

doi:10.3799/dqkx.2014.177

2010.0 年代蒙古地区地磁场曲面样条

陈 斌^{1,2}, 袁浩浩¹, 王 雷³, 徐如刚³, 倪 喆⁴, 顾左文¹, 冯丽丽¹

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2. 美国地质调查局, 加利福尼亚门罗帕克 94025

3. 安徽省地震局, 安徽合肥 230031

4. 云南省地震局, 云南昆明 530100

摘要: 蒙古为我国的北方重要邻国, 其境内的西蒙古构造块体为我国主要地震带——南北地震带的主要北端构造. 应用曲面样条(SP)方法, 对蒙古地区 119 个野外地磁测点的观测数据进行了计算, 获得 2010.0 年代蒙古地区地磁场空间分布, 并与 EMM2010.0 模型给出蒙古地区地磁场空间分布进行比较. 结果表明: 曲面样条方法建立的蒙古地区地磁场模型与 EMM 给出的地磁场描述的蒙古地区各地磁要素的空间分布基本类似, 但在局部地区存在一定差异, 该差异在局部地区能达到 $\pm 30'$ (I), $\pm 60'$ (D), ± 500 nT (H, F, X, Y, Z).

关键词: 地磁场; 曲面样条方法; 蒙古地区.

中图分类号: P318.1+1, P318.1+3

文章编号: 1000-2383(2014)12-1927-06

收稿日期: 2014-04-03

Geomagnetic Field over Mongolia for 2010.0 Epoch Using Spherical Cap Harmonic Method

Chen Bin^{1,2}, Yuan Jiehao¹, Wang Lei³, Xu Rugang³, Ni Zhe⁴, Gu Zuowen¹, Feng Lili¹

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

2. U.S. Geological Survey, Menlo Park, CA 94025, USA

3. Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230031, China

4. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 530100, China

Abstract: Mongolia is an important neighbor of northern China. Western Mongolia ancient tectonic is a major structure in north of north-south tectonic earthquake zone, one important earthquake zone in China. In this paper, surfaces spline (SP) method is used to calculate the geomagnetic data on 119 sites in Mongolia on 2010.0 epoch, and the geomagnetic spatial structure in Mongolia is obtained. The results show that the geomagnetic spatial distribution of magnetic components given by SP model and EMM is similar, but there are some differences in part. These differences can reach $\pm 30'$ for I , $\pm 60'$ for D and ± 500 nT for H, F, X, Y, Z .

Key words: geomagnetic field; surfer spline (SP); Mongolia.

0 引言

蒙古人民共和国位于亚洲东部蒙古高原上, 北临贝加尔湖, 东南西 3 面与我国的内蒙古、甘肃和新疆接壤, 与我国共有极长的国境线, 为我国北方边界

的重要邻国. 蒙古东部至内蒙中东部、辽宁和黑龙江西部构成的东蒙—兴安块体为我国华北克拉通地块的北部重要构造. 蒙古西部、内蒙西部, 阿尔泰造山带以东和戈壁阿尔泰造山带以北构成的蒙古西部块体为我国南北地震带和塔里木地块的北部重要构造块体, 该块体被 Bolnai 断裂和 Bogd 断裂自北向南

基金项目: 2011 年度国家科技计划项目“远东地区地磁场、重力场及深部构造观测与模型研究”(No.2011DFB20120); 2012 年度地震行业科研专项经费项目“中国综合地球物理场观测—鄂尔多斯地块周缘地区”(No.201208009); 国家留学基金委“2013 年地震科技青年骨干人才培养项目”(No.201304190011).

