

高金田, 安振昌, 顾左文等. 地磁正常场的选取与地磁异常场的计算. 地球物理学报, 2005, 48(1):56~62

Gao J T, An Z C, Gu Z W. Selections of the geomagnetic normal field and calculations of the geomagnetic anomalous field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(1):56~62

地磁正常场的选取与地磁异常场的计算

高金田¹, 安振昌^{1,2}, 顾左文¹, 韩 炜¹, 詹志佳¹, 姚同起¹

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘 要 根据 2003 年中国地磁观测数据(包括 135 个地磁测点和 35 个地磁台)以及我国邻近地区 38 个 IGRF 计算点的地磁数据, 计算中国地磁异常场的分布. 选取两种地磁场模型作为地磁正常场, 一是国际参考地磁场的球谐模型, 二是中国地磁场泰勒多项式模型. 根据各个测点的地磁异常值(观测值减去模型计算值), 用球冠谐分析方法计算地磁异常场的球冠谐模型, 并绘制 2003 年中国地磁异常图(ΔD , ΔI , ΔF , ΔX , ΔY , ΔZ). 分析和讨论了中国地磁异常场.

关键词 地磁场 地磁正常场 地磁异常场 泰勒多项式方法 球冠谐分析方法 中国地区

文章编号 0001-5733(2005)01-0056-07 **中图分类号** P318 **收稿日期** 2004-02-17, 2004-09-20 收修定稿

Selection of the geomagnetic normal field and calculation of the geomagnetic anomalous field

GAO Jin-Tian¹, AN Zhen-Chang^{1,2}, GU Zuo-Wen¹, HAN Wei¹, ZHAN Zhi-Jia¹, YAO Tong-Qi¹

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

2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract According to the geomagnetic observational data in China for 2003, including 135 geomagnetic stations and 35 geomagnetic observatories, and the geomagnetic data of 38 IGRF calculated points in China's adjacent regions, the distribution of the geomagnetic anomalous field in China was calculated. The two kinds of geomagnetic models are selected as the geomagnetic normal field: one is the spherical harmonic model of the international geomagnetic reference field, and the other is the Taylor polynomial model of the geomagnetic field in China. Based on the geomagnetic anomaly values (the observed value minus the calculated value of the model) at various stations, the spherical cap harmonic model of the geomagnetic anomalous field was calculated by using the spherical cap harmonic analysis method. The geomagnetic anomaly charts (ΔD , ΔI , ΔF , ΔX , ΔY and ΔZ) in China for 2003 are drawn. The geomagnetic anomalous field in China is analyzed and discussed.

Keywords Geomagnetic field, Normal geomagnetic field, Anomalous geomagnetic field, Taylor polynomial method, Spherical cap harmonic analysis method, China region.

1 引 言

地磁场可分解为地磁正常场和地磁异常场两个

部分. 异常场是相对于正常场而言的. 由于选取的地磁正常场不同, 故计算的地磁异常场也不完全相同. 本文研究的地磁异常场与勘探地球物理研究的地磁场不同, 航空磁测和海洋磁测的特点是测线密和点

基金项目 中国科技部社会公益性专项重点项目(M010726A)资助中国地震局地球物理研究所论著编号(04AC1018).

作者简介 高金田, 男, 1953 年生, 1978 年毕业于吉林大学数学系, 高级工程师, 长期从事于地磁测量和震磁关系研究, 2002 年开始从事地磁场模型计算和《中国地磁图》编制工作. E-mail: gaojt2000@yahoo.com.cn

距小,适合研究小构造和探查油气矿产资源.本文所讨论的地磁异常场是根据大范围的地磁绝对测量数据,相对于某一选定的地磁正常场计算各个地磁观测点异常值,并用一定的数学方法建立的地磁异常场模型.

