

2000 年中国地磁场及其长期变化冠谐分析

安 振 昌

中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100101

摘 要 根据 1998~2000 年完成的 118 个地磁测点和 39 个地磁台的三分量绝对测量资料以及 IGRF2000, 计算 2000 年中国地磁场冠谐模型(截断阶数为 8), 以及 2000~2005 年中国地磁长期变化冠谐模型(截断阶数为 6). 球冠极位于 36°N , 104°E , 球冠半角为 30° . 中国地磁场冠谐模型能更好地表示我国地磁场的时空变化, 地磁场模型的均方偏差为: 104.4 nT (X 分量), 103.3 nT (Y 分量), 123.9 nT (Z 分量). 依据地磁场及其长期变化的冠谐模型, 分别绘制 2000 年中国地磁图(F, X, Y, Z)和异常磁场图(F, X, Y, Z), 以及 2000~2005 年地磁长期变化图(F, X, Y, Z). 指出改善地磁场模型边界效应的途径, 并对如何布设地磁复测点提出了建议.

关键词 地磁场 地磁长期变化 冠谐模型 中国地磁参考场

文章编号 0001-5733(2003)01-68-05 中图分类号 P318 收稿日期 2001-11-19, 2002-07-19 收修定稿.

SPHERICAL CAP HARMONIC ANALYSIS OF THE GEOMAGNETIC FIELD AND ITS SECULAR VARIATION IN CHINA FOR 2000

AN ZHENCHANG

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract According to the three component absolute survey data of 118 geomagnetic stations observed during 1998~2000 and 39 geomagnetic observatories and IGRF 2000, the spherical cap harmonic models of the geomagnetic field for 2000 (the truncation order is 8), and the geomagnetic secular variation for 2000~2005 (the truncation order is 6) are calculated. The pole of the spherical cap is at 36°N and 104°E , and its half-angle is 30° . The spherical cap harmonic models of the geomagnetic field and its secular variation can better express the spatial-temporal variation of the geomagnetic field in China. The root mean square (RMS) deviations of the geomagnetic model are 104.4 nT for X , 103.3 nT for Y and 123.9 nT for Z . Based on the spherical cap harmonic models of the geomagnetic field and its secular variation, the geomagnetic charts (F, X, Y, Z), the anomaly charts (F, X, Y, Z) for 2000 and the secular variation charts (F, X, Y, Z) for 2000~2005 are drawn. The ways of improving the boundary effect of the geomagnetic model and arranging the repeat stations are suggested.

Key words Geomagnetic field, Geomagnetic secular variation, Spherical cap harmonic model, Chinese geomagnetic reference field.

1 引 言

地磁场模型是地磁学的重要研究内容. 地磁场模型在地球动力学、高空物理学以及地震预报等理论研究中有重要的学术价值; 在油气和矿产资源勘探、航空航海定向导航等国民经济和国防建设许多

领域有广泛的应用.

地磁场模型可分为全球模型和区域模型. 1968 年以来, 国际地磁和高空物理协会 (IAGA) 每 5 年给出一套国际地磁参考场 (IGRF), 即地磁场的全球谐模型. 目前已产生了第 8 代 IGRF^[1]. 人们可以用不同的数学方法计算地磁场的区域模型. 常用的方法是多项式方法、冠谐分析 (SCHA) 方法、矩谐分析

基金项目 国家自然科学基金重点项目 (49734140).

作者简介 安振昌, 男, 1940 年生. 1964 年毕业于中国科技大学地球物理系. 研究员. 主要从事地磁学研究. E-mail: zcan@c-geos15.c-geos.ac.cn

(RHA)方法^[2,3]. 安振昌等人^[4,5]用多项式方法计算 1950~1980 年中国地磁场泰勒多项式模型和 1980 年东亚地磁场的勒让德多项式模型,夏国辉等人计算了 1980 和 1990 年中国地磁场泰勒多项式模型^[6],徐文耀等人对中国地磁场进行了矩谐分析^[7].

2 计算方法

使用冠谐分析(SCHA)方法,计算 2000 年中国地磁场及其长期变化冠谐模型^[2]. 在球冠坐标系地磁异常场(X, Y, Z)可表示为

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

式中 λ 和 φ 分别是球冠坐标系中的经度和余纬, a 是地球的参考半径($a = 6371.2$ km), r 是离开地心的径向距离, $P_{n_k(m)}^m(\cos)$ 是非整数阶 $n_k(m)$ 和整数次 m 的 Schmidt 缔合 Legendre 函数. K_{\max} 代表冠谐分析中的最大截断阶数. 冠谐模型共有 $(K_{\max} + 1)^2$ 个系数,冠谐系数 g_k^m 和 h_k^m 是根据地磁场的观测值用最小二乘法确定的.

