.2 km, $p_n^m(\cos\theta)$ 是 n 阶 m 次的归一化缔合勒让德函数, g_n^m 和 h_n^m 是地磁位的球谐系数。美国国家地球物理数据中心(NGDC)综合了海洋磁测、航空磁测和卫星磁测的大量数据, 研制了 NGDC-720 全球地磁模型, 计算了该地磁模型的 720 阶系数, 其对应的空间波长为 2 500 ~ 56 km, 模型的分辨率为 15', 可用以计算地球表面与地球表面以上任意一点的地磁场矢量(徐文耀等, 2008)。其中, $n=1 \sim 13$ 阶为地核磁场, $n=14 \sim 15$ 阶为地核磁场和岩石圈磁场的过度, $n=16 \sim 720$ 阶为岩石圈磁异常(康国发等, 2010)。与其它地磁模型相比, 它所包含的地磁场的信息更全面, 在刻画异常场方面更准确, 具有较高的精度和空间分辨率, 广泛应用于科学研究与诸多实

* 收稿日期: 2014-05-27.

基金项目: 陕西省地震局启航与创新基金(201311)资助.

用领域。

在球坐标系下对(1)式求导,可得到地磁场北向分量 X 、东向分量 Y 和垂直分量 Z ,取球谐阶次 $n \geq 16$,可直接计算地壳磁场北向分量 ΔX 、东向分量 ΔY 和垂直分量 ΔZ ,其表达式为

$$\Delta X = \sum_{n=16}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \left[g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda) \right] \frac{\partial p_n^m(\cos\theta)}{\partial \theta}, \quad (2)$$

$$\Delta Y = \sum_{n=16}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \frac{m}{\sin\theta} \left[g_n^m \cos(m\lambda) - h_n^m \sin(m\lambda) \right] p_n^m(\cos\theta), \quad (3)$$

$$\Delta Z = \sum_{n=16}^N \sum_{m=0}^n (n+1) \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \left[g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda) \right] p_n^m(\cos\theta). \quad (4)$$

由地磁场各个分量之间的数学关系式: $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$, $F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$, $D = \tan^{-1}(Y/X)$, $I = \tan^{-1}(Z/H)$,可间接计算出地壳磁异常各分量。从各个分量的总磁场中减去地核场,即可得到地壳磁异常的水平分量 ΔH 、总强度 ΔF 、磁偏角 ΔD 和磁倾角 ΔI 。安振昌等(1991)指出,各分量对径向方向求导,可得到地磁场在径向的变化情况,即垂直梯度。

本文应用第三版 NGDC - 720 - V3 模型,取 $n = 16 \sim 720$ 阶球谐系数,计算了陕西地区地壳磁异常不同分量网点值,研究区域为($31^\circ \sim 40^\circ \text{N}$, $105^\circ \sim 112^\circ \text{E}$),网格点间隔为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。应用这些数据分析了该地区地壳磁异常特征,并重点分析了 F 分量的磁异常特征及其垂直梯度,同时对 F 分量进行化极处理,讨论磁异常与大地构造的对应关系。

2 陕西地区磁异常特征

2.1 地壳磁异常基本特征

图1为陕西地区地表地壳磁异常的北向分量 X 、东向分量 Y 、垂直分量 Z 和总强度 F 。从图1a中可以看出,陕西地区地壳磁异常 X 分量强度较弱,大多数地区都在 $\pm 150 \text{ nT}$ 以内,并且变化平缓。观察其整体形态发现,该分量在全区成片状、条带状分布;陕北地区以正负相间的北北东向磁异常条带为主;而在关中和陕南地区,磁异常形