作者简介: 陈斌(1979—), 男, 博士, 主要从事地磁测量及地磁研究工作. E-mail: champion_chb@126.com

分隔成萨彦地块、阿尔泰地块和阿拉善地块(马宏生等,2006)。研究蒙古地区的地质构造对研究华北克拉通、南北地震带和塔里木地块等主要块体与北方重要块体及更北部的西伯利亚克拉通块体之间的动力学关系有着重要的地球物理学意义。

岩石圈介质性质,如温度、应力等状态将通过岩石磁化率(黄平章等,1990;郝锦琦等,1992,1993;侯登录等,2003;赵翔宇和刘青松,2010)反映到地面能观测到的磁场异常分布中。因此通过监测地面的磁场空间分布研究地质构造是地磁学科的研究方向之一。根据各自国家的磁测数据建立各自的地磁场模型也是地磁学者用来研究本问题的基本思路(Allredge,1982,1987;Harnes *et al.*,1986,1990;Barton,1988;夏国辉等,1988;Newitt and Haines,1989;安振昌,1993;Ates *et al.*,1999;Kote *et al.*,2000;陈斌等,2011;顾左文等,2004;高金田等,2005;徐文耀等,2005)。建立准确、可信的高分辨率磁场模型并进行描述和分析是研究地质构造的重要步骤,也是本论文着眼研究的问题。

目前可用于数值计算的全球磁场模型有若干种,如国际地磁参考场(The International Geomagnetic Reference Field, IGRF),世界磁场模型(World Magnetic Model, WMM),磁场(Magnetic Field, MF)模型等(McLean *et al.*,2004;Maus *et al.*,2005,2006;Finlay *et al.*,2010;Maus,2010)。其中空间分辨率最高的为增强磁场模型(Enhanced Magnetic Model, EMM),其空间分布分辨率约为 0.5° (Maus,2010),是目前可直接计算全球地磁场空间分布模型中分辨率最高的。但由于缺乏某些区域的高空间分辨率的地磁测量数据,在这些区域未描述出 0.5° 分辨率的空间异常分布。

为了实现蒙古地区区域地磁场的建立,研究中国北方边界地区地磁分布特征和中国地磁分布的联系,探索蒙古高原块体与华北克拉通、南北地震带北端及塔里木块体相互作用。在 2011—2012 年期间,中国地震局地球物理研究所(IGPCEA)与蒙古科学院天文与地球物理研究中心(简称 RCAG, MAS)在蒙古境内合作测量了 119 个点的地磁三分量数据(D 、 I 、 F)。本文根据这些地磁场实测数据,以 EMM 为参考,用曲面样条方法(Surfer Spline, SP)建立了 2010.0 年代蒙古及周边地区地磁场区域模型,分析了蒙古地区地磁异常场 X 、 Y 、 Z 、 D 、 I 、 H 、 F 七要素的分布特征。

1 数据来源及处理

本文以 2011—2012 年中国地震局地球物理研究所与 RCAG 合作测量得到的蒙古境内 119 个测点的 D 、 I 、 F 三分量数据为最初研究数据,其中 75 点为 2011 年由中蒙两国科研人员共同测量完成,44 点由蒙方人员于 2012 年独立测量完成。观测的地磁要素为总强度 F 、磁偏角 D 和磁倾角 I 。测量的仪器包括 G856 质子旋进仪、DI 仪和差分 GPS,观测精度为 $0.1\text{nT}(F)$ 和 $6''(D, I)$ 。本文根据这些地磁场实测数据,经过数据处理与分析,最后选用 118 个实测点数据,其中由于 2012 年 RCAG 独立测量的 096 号测点与 2011 年共同测量的 008 号点位置重复,故舍去了 096 号点。蒙古地区 118 个地磁测点及边界约束点如图 1 所示。

由于野外测点主要分布的区域位于 $42^\circ\text{N}\sim 52^\circ\text{N}$, $89^\circ\text{E}\sim 116^\circ\text{E}$,选择覆盖蒙古地区的模型计算区域为 $42^\circ\text{N}\sim 52^\circ\text{N}$, $89^\circ\text{E}\sim 116^\circ\text{E}$ 。为弥补地区外测点缺失,同时为降低边界畸变,我们在计算区域边缘处均匀选取 16 个补充点,根据 EMM 计算出这 16 个补充点的地磁场值作为强化约束条件。