地磁场模型是地磁研究的重要课题^[1].地磁场模型分为全球模型与区域模型.自1968年起,国际地磁和高空物理协会(IAGA)给出了每5年的全球球谐模型,即国际参考地磁场(IGRF),迄今已有了第8代IGRF^[2~4].在区域地磁场模型研究中,不同的学者使用了各种数学计算方法,得到各个国家与区域的地磁场模型^[5~9].在中国地区地磁场模型研究中,Chen P C^[10]首次创立了1946年重庆北碚地区地磁场的泰勒多项式模型,安振昌等^[11,12]研究了1960.0年与1970.0年中国地区地磁场泰勒多项式模型,夏国辉等^[13]计算了1980.0年中国地磁场模型,徐文耀等^[14]分析了2000.0年中国地磁场模型;此外,徐文耀和朱岗^[15,16]对1970.0年中国及邻近地区地磁场进行了矩谐分析,并提出了嵌套式地磁场模型;安振昌等^[17]应用曲面样条函数方法计算了1970.0年中国地磁场模型;安振昌^[18,19]应用球冠谐分析方法计算了1970.0年与2000.0年中国地磁场的球冠谐模型,顾左文等^[20]利用2002年中国京津

冀地区的地磁观测资料,研究了该地区地磁场球冠谐模型.上述学者的工作,极大发展了地磁场模型的研究.

中国地震局地球物理研究所在中国科技部和中國地震局的资助下,于2003年在中国大陆完成135个测点的地磁三分量(D, I, F)绝对测量.本文根据135个地磁测点以及35个地磁台的地磁数据,相对于IGRF和中国地磁场的泰勒多项式模型,分别计算地磁异常值,用球冠谐分析方法计算相应的地磁异常场模型,并绘制地磁异常图.

2 使用的地磁数据

2003年在全国布设135个地磁测点(图1).测量的地磁要素为磁偏角(D)、磁倾角(I)以及地磁总强度(F).使用CTM-DI地磁经纬仪测量 D 和 I ,精度 $0.2'$;用G856AX质子旋进磁力仪测量 F ,精度 0.5nT ;使用ProMark2差分GPS测量地理经纬度、高程和地理方位角,垂直定位精度 10mm ,水平定位精度为 5mm ,地理方位角测量精度优于 $6''$.使用上述仪器组合测量地磁三分量(D, I, F)绝对值,不仅测量精度高,而且大大降低了天气对地磁测量的影响.

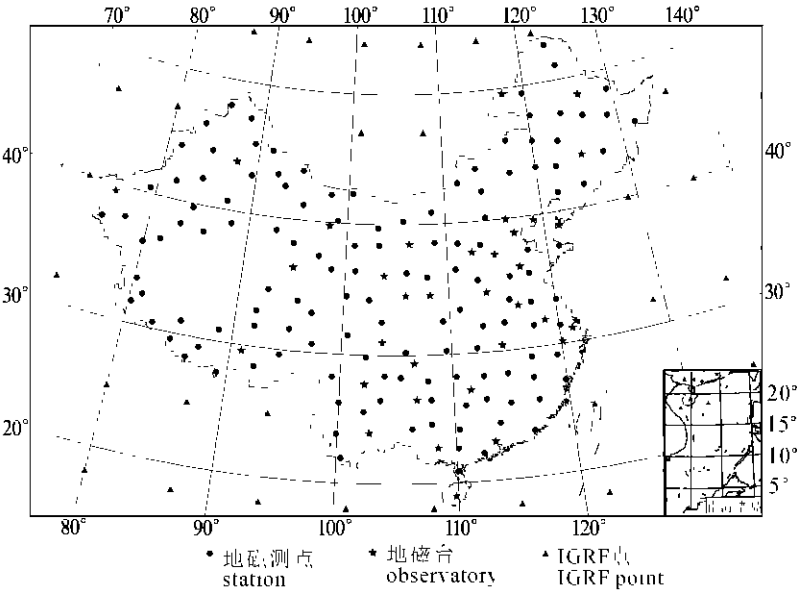


图1 2003年中国地磁测点和地磁台分布

Fig. 1 Distribution of geomagnetic stations and observatories in China for 2003

为了改善地磁场模型和地磁异常场模型的边界效应,在中国的周边地区($18^{\circ}\text{N} \sim 54^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ}\text{E} \sim 136^{\circ}\text{E}$ 范围内)增补了38个根据IGRF2000计算的地磁场

数值IGRF计算点.除135个地磁测点外,还使用35个地磁台数据(图1).本文研究的重点是地磁异常场,故保留全部测点和台站,加上邻区的38个IGRF

计算点, 共计 208 个地点的地磁数据. 增补的 38 个 IGRF 点, 根据 IGRF2000 及其长期变化模型, 归算为与 135 个测点 2003 年相同通化日期的地磁场值, 该通化日期为 2003 年 5 月 4 日.