态则呈东西向展布。对比图1a、b可以发现,陕西地区地壳磁异常东西分量强度略小于北向分量,大多数地区地壳磁异常都没有超过 $\pm 100 \text{ nT}$,正负异常变化都较为平缓。值得注意的是,在图1b中,正异常所包围范围扩大,并且与北向分量明显不同的是,东向分量磁异常焦点位置发生变化;从其形态分布来看,整个研究区磁异常从北到南呈现正负相间的北北东向条带状展布。从图1c可以看出,陕西地区地表磁异常垂直分量强度与北向分量相当,其值略大于东向分量。进一步观察可以看出,正负异常所围范围大致相同,二者边界清晰,成片出现的条带状异常将该区域分为若干区域:秦岭以北地区自北向南为3条北北东向的负、正、负磁异常条带,从秦岭向南则转变为两条东西向的正、负磁异常条带。比较图1c、d能够得出,陕西地区地壳磁异常总强度无论在形态、展布还是焦点位置都与垂直分量基本相似,二者仅异常强度有细微差别。

2.2 地壳磁异常分区特征

由于不同纬度区域磁倾角不同,地质体的磁化方向就会随着磁倾角变化也发生变化。对于同一个磁性体,在不同的磁化方向下产生的磁异常也不同,这样就增加了磁异常解释的复杂性。对磁异常进行化极,不仅可以使其解释变得容易,而且可以提高磁异常解释的准确程度。用于建立模型的实测数据均属于斜磁化数据,所以由模型计算的各个分量,都属于斜磁化的结果,直接解释比较困难。经过化极处理,能够把斜磁化的磁异常转换为垂直磁化,即化到地磁极,其实质就是把位于地磁极以外的磁性体产生的磁异常,换算为假定磁性体位于地磁极处所引起的磁异常。这样就可以消除由磁化场的倾角引起的磁异常的不对称性,并且垂直磁化条件下的磁异常总强度或垂直分量与地质体的联系更为简单而密切。

在以往的研究中,当研究区域倾角变化范围不大时,一般取固定倾角进行化极(Li *et al.*, 2009),即以研究区中心位置的倾角作为固定倾角进行化极。然而在中低纬度,这种方法的化极结果却不够精确(Arkani - Hamed, 2007)。本文采用变倾角的微分化极方法(Cooper, Cowan, 2005)对陕西地区地表磁异常总强度进行了化极处理。该法应用泰勒展开计算不同网点处的化极结果如5式所示。