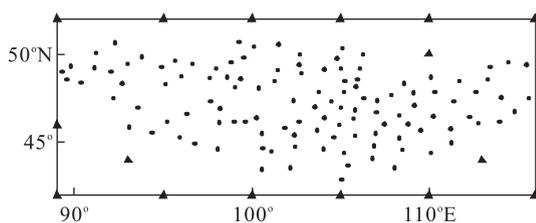


图 1 蒙古地区地磁野外测点分布

Fig.1 The survey sites in Mongolia

●表示测点;▲表示边界点

2 计算结果

曲面样条的拟合公式为:

$$\begin{cases} W(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + \sum_{i=1}^N F_i r_i^2 \ln(r_i^2 + \epsilon) \\ \sum_{i=1}^N F_i = \sum_{i=1}^N x_i F_i = \sum_{i=1}^N y_i F_i = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 、 y 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, $W(x, y)$ 为 x 、 y 处的求解物理量,本文计算的为独立地磁三要素 X 、 Y 、 Z , a_0 、 a_1 、 a_2 和 F_i 为曲面样条函数的拟合系数, N 为原始数据的个数,求解的拟合系数有 $N+3$ 个, r_i 为待拟合点 (x, y) 与第 i 个原始测点的距离, $r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$, ϵ 为曲

率因子,本文取为 10^{-7} .

曲面样条分析得到的地磁场各要素空间分布见图 2.图 2 表明,“2010.0 年代蒙古地区地磁场曲面样条模型”与“EMM”所描述的地磁场空间分布局部在大的趋势和量值上是相同的,各分量的空间分布和量值区间如下:

磁倾角 I 、水平分量 H 和北向分量 X 在蒙古地区呈现南北略偏西的梯度状分布. I 的最小值为 61.5° ,位于该区域的东南角;最大值为 71.5° ,位于该

区域的北部边界. H 和 X 的最大值为 $26\ 600\ \text{nT}$,位于该区域的东南角;最小值为 $18\ 600\ \text{nT}$,位于该区域的北部边界. SP 和 EMM 两者的差异显著体现在 $50^\circ\text{N}, 104^\circ\text{E}$ 位置附近, SP 描述的磁场等值线在该位置出现了一定程度的扭曲和转折.

磁偏角 D 和东向分量 Y 在蒙古地区呈现从东到西逐渐递增的趋势. D 的最大值为 4.5° ,位于该地区的西北角;最小值为 -8.5° ,位于该地区的东北角. Y 的最大值为 $1\ 600\ \text{nT}$,位于该地区的西北角;最小