3 选用的地磁正常场

3.1 国际参考地磁场 (IGRF) 作为地磁正常场

各个地磁测点异常值定义为观测值与 IGRF 的差值, 即

$$\begin{aligned}\Delta X_{\text{IGRF}} &= X_{\text{obs}} - X_{\text{IGRF}}, \\ \Delta Y_{\text{IGRF}} &= Y_{\text{obs}} - Y_{\text{IGRF}}, \\ \Delta Z_{\text{IGRF}} &= Z_{\text{obs}} - Z_{\text{IGRF}},\end{aligned}\quad (1)$$

式中 X_{obs} 、 Y_{obs} 和 Z_{obs} 为观测值; X_{IGRF} 、 Y_{IGRF} 和 Z_{IGRF} 是如上所述由 IGRF2000 及其长期变化模型计算的^[4], ΔX_{IGRF} 、 ΔY_{IGRF} 和 ΔZ_{IGRF} 代表各个测点的异常值.

3.2 中国地磁场泰勒多项式模型作为正常场

各个地磁测点的磁异常值定义为观测值与泰勒多项式模型 (TL) 的差值, 即

$$\begin{aligned}\Delta X_{\text{TL}} &= X_{\text{obs}} - X_{\text{TL}}, \\ \Delta Y_{\text{TL}} &= Y_{\text{obs}} - Y_{\text{TL}}, \\ \Delta Z_{\text{TL}} &= Z_{\text{obs}} - Z_{\text{TL}},\end{aligned}\quad (2)$$

式中 X_{obs} 、 Y_{obs} 、 Z_{obs} 为观测值; X_{TL} 、 Y_{TL} 、 Z_{TL} 是 2003 年中国地磁场泰勒多项式模型计算值; ΔX_{TL} 、 ΔY_{TL} 、 ΔZ_{TL} 代表各个测点的异常值.

为了得到各个测点的异常值 ΔX_{TL} 、 ΔY_{TL} 、 ΔZ_{TL} , 首先要根据上述的 208 个测点的地磁数据, 用泰勒多项式方法计算地磁场北向分量 (X)、东向分量 (Y) 和垂直分量 (Z) 的泰勒多项式模型:

$$X(\text{或 } Y, \text{或 } Z) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n A_{nm} (\varphi - \varphi_0)^{n-m} (\lambda - \lambda_0)^m, \quad (3)$$

式中 φ 和 λ 代表地理纬度和经度, φ_0 和 λ_0 是泰勒多项式模型展开原点的纬度和经度, 本文取 $\varphi_0 = 36.0^\circ \text{N}$, $\lambda_0 = 104.5^\circ \text{E}$. A_{nm} 代表多项式模型的系数, 根

据本文所使用的地磁数据, 应用最小二乘法确定

A_{nm} ; 地磁场每个分量的多项式模型有 $\frac{1}{2}(N+1)(N+2)$ 个系数, N 为多项式模型的截断阶数. 根据计算和分析, 选用五阶泰勒多项式模型作为 2003 年中国地磁场模型 (CGRF). 表 1 给出了该模型的系数.

表 1 2003 年中国地磁场模型的五阶泰勒多项式系数

Table 1 Coefficients of the five-order Taylor polynomial model (CGRF) in China for 2003

A_{nm}	X	Y	Z
A_{00}	31048.739774	-1093.585277	43236.194797
A_{10}	-23501.705150	5551.458458	-56284.188780
A_{11}	15815.344761	-13048.563752	-21361.742614
A_{20}	4634.164375	13969.066085	-12186.999909
A_{21}	16312.743543	621.642151	40160.929703
A_{22}	70665.754566	120977.525301	-19344.473342
A_{30}	6281.720099	-16216.561120	16170.317490
A_{31}	-38361.751968	-407.946234	67924.130269
A_{32}	8427.089835	-15747.654973	-2417.797752
A_{33}	-5937.904400	17448.820685	18405.898570
A_{40}	-4541.324823	-5367.074530	6968.582818
A_{41}	1416.661142	9181.409833	12985.694751
A_{42}	9150.179105	-14135.320697	-26479.170025
A_{43}	-16701.038275	-18465.404071	13101.811221
A_{44}	105.963348	-8109.931015	-1999.960164
A_{50}	-3975.705917	-3820.113483	-18144.364302
A_{51}	27436.881812	7576.617951	-23852.538763
A_{52}	-23748.446580	14220.500985	-1650.659488
A_{53}	-168.569776	10888.111799	13023.131859
A_{54}	-28063.221928	5911.827753	37837.707838
A_{55}	-10620.080068	-11570.212690	17956.975743

4 计算地磁异常场模型

根据 (1) 式和 (2) 式计算出各个测点的磁异常值 ΔX_{IGRF} 、 ΔY_{IGRF} 、 ΔZ_{IGRF} 和 ΔX_{TL} 、 ΔY_{TL} 、 ΔZ_{TL} ; 使用球冠谐分析方法^[21, 22] 计算两种磁异常场的球冠谐模型.