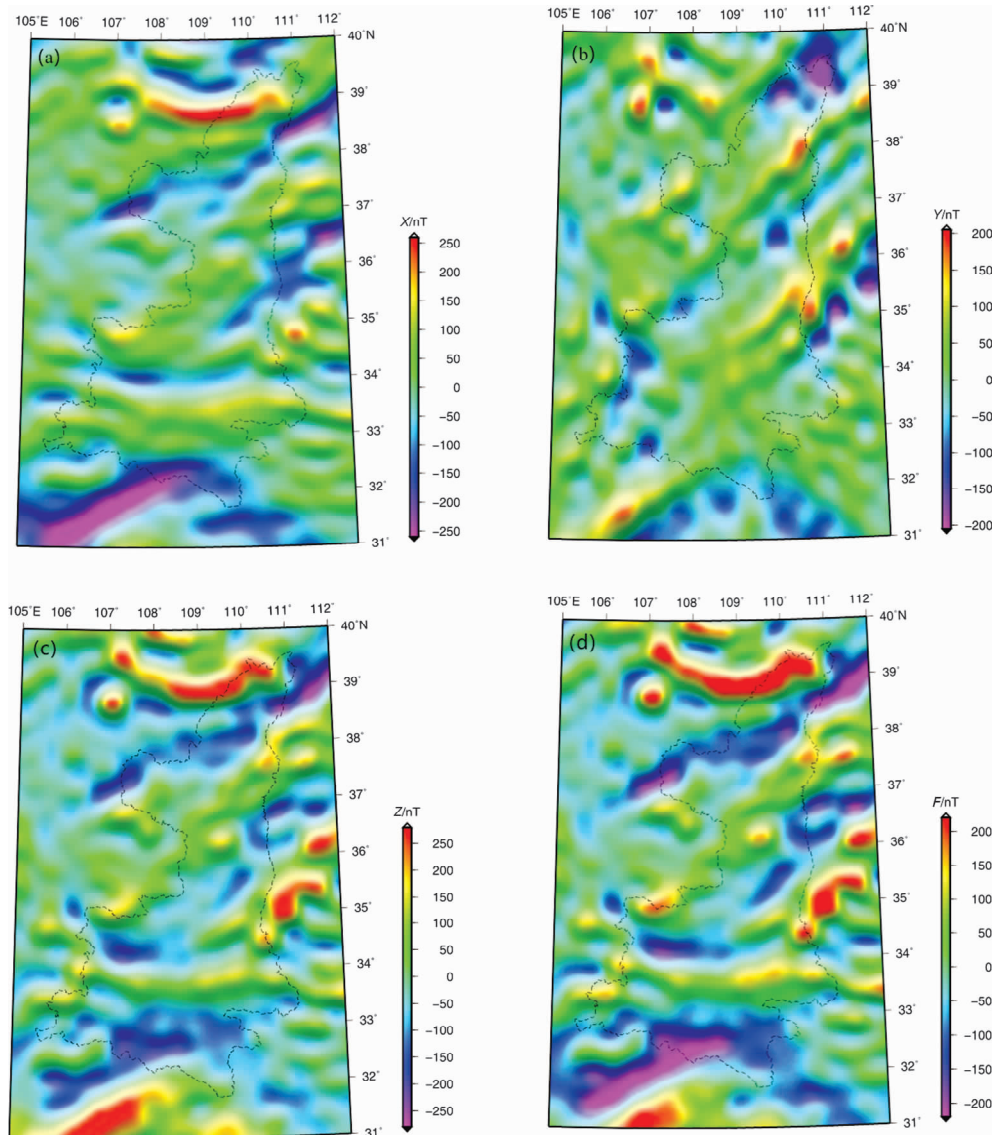


图1 陕西地区北向分量 X (a)、东向分量 Y (b)、垂直分量 Z (c)、总强度 F (d) 地壳磁异常

Fig. 1 Crustal magnetic anomaly of north component X (a), east component Y (b), vertical component Z (c) and total intensity F (d) in Shaanxi area

$$\begin{aligned} \text{RTP}_{\text{var}} = & \text{RTP}_{\text{mean}} + \Delta \text{inc} \frac{\partial \text{RTP}}{\partial \text{inc}} + 0.5 \Delta \text{inc}^2 \frac{\partial^2 \text{RTP}}{\partial \text{inc}^2} \\ & + \Delta \text{dec} \frac{\partial \text{RTP}}{\partial \text{dec}} + 0.5 \Delta \text{dec}^2 \frac{\partial^2 \text{RTP}}{\partial \text{dec}^2} + \dots \quad (5) \end{aligned}$$

其中, RTP_{mean} 是应用研究区域中心倾角和偏角进行化极所得值, Δinc 、 Δdec 分别是区域中心点倾角、偏角与其它各个网格点值之差。由于偏角对磁异常影响不大, 本文仅应用倾角进行化极。各个网格点的倾角值来自模型计算结果, 化极效果如图 2a 所示。