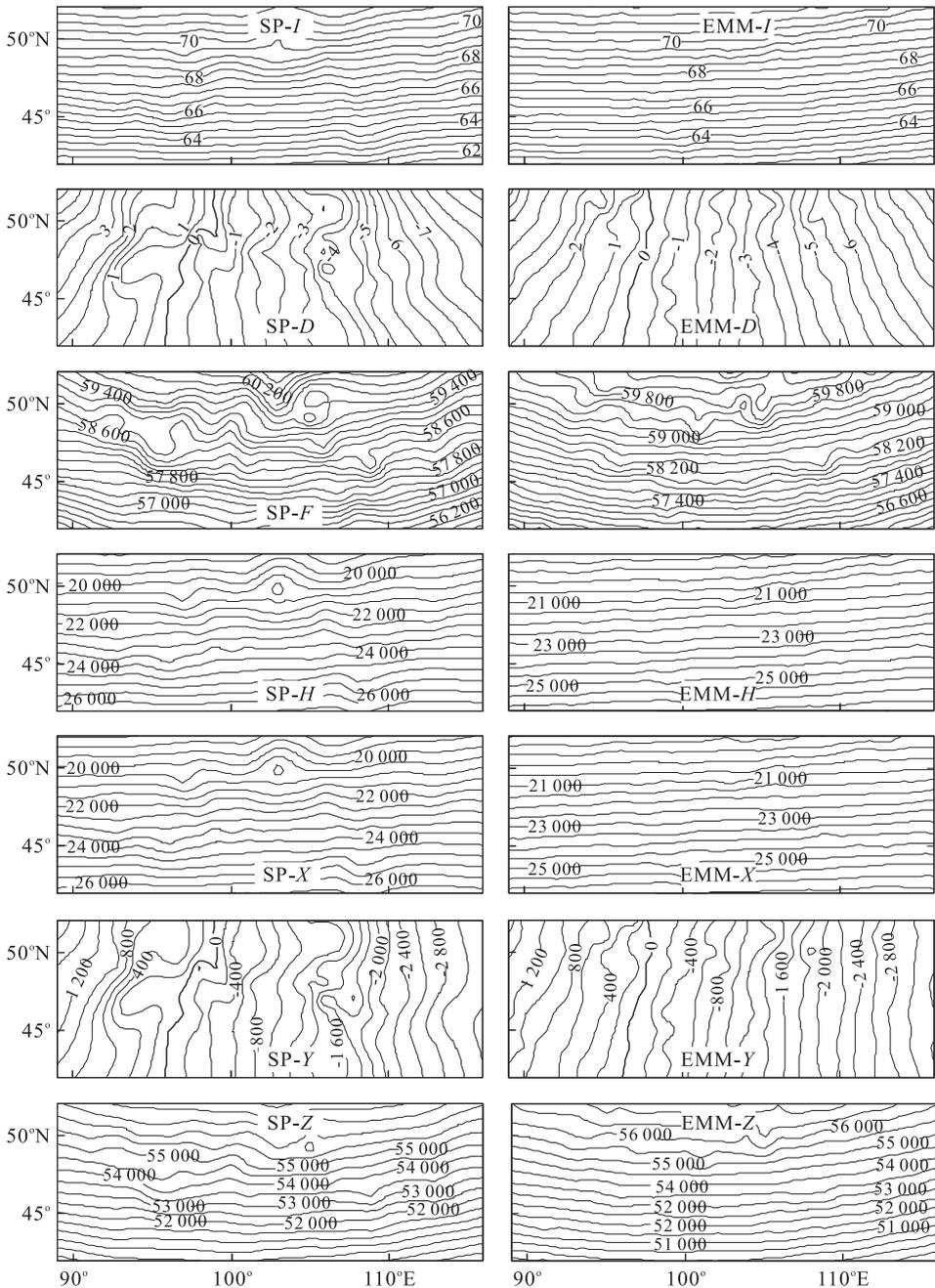


图 2 曲面样条方法和 EMM 模型描述的 2010.0 蒙古地区地磁场空间分布(单位:nT(F, H, X, Y, Z), $1^\circ(D, I)$)

Fig.2 The geomagnetic spatial structure in Mongolia by Surfer Spline and EMM model for 2010.0 epoch

值为 $-3\ 200\ \text{nT}$, 位于该地区的东侧边界. 零偏线位于 $94^\circ\text{E}\sim 99^\circ\text{E}$, SP 和 EMM 给出的位置略有差别. SP 和 EMM 两者的差异还显著体现在 $47^\circ\text{N}, 96^\circ\text{E}$ 和 $47^\circ\text{N}, 106^\circ\text{E}$ 两处位置附近, SP 描述的磁场等值线在两处位置均出现了一定程度的扭曲和转折.