在球冠坐标系下地磁异常场 (ΔX 、 ΔY 、 ΔZ) 可以表示为

$$\begin{cases} \Delta X = \sum_{k=0}^{K_{\max}} \sum_{m=0}^k \left(\frac{a}{r} \right)^{n_k(m)+2} (g_k^m \cos m\Phi + h_k^m \sin m\Phi) \frac{dP_{n_k(m)}^m(\cos\theta)}{d\theta}, \\ \Delta Y = \sum_{k=0}^{K_{\max}} \sum_{m=0}^k \frac{m}{\sin\theta} \left(\frac{a}{r} \right)^{n_k(m)+2} (g_k^m \sin m\Phi - h_k^m \cos m\Phi) P_{n_k(m)}^m(\cos\theta), \\ \Delta Z = - \sum_{k=0}^{K_{\max}} \sum_{m=0}^k (n_k(m) + 1) \left(\frac{a}{r} \right)^{n_k(m)+2} (g_k^m \cos m\Phi + h_k^m \sin m\Phi) P_{n_k(m)}^m(\cos\theta). \end{cases} \quad (4)$$

式中 Φ 和 θ 分别是球冠坐标系中的经度和余纬 ;
 a 是地球参考半径 ($a = 6371.2\text{km}$) ; r 是离开地心的
径向距离 ; $P_{n_k(m)}^m(\cos\theta)$ 是非整数阶 $n_k(m)$ 和整数次
 m 的 Schmidt 综合 Legendre 函数 ; $K_{\max}$ 代表球冠谐分
析中的最大截断阶数 . 球冠谐模型共有 $(K_{\max} + 1)^2$
个系数 , 球冠谐系数 g_m^m 和 h_k^m 是根据地磁场异常

值 , 用最小二乘法确定的 . 球冠极位于 36.0°N 和
 104.5°E , 球冠半角为 30° , 全部测点位于球冠内 . 根
据计算结果 , 选取八阶球冠谐模型作为地磁异常场
的模型^[21,22] .

4.1 以 IGRF 为正常背景场 , 计算出相应磁异常的
球冠谐模型 (SCH_{IGRF}) , 根据 SCH_{IGRF} 绘制了 2003 年
中国磁异常图 (图 2a ~ 2f) .