对比化极前 (图 1d) 和化极后 (图 2a) 的磁异常图可以看出: (1) 化极后磁异常的展布、磁

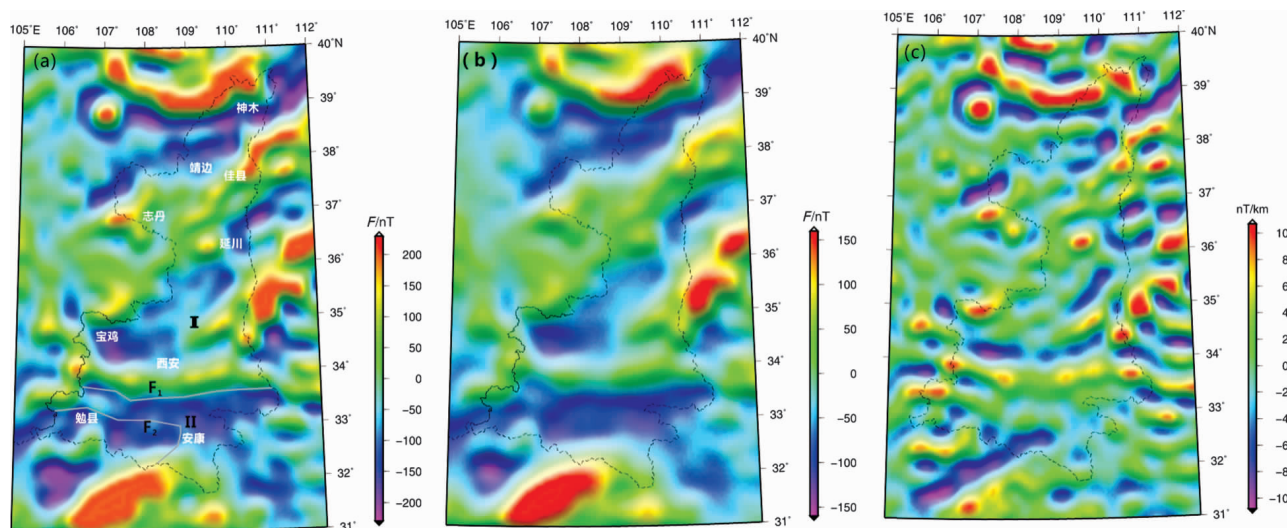
异常带的走向、异常的焦点位置及异常值没有发生太大变化; (2) 主要的缝合边界, 如商丹缝合线和勉略缝合线在化极磁异常图上表现的更加清晰, 并很好地对应着磁异常边界和地块边界; (3) 化极磁异常图中异常的轮廓更加清晰并且具有更好的对称性。此外, 以秦岭为分界线, 陕西南北两部分磁异常展布明显不同, 南北两部分分别属于鄂尔多斯地块和秦岭褶皱带这两个地质单元, 并且全区自北向南磁异常分布呈现规则的条带, 正负磁异常边界清晰。由此我们将研究全区分为 I 区 (鄂尔多斯磁异常区) 和 II 区 (秦岭磁异常区), 下面分别讨论这两个区域的特征。

I 区（鄂尔多斯磁异常区）内部以宽缓的磁异常条带为主，大致由 3 个异常条带组成：靖边—神木负磁异常带、志丹—佳县正磁异常带和宝鸡—延川负磁异常带，这 3 个条带正负相间斜穿陕西北部地区。其中志丹—佳县正磁异常带比另外两个负异常带更宽，而其余两个负异常带则相当，所不同的是，靖边—府谷磁异常带具有较大的梯度，而宝鸡—延川磁异常带梯度变化较为缓慢，并且后者在强度上较前者弱。从以上磁异常条带的分布可以推断，虽然属于鄂尔多斯地块的陕西北部地区具有良好的整体性，但是其内部结晶基底仍然存在差异。同时，该区南部边界与商丹缝合带吻合，更进一步说明了不同板块基底性质的差异。

II 区（秦岭磁异常区）以东西向正异常条带为界，区内除北部边界东西向正异常条带外，常以

负值为主，呈近东西向条带分布，由东向西负磁异常逐渐加强。在勉县附近出现小范围串珠状正异常，周围为较强的负异常，并且向东逐步延伸至安康附近后淹没在负异常中，这说明地壳内部存在东西向物性差异；这些串珠状正异常正好与勉略缝合带相吻合。

图 2b 为陕西地区磁异常总强度 F 在 15 km 处化极磁异常。当高度上升后，由浅层地质体产生的高频磁异常大量衰减，深部异常信息突出，磁异常强度减弱。但无论是 I 区还是 II 区，磁异常分布的基本形态及展布并没有发生变化，说明研究区磁异常分布主要受深层地质体控制。图 2c 为陕西地区地表磁异常总强度 F 垂直梯度，I 区和 II 区内磁异常垂直梯度分布与磁异常分布格局、焦点位置基本相同，梯度值普遍较小，所显示的构造分区更加明显。