总强度 F 和垂直分量 Z 在蒙古地区呈现的基本形态为 U 型从南到北逐渐增大. F 的最小值为 $56\ 000\ \text{nT}$ 左右, 位于该地区的南部两侧; 最大值为 $60\ 700\ \text{nT}$, 位于该地区的北部. Z 的最小值为 $49\ 000\ \text{nT}$ 左右, 位于该地区的南部两侧; 最大值为 $57\ 600\ \text{nT}$, 位于该地区的北部. SP 和 EMM 两者的差异显著体现在 Ulaanbaatar 西北部 ($49^\circ\text{N}, 105^\circ\text{E}$) 和东南部 ($46^\circ\text{N}, 109^\circ\text{E}$), SP 描述的磁场等值线在两处位置均出现了一定程度的扭曲和转折.

此外, 为便于比较 SP 和 EMM 的差异, 由 SP 和 EMM 分别计算得出的各地磁要素数值, 然后计算同空间点阵同一地磁要素两模型数值的差, 并绘制各地磁要素差值的等值线, 如图 3.

分析 SP 和 EMM 模型计算的同一地磁要素的差异并研读图 3, 可以得到如下认识:

磁倾角 ΔI 、水平分量 ΔH 和北向分量 ΔX 的空间分布形态较为相似, 等值线的正负块体大致沿经线南北延展, 仅有少量东西走向的块体 (如 $47^\circ\text{N}, 103^\circ\text{E}$ 至 $50^\circ\text{N}, 109^\circ\text{E}$ 的块体). ΔI 的最大值为 $28'$, 位于 $48^\circ\text{N}, 103^\circ\text{E}$ 附近; 最小值为 $-36'$, 位于 $50^\circ\text{N}, 103^\circ\text{E}$ 附近. ΔH 和 ΔX 的最大值为 $720\ \text{nT}$, 位于 $50^\circ\text{N}, 103^\circ\text{E}$ 附近; 最小值为 $-400\ \text{nT}$ 左右, 分别位于 $48^\circ\text{N}, 103^\circ\text{E}$ 与 $46^\circ\text{N}, 93^\circ\text{E}$ 及 $45^\circ\text{N}, 96^\circ\text{E}$ 附近 3 处.

磁偏角 ΔD 和东向分量 ΔY 的空间分布形态较为相似, 在蒙古地区大部分呈现为负值分布, 仅在研究区域的东两侧 (94°E 以西和 114°E 以东) 及南北部至中间的 3 个块体 ($47^\circ\text{N}, 100^\circ\text{E}$ 以北及北偏西; $47^\circ\text{N}, 109^\circ\text{E}$ 以北及西偏北; $47^\circ\text{N}, 104^\circ\text{E}$ 以南及南偏东) 及零星小块体存在正值分布. ΔD 的最大值为 $72'$, 位于 $51^\circ\text{N}, 108^\circ\text{E}$ 附近; 最小值为 $-82'$, 位于 $47^\circ\text{N}, 93^\circ\text{E}$ 附近. ΔY 的最大值为 $460\ \text{nT}$, 位于 $51^\circ\text{N}, 108^\circ\text{E}$ 附近; 最小值为 $-540\ \text{nT}$, 位于 $47^\circ\text{N}, 93^\circ\text{E}$ 附近.

总强度 ΔF 和垂直分量 ΔZ 的空间分布形态较为相似, 在蒙古地区大部分呈现为负值分布, 仅在研究区域的存在 4 个正值块体 ($47^\circ\text{N}, 95^\circ\text{E}$ 附近; $47^\circ\text{N}, 103^\circ\text{E}$ 以北及以东; $44^\circ\text{N}, 109^\circ\text{E}$ 附近; 114°E 经线附近). ΔF 的最大值为 $420\ \text{nT}$, 位于 $51^\circ\text{N},$