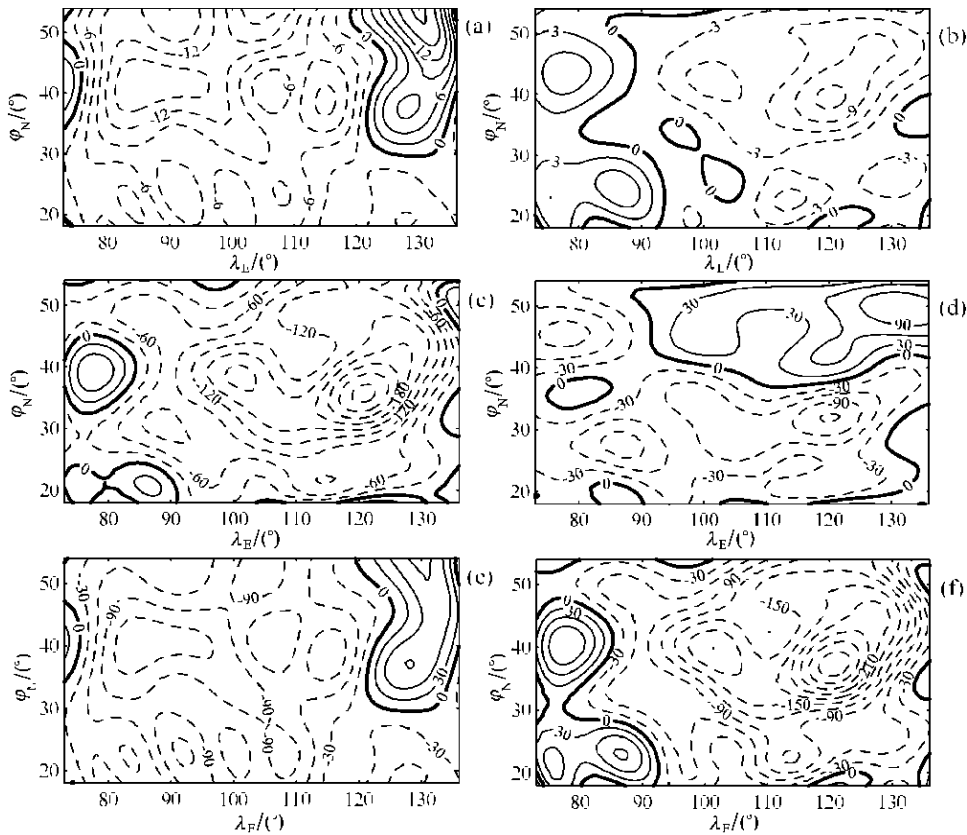


图 2 依据 SCH_{IGRF} 绘制的 2003 年中国磁异常图

(a) 磁偏角 ΔD (°) ; (b) 磁倾角 ΔI (°) ; (c) 总强度 ΔF (nT) ; (d) 北向分量 ΔX (nT) ; (e) 东向分量 ΔY (nT) ; (f) 垂直分量 ΔZ (nT) .

Fig. 2 Geomagnetic anomaly charts constructed from SCH_{IGRF} models in China for 2003

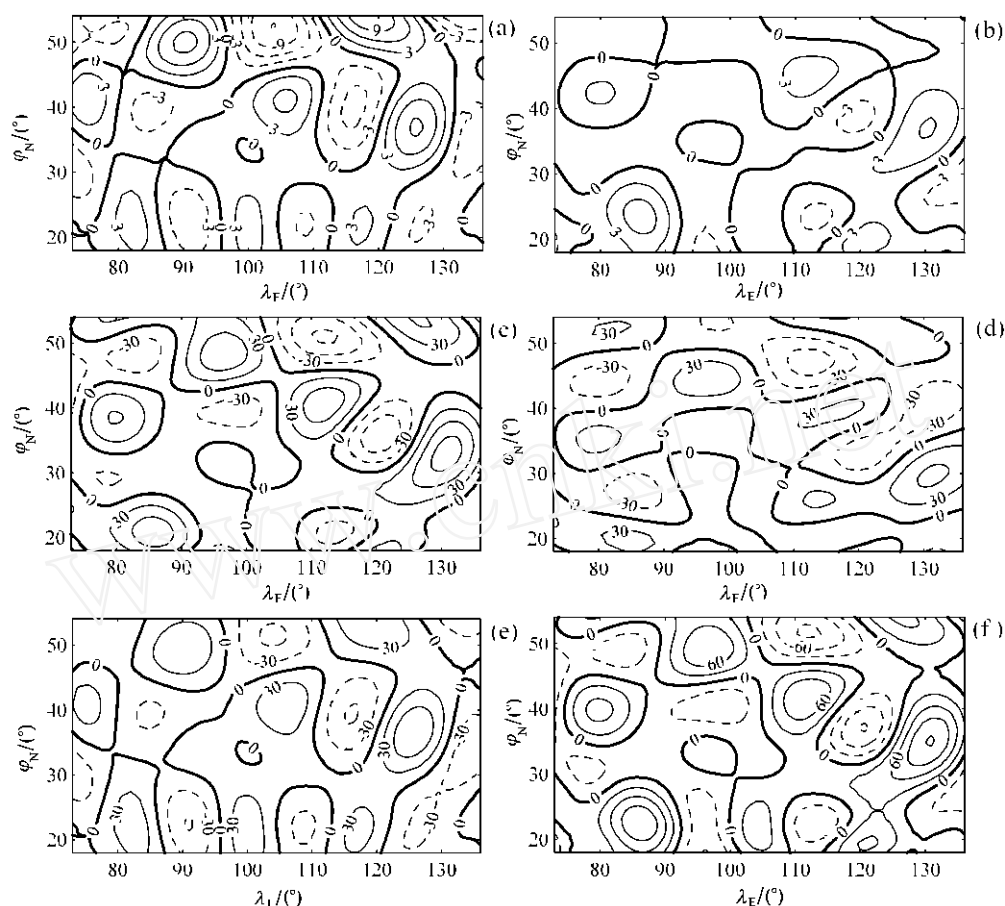
从图 2 可以看出 , 以 IGRF 为正常场计算出来的
地磁异常场 , 在我国大部分地区均为负异常 . 尤其是
磁偏角 (ΔD)、总强度 (ΔF)、东向分量 (ΔY) 和垂直
分量 (ΔZ) 磁异常图 , 在大陆地区几乎全是负的
异常 .