I 区：鄂尔多斯磁异常区；II 区：秦岭磁异常区； F_1 ：商丹缝合线； F_2 ：勉略缝合线

图 2 陕西地区地表 F 分量化极磁异常 (a)、 F 分量 15 km 化极磁异常 (b) 及地表磁异常垂直梯度 (c)
Fig. 2 Reduction-to-top of crustal magnetic anomaly of F component (a), reduction-to-top of crustal magnetic anomaly of F component at 15 km (b) and vertical gradient of crustal magnetic anomaly (c) in Shaanxi area

3 结果与讨论

基于 NGDC - 720 - V3 模型，通过计算磁异常各分量强度，分析其分布特征可知：

陕西全区磁异常各分量强度较弱，分布形态均以宽缓的条带为主。陕西北部地区虽属于具有整体刚性的鄂尔多斯块体，但在其内部也存在物性差异。鄂尔多斯磁异常区内 3 条正负相间的磁异

常条带可能与基底大断裂有关，反映了鄂尔多斯块体内部早期不同基底的拼合。秦岭造山带总体表现为近东西向大面积的负异常，东部和西部负异常强度有所不同，可能与地壳内物性差异有关。

参考文献：

- 安振昌, 马石庄, 谭海东, 等. 1992. 中国及邻区卫星磁异常的球冠谱和分析[J]. 地球物理学报, 35(增刊): 188 - 197.
- 安振昌, 王月华, 徐元芳. 1991. 中国及邻近地区地磁场垂直梯度的计算与研究[J]. 空间科学学报, 11: 4 - 23.

- 韩恒悦,张逸,袁志祥. 2002. 渭河断陷盆地带的形成演化及断块运动[J]. 地震研究, 25(4): 362 – 368.
- 康国发,高国明,白春华,等. 2010. 中国及邻近地区 CHAMP 卫星磁异常的分布特征[J]. 地球物理学报, 53(4): 895 – 903.
- 康国发,高国明,白春华,等. 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, 41(11): 1577 – 1585.
- 石军. 2008. 汶川 8.0 级地震前后陕西地震活动的变化[J]. 灾害学, 23(增刊): 107 – 110.
- 王月华. 1998. 青藏高原地区地磁场研究[J]. 地球物理学进展, 13(4): 45 – 52.
- 徐文耀,白春华,康国发. 2008. 地壳磁异常的全球模型[J]. 地球物理学进展, 23(3): 64 – 651.
- 徐文耀. 2009. 地球电磁现象物理学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 216 – 243.
- 张昌达. 2005. 中国大陆和南海卫星磁异常的初步解释[J]. 地质科技情报, 24(3): 99 – 103.
- Cooper G. R. J., Cowan D. R. . 2005. Differential Reduction to the Pole [J]. Computers & Geosciences, 72(1): 1989 – 999.
- Arkani – Hamed J. . 2007. Differential Reduction to the Pole: Revisited [J]. GEOPHYSICS, 72(1): 13 – 20.
- LI C. F., Cheng B., Zhou Z. Y. . 2009. Deep Crustal Structures of Eastern China and Adjacent Seas Revealed by Magnetic Data [J]. Sci. China Ser. D-Earth Sci., 52(7): 984 – 993.

Research on Crustal Magnetic Anomaly Characteristic of Shaanxi Province

SHAO Dan, JIA Ning, SUN Zhe

(Earthquake Administration of Shaanxi Province, Xian 710068, Shaanxi, China)

Abstract

Using NGDC – 720 – V3 model, we calculated the crustal magnetic anomaly of different component in Shaanxi Province, and analyzed the basic pattern and sub-division characteristics of crustal magnetic anomalies in the study area through data calculation. The analysis result shows that: (1) The strength of crustal magnetic anomalies of each component was weak in Shaanxi, and the distribution pattern of it appeared broad strips with a small gradient. (2) Three magnetic anomaly belt with positive and negative may be associated with basement faults in northern Shaanxi, which reflected the spliced of the different base blocks in internal block in the early period. (3) In southern Shaanxi, the overall pattern of crustal magnetic anomalies showed the negative anomaly in east-west trend in large areas, the intensity of negative anomaly was different between the east and west of Shaanxi, which may be associated with the physical differences in the crust.

Key words: magnetic model; crustal magnetic anomaly; Shaanxi area