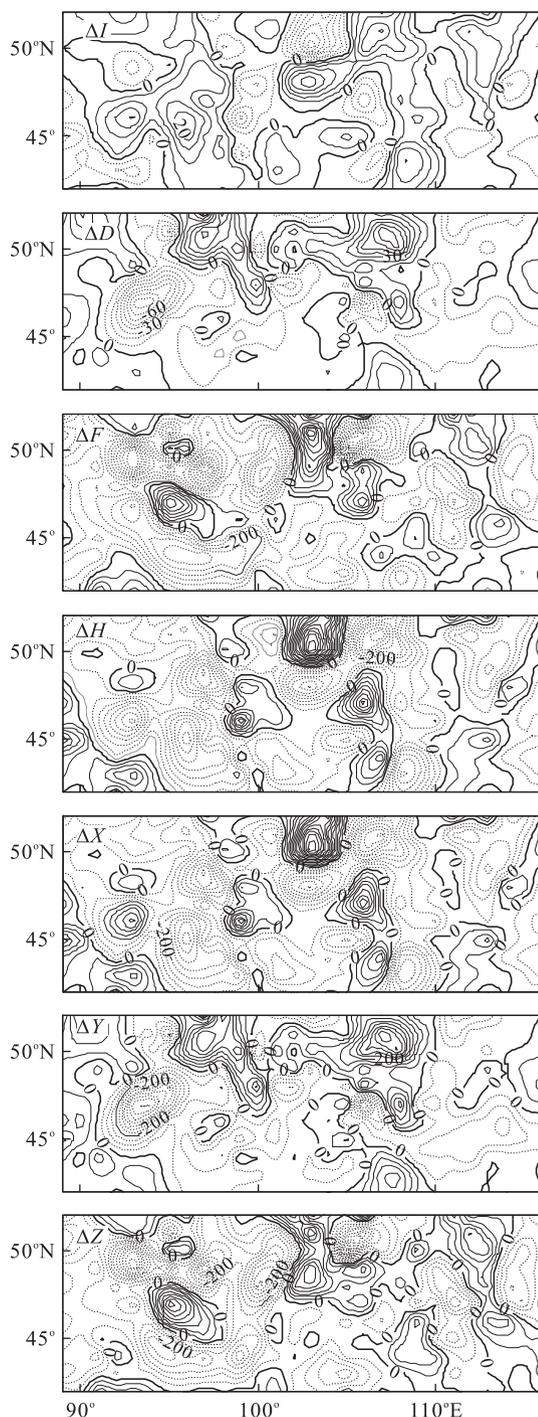


图 3 曲面样条方法和 EMM 模型描述的蒙古地区地磁场差异的空间分布 (单位: nT (F, H, X, Y, Z), $'$ (D, I))

Fig.3 The geomagnetic spatial structure of deference between Surfer Spline and EMM model in Mongolia

103°E 附近; 最小值为 $-600\ \text{nT}$, 位于 $50^\circ\text{N}, 97^\circ\text{E}$ 附近. ΔZ 的最大值为 $340\ \text{nT}$ 左右, 分别位于 $57^\circ\text{N}, 95^\circ\text{E}$ 与 $49^\circ\text{N}, 103^\circ\text{E}$ 及 $51^\circ\text{N}, 103^\circ\text{E}$ 附近 3 处; 最小值为 $-560\ \text{nT}$, 位于 $49^\circ\text{N}, 103^\circ\text{E}$ 附近.

3 结果与讨论

(1) 曲面样条方法建立的蒙古地区地磁场模型与 EMM 给出的地磁场模型描述的蒙古地区各地磁要素的空间分布基本类似,但在局部地区存在一定差异。由于精确可靠的测量数据和相关台站的数据资料参与模型的建立,运用曲面样条方法建立的蒙古地区地磁场异常模型能较为真实的描述蒙古地区的磁场空间分布。

(2) 磁倾角 ΔI 、水平分量 ΔH 和北向分量 ΔX 的空间分布形态较为相似,等值线的正负块体大致沿经线南北延展,局部差异能达到 $\pm 30'$ (I), ± 500 nT (H, X)。

(3) 磁偏角 ΔD 和东向分量 ΔY 的空间分布形态较为相似,在蒙古地区大部分呈现为负值分布,仅在局部地区存在正值分布,局部差异能达到 $\pm 60'$ (D), ± 500 nT (Y)。