4.2 以 IL 为正常背景场 , 计算出相应磁异常的球
冠谐模型 (SCH_{IL}) . 根据 SCH_{IL} 绘制 2003 年中国磁异
常图 (图 3a ~ 3f) .

从图 3 可见 , 以中国地磁场泰勒多项式模型为
正常背景场 , 计算出来的地磁异常场在我国的分布
比较合理 , 有正有负 .

5 结论与讨论

5.1 在地磁场模型计算中 , 仅采用本文研究区域
($18^\circ\text{N} \sim 54^\circ\text{N}$, $73^\circ\text{E} \sim 136^\circ\text{E}$) 中的 135 个测点与 35 个
台站的地磁数据时 , 其计算结果在边界地区显示较
大的虚假磁异常 . 当在边界地区补充使用了若干
IGRF 点的计算值后 , 上述虚假的边界磁异常则获得
改善^[20] . 为探求补充 IGRF 点数及其分布的合理性 ,
在选取 28 ~ 48 个 IGRF 点及其均匀分布的若干组合
下 , 进行了模型计算 , 并对各组合的模型计算结果
进行了分析比较 . 综合分析比较表明 , 增补如图 1 所

图3 依据 SCH_L 绘制的 2003 年中国磁异常图

图注说明同图2

Fig. 3 Geomagnetic anomaly charts derived from SCH_L models in China for 2003

示的 38 个 IGRF 点,其效果最佳.由此可见,适当增补 IGRF 点是必要的、合理的.

5.2 地磁异常场是相对正常场而言的.本文选择了两种地磁正常场,一是国际参考地磁场 (IGRF),二是用泰勒多项式模型表示的中国参考地磁场 (CGRF).以 IGRF 为正常背景场的好处是世界各国(或各地区)有一个统一的、共同的地磁正常场,各国绘制的不同地区的地磁异常图便于比较.以 IGRF 为正常背景场的不足之处是对于我国大部分地区,地磁异常(如 $\Delta F, \Delta Z, \Delta Y$ 等)均为负异常,磁异常的分布不够均衡.以 CGRF 为正常背景场的好处是对于我国大部分地区,地磁异常有正有负,分布比较合理,其不足之处是不便于与我国邻近地区的磁异常进行比较.

5.3 不管是以 IGRF 为正常场,还是以 CGRF 为正常场,都是根据全部地磁测点的磁异常值($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$),用球冠谐分析方法计算相应磁异常的球冠谐模型,并以八阶球冠谐模型表示中国磁异常场的分

布(图2和图3).从图2和图3可以看出,根据球冠谐模型 SCH_{IGRF} (以国际参考地磁场为正常场)和 SCH_L (以泰勒多项式模型为正常场)所编绘的两套磁异常图,磁异常的基本形态是相似的,但正负异常分布的范围和强度大小是有差异的,这两套磁异常图之间的差异正是由于两种地磁正常场之间的差异造成的.

为清楚起见,本文计算并绘制了上述两种地磁正常场之差值(泰勒多项式模型减去球冠谐模型 IGRF)(图4).从图4可见,在所研究的区域内,大部分地区呈现负异常.比较图4与图2的磁异常,其总体轮廓一致,而图2比图4的相应的最大异常幅度大一些;这是由于 IGRF 模型是全球模型,主要反映地磁内源场的整体状况,而 CGRF 模型是中国模型,是由上述 2003 年地磁数值的多项式拟合得到的,其效果为实际数值的一种平滑.