(4) 总强度 ΔF 和垂直分量 ΔZ 的空间分布形态较为相似,在蒙古地区大部分呈现为负值分布,仅存在少量的正值块体,局部差异能达到 ± 500 nT (F, Z)。

致谢:蒙古科学院天文与地球物理研究中心 U. Sukhbaatar 教授、S. Tserendug、T. Nasanochir、S. Gantsogt、M. Ngunshagai 等共同参与野外工作的制定和执行,安徽省地震局、云南省地震局、甘肃省地震局、新疆维吾尔自治区地震局部分人员为本论文的撰写提供了野外工作和台站数据支持。

References

Allredge, L. R., 1982. Geomagnetic Local and Regional Harmonic Analysis. *J. Geophys. Res.*, 87(B3): 1921—1926. doi:10.1029/JB087iB03p01921

Allredge, L. R., 1987. On Regional Magnetic Charts. *J. Geomag. Geoelectr.*, (39): 723—738.

An, Z. C., 1993. Spherical Cap Harmonic Analysis of Geomagnetic Field for China. *Acta Geophysica Sinica*, 36(6): 753—764 (in Chinese with English abstract).

Ates, A., Kearey, P., Tufan, S., 1999. New Gravity and Magnetic Anomaly Maps of Turkey. *Geophys. J. Int.*, 136(2): 499—502. doi:10.1046/j.1365—246X.1999.00732.x

Barton, C. E., 1988. Global and Regional Geomagnetic Reference Fields. *Exploration Geophysics*, 19(3): 401—416. doi:10.1071/EG988401

Chen, B., Gu, Z. W., Gao, J. T., et al., 2011. Analyses of Geomagnetic Field and Its Secular Variation over China for

2005.0 Epoch Using Spherical Cap Harmonic Method. *Chinese J. Geophys.*, 54(3): 771—779 (in Chinese with English abstract).

Finlay, C. C., Maus, S., Beggan, C. D., et al., 2010. International Geomagnetic Reference Field: The Eleventh Generation. *Geophys. J. Int.*, 183(3): 1216—1230. doi:10.1111/j.1365—246X.2010.04804

Gao, J. T., An, Z. C., Gu, Z. W., et al., 2005. Selections of the Geomagnetic Normal Field and Calculations of the Geomagnetic Anomalous Field. *Chinese J. Geophys.*, 48(1): 56—62 (in Chinese with English abstract).

Gu, Z. W., An, Z. C., Gao, J. T., et al., 2004. Spherical Cap Harmonic Analysis of the Geomagnetic Field in the Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Chinese J. Geophys.*, 47(6): 1003—1008 (in Chinese with English abstract).

Hao, J. Q., Huang, P. Z., Zhou, J. G., 1992. The Effect of Rheological Property on Rock Magnetism: A Possible Mechanism of Seismomagnetism. *Earthquake Res. China*, 8(2): 53—60 (in Chinese with English abstract).

Hao, J. Q., Huang, P. Z., Zhou, J. G., 1993. The Effect of Cracking on Remnant Magnetization of Rocks—Its Implication to Earthquake Prediction. *Acta Geophysica Sinica*, 36(2): 203—211 (in Chinese with English abstract).

Hou, D. L., Xu, J., Tang, G. D., et al., 2003. Dependence of Susceptibility of SrRuO₃ on Temperature. *Chinese J. Rare Metals*, 27(5): 652—654 (in Chinese with English abstract).

Huang, P. Z., Hao, J. Q., Zhou, J. G., et al., 1990. The Effect Pressure and Temperature on Magnetic Properties of Rocks from the Area near the Epicenter of the Liyang Earthquake. *Earthquake Res. China*, 6(1): 56—64 (in Chinese with English abstract).