综上所述,分别以 IGRF 和 CGRF 作正常场,得到图2与图3的异常场是有差别的.以 IGRF 为正常

场,用以研究大尺度的异常场;而以 CGRF 为正常场,可以探讨较小尺度的异常场。

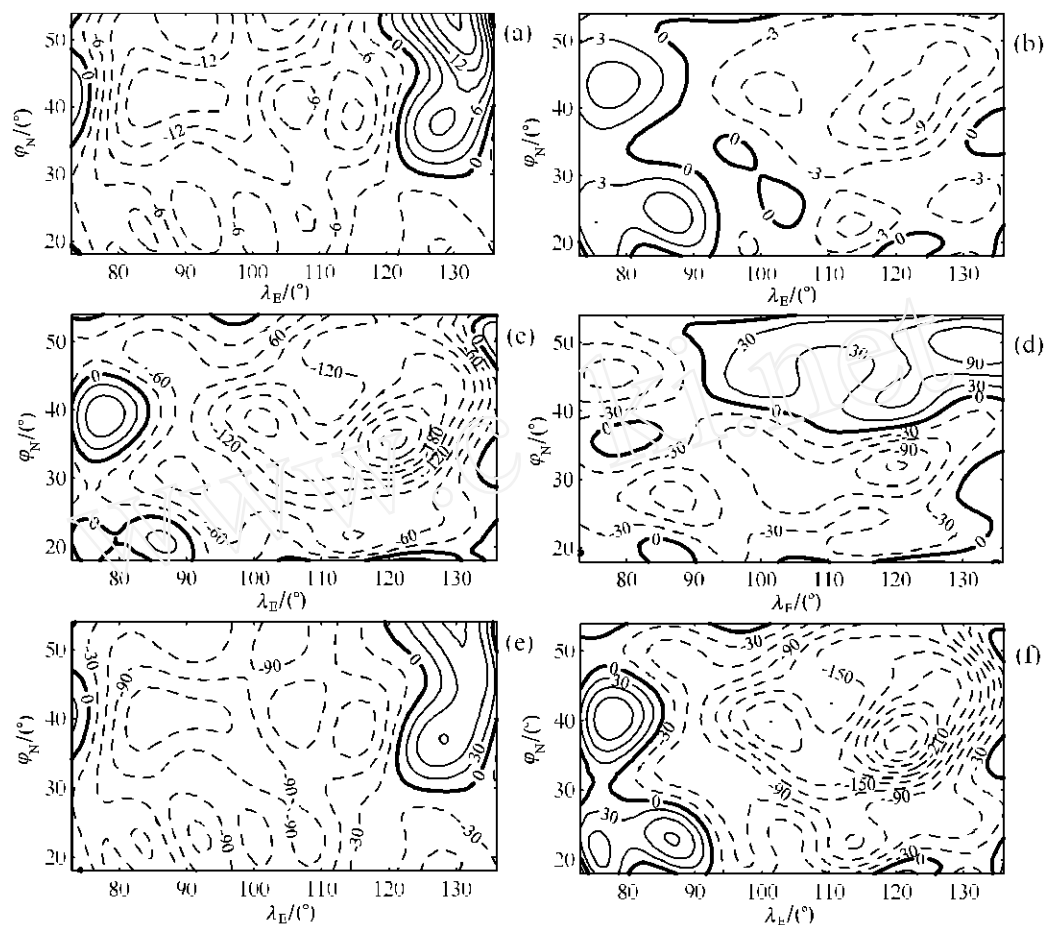


图 4 泰勒多项式模型与国际参考地磁场的差异

图注说明同图 2

Fig. 4 Difference between the Taylor polynomial model and IGRF for 2003

5.4 根据 135 个测点和 35 个台站以及 38 个 IGRF 计算点的地磁数据(图 1),本文给出了 2003 年中国地磁异常图。磁异常的分布形态和强度大小与使用的地磁测点的多少和分布状况密切相关,由于使用的地磁测点较少,因而只能给出地磁各个分量磁异常在我国分布的概况。要想了解地磁异常的较精细的结构,则需要大大增加地磁测点的数量。

审图号 GS(2004)733 号。

参考文献 (References)

- [1] 傅承义, 陈运泰, 祁贵仲. 地球物理学基础. 北京: 科学出版社, 1985
Fu C Y, Chen Y T, Qi G Z. Introduction to Geophysics (in Chinese). Beijing: Science Press, 1985
- [2] Langel R A. International geomagnetic reference field: the sixth generation. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1992, **44**: 679 ~ 708
- [3] IAGA Division V, Working group 8. International geomagnetic reference field 1995 revision. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1996, **47**: 1257 ~ 1261

- [4] IAGA Division V, Working Group 8. International geomagnetic reference field 2000. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2000, **120**: 39 ~ 42
- [5] Allredge L R. On regional magnetic charts. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1987, **39**: 723 ~ 738
- [6] Barton C E. Global and regional geomagnetic reference fields. *Exploration Geophysics*, 1988, **19**: 401 ~ 416
- [7] Haines G V, Newitt L R. Canadian geomagnetic reference field 1985. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1986, **38**(3): 895 ~ 921
- [8] Newitt L R, Haines G V. A Canadian geomagnetic reference field for epoch 1987.5. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1989, **41**(1): 249 ~ 260
- [9] Kóte M, Haok V. Modeling European magnetic repeat station and survey data by SCHA in search of time-variation anomalies. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2000, **122**(3 - 4): 205 ~ 220
- [10] Chen P C. A detailed geomagnetic survey of Pehpei District, Szechuan, China. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)*, 1948, **1**(2): 177 ~ 186
- [11] 安振昌, 徐元芳, 王月华. 1950—1980 中国地区主磁场模型的建立及分析. *地球物理学报*, 1991, **34**(5): 585 ~ 593

- An Z C, Xu Y F, Wang Y H. Derivation and analysis of the main geomagnetic field model in China for 1950 - 1980. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1991, **34** (5): 585 ~ 593
- [12] 安振昌. 青藏高原地磁场模型的研究. 地球物理学报, 2000, **43** (3): 339 ~ 345
- An Z C. Studies of geomagnetic field models over Qinghai-Xizang plateau. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2000, **43** (3): 339 ~ 345
- [13] 夏国辉, 郑双良, 吴莉兰等. 1980 年代中国地磁正常场图及其数学模式. 地球物理学报, 1988, **31** (1): 82 ~ 89
- Xia G H, Zheng S L, Wu L L, et al. The geomagnetic field chart of China in 1980.0 and the mathematical model. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1988, **31** (1): 82 ~ 89
- [14] Xu W Y, Xia G H, An Z C, et al. Magnetic survey and China GRF2000. *Earth Planet and Space*, 2003, **55** (4): 215 ~ 217
- [15] 徐文耀, 朱岗. 我国及临近地区地磁场的矩谐分析. 地球物理学报, 1984, **27** (6): 511 ~ 522
- Xu W Y, Tschu K K. A Study of the RHA for the geomagnetic field of China and neighbouring regine. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1984, **27** (6): 511 ~ 522
- [16] 朱岗, 徐文耀. 我国及邻近地区的嵌套式磁场模型. 地球物理学报, 1985, **28** (2): 133 ~ 141
- Tschu K K, Xu W Y. A nested geomagnetic model of China and neighbouring region. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1985, **28** (2): 133 ~ 141
- [17] 安振昌, 徐元芳, 夏国辉等. 表示局部地区地磁场及其长期变化分布的数学方法. 地球物理学报, 1982, **25** (增刊): 711 ~ 717
- An Z C, Xu Y F, Xia G H, et al. Mathematical methods to express the distribution of geomagnetic field and its secular variation in a local area. *Chinese J. Geophys (Acta Geophysica sinica)* (in Chinese), 1982, **25** (Suppl.): 771 ~ 717
- [18] 安振昌. 中国地区地磁场的球冠谐和分析. 地球物理学报, 1993, **36** (6): 753 ~ 764
- An Z C. Spherical cap harmonic analysis of geomagnetic field for China. *Chinese J. Geophys (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1993, **36** (6): 753 ~ 764
- [19] An Z C. Spherical cap harmonic analysis of the geomagnetic field and its secular variation in China for 2000. *Chinese J. Geophys.*, 2003, **46** (1): 85 ~ 91
- [20] 顾左文, 安振昌, 高金田等. 京津冀地区地磁场球冠谐分析. 地球物理学报, 2004, **47** (6): 61 ~ 66
- Gu Z W, An Z C, Gao J T, et al. Spherical cap harmonic analysis on the geomagnetic field in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2004, **47** (6): 61 ~ 66
- [21] Haines G V. Spherical cap harmonic analysis. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90** (B3): 2583 ~ 2592
- [22] An Z C, Tan D H, Wang Y H, et al. Spherical cap harmonic analysis of MAGSAT magnetic anomalies over Asia. *Chinese J. Geophys.*, 1998, **41** (1): 39 ~ 44