Ma, H. S., Zhang, G. M., Liu, J., et al., 2006. Research on the Characteristics of Large Earthquake Activity on the Active Tectonic Boundaries in Chinese Mainland. *Seismology and Geology*, 28(1): 48—60 (in Chinese with English abstract).

Maus, S., 2010. An Ellipsoidal Harmonic Representation of Earth's Lithospheric Magnetic Field to Degree and Order 720. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11: Q06015. doi:10.1029/2010GC003026

Maus, S., Macmillan, S., Chernova, T., et al., 2005. The 10th Generation International Geomagnetic Reference Field. *Geophysical Journal International*, 161(3): 561—565. doi:10.1111/j.1365—246X.2005.02641.x

Maus, S., Rother, M., Hemant, K., et al., 2006. Earth's Lithospheric Magnetic Field Determined to Spherical Har-

- monic Degree 90 from CHAMP Satellite Measurements. *Geophys. J. Int.*, 164(2): 319–330. doi: 10.1111/j/1365-246X.2005.02833.x
- Newitt, L. R., Haines, G. V., 1989. A Canadian Geomagnetic Reference Field for Epoch 1987.5. *J. Geomag. Geoelectr.*, 41(2): 249–260.
- Xia, G. H., Zheng, S. L., Wu, L. L., et al., 1988. The Geomagnetic Field Chart of China in 1980.0 and the Mathematical Model. *Acta Geophysica Sinica*, 31(1): 82–89 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. Y., Wei, Z. G., Xia, G. H., 2005. Regional Features of the Secular Variation of the Geomagnetic Field in China for 2000. *Chinese J. Geophys.*, 48(3): 551–560 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. Y., Liu, Q. S., 2010. Effects of the Grain Size Distribution on the Temperature-Dependent Magnetic Susceptibility of Magnetite Nanoparticles. *Sci. China Earth Sci.*, 40(7): 873–880 (in Chinese with English abstract).
- 安振昌, 1993. 中国地区地磁场的球冠谐和分析. *地球物理学报*, 36(6): 753–764.
- 陈斌, 顾左文, 高金田, 等, 2011. 2005.0 年代中国地区地磁场及其长期变化求冠谐和分析. *地球物理学报*, 54(3): 771–779.
- 高金田, 安振昌, 顾左文, 等, 2005. 地磁正常场的选取与地磁异常场的计算. *地球物理学报*, 48(1): 51–62.
- 顾左文, 安振昌, 高金田, 等, 2004. 京津冀地区地磁场球冠谐分析. *地球物理学报*, 47(6): 1003–1008.
- 郝锦绮, 黄平章, 周建国, 1992. 岩石流变磁效应——震磁效应的一种可能机理. *中国地震*, 8(2): 53–60.
- 郝锦绮, 黄平章, 周建国, 1993. 微破裂对岩石剩磁的影响——对地震预报的意义. *地球物理学报*, 36(2): 203–211.
- 侯登录, 徐静, 唐贵德, 等, 2003. SrRuO₃ 的磁化率随温度的变化关系. *稀有金属*, 27(5): 652–654.
- 黄平章, 郝锦绮, 周建国, 等, 1990. 溧阳震区岩石磁性的温度和应力效应. *中国地震*, 6(1): 56–64.
- 马宏生, 张国民, 刘杰, 等, 2006. 中国大陆活动地块边界带强震活动特征的研究. *地震地质*, 28(1): 48–60.
- 夏国辉, 郑双良, 吴莉兰, 等, 1988. 1980 年代中国地磁正常场图及其数学模式. *地球物理学报*, 31(1): 82–89.
- 徐文耀, 魏志刚, 夏国辉, 2005. 2000 年中国地区地磁场长期变化的区域特征. *地球物理学报*, 48(3): 551–560.
- 赵翔宇, 刘青松, 2010. 粒径分布对磁铁矿磁化率变温曲线的影响. *中国科学: 地球科学*, 40(7): 873–880.

附中文参考文献