本文研究范围为 $18^\circ\text{N} \sim 54^\circ\text{N}$, $73^\circ\text{E} \sim 135^\circ\text{E}$, 球冠极位于 36°N 和 104°E , 球冠半角为 30° , 球冠坐标系的零经度线是经过地理极和球冠极的大圆. 地磁场的冠谐分析是在球冠坐标系内进行的,首先要将各个测点的地理坐标和地磁分量由球坐标系变换为球冠坐标系,然后在球冠坐标系内计算冠谐模型系数,并计算地磁场的模型值. 最后将地磁场的模型计算值由冠谐坐标系变换到球坐标系,并绘制相应图件和分析研究.

3 2000 年中国地磁场冠谐模型

3.1 使用资料

中国科学院地球物理研究所于 1998~2000 年

期间,在中国大陆共完成 118 个地磁复测点的三分量地磁绝对测量. 使用 DF100 型 DI 磁力仪测量磁偏角(D)和磁倾角(I),使用质子旋进磁力仪测量总强度(F). 将不同年份的观测值归算至 2000 年 1 月 1 日(其中包括西沙和南沙群岛 2000 年的归一化值),这 120 个地磁测点是计算 2000 年中国地磁场模型的最基本的地磁资料,还使用了中国科学院和中国地震局 39 个地磁台 2000 年的年均值(D, I, F).

为了改善中国地磁场模型的边界效应,在中国边界外围没有地磁资料的地区均匀增补 36 个地点的 IGRF2000 计算值.

中国地磁场冠谐模型是表示地磁场的趋势分布,为此删除那些磁异常值较大的地磁测点. 本文选取的删除标准为

$$\left\{ \begin{array}{l} |X| = |X_{\text{obs}} - X_{\text{IGRF}}| > 500 \text{ nT}, \\ \text{或} |Y| = |Y_{\text{obs}} - Y_{\text{IGRF}}| > 500 \text{ nT}, \\ \text{或} |Z| = |Z_{\text{obs}} - Z_{\text{IGRF}}| > 500 \text{ nT}. \end{array} \right. \quad (2)$$

式中 $X_{\text{obs}}, Y_{\text{obs}}, Z_{\text{obs}}$ 代表测点的观测值, $X_{\text{IGRF}}, Y_{\text{IGRF}}, Z_{\text{IGRF}}$ 表示根据 IGRF2000 计算的某测点的理论值,

X, Y, Z 表示磁异常值(或称剩余磁场值). 根据这一标准共删除 10 个地点的资料(其中包括 4 个地磁台,6 个地磁测点),我们将根据这 149 个地点的实测值(包括 114 个复测点和 35 个地磁台)以及 36 个地点的 IGRF 计算值,共计 185 个地点的地磁资料计算 2000 年中国地磁场冠谐模型.

3.2 计算结果

根据上述 185 个地点的地磁场异常值(X, Y, Z)和绝对值(X, Y, Z),依照公式(1)计算不同阶数($K=1 \sim 14$)的异常场冠谐模型(X, Y, Z)和地磁场冠谐模型(X, Y, Z). 图 1a 表示异常场冠谐模型均方偏差(RMS)随阶数(K)的变化,图 1b 表示地磁场冠谐模型均方偏差(RMS)随阶数(K)的变化.

图 1a 表明异常场(X, Y, Z)冠谐模型的均方偏差随 K 增加而缓慢减小,图 1b 表明地磁场(X, Y, Z)冠谐模型的均方偏差随 K 的变化趋势是不同的,当 $K=1 \sim 7$ 时,RMS 值快速减小,但当 $K=8$ 时,RMS 值基本趋于稳定. 因此选取 8 阶冠谐模型表示中国地磁异常场(F, X, Y, Z)的分布(图 2).

根据 2000 年国际地磁参考场(IGRF2000)和本文计算的 2000 年中国地磁异常场冠谐模型(SCHA2000),就可以得到 2000 年中国地磁参考场(CGRF2000),即

$$\text{CGRF2000} = \text{IGRF2000} + \text{SCHA2000}, \quad (3)$$

依据 CGRF2000 可以绘制 2000 年中国地磁图(图 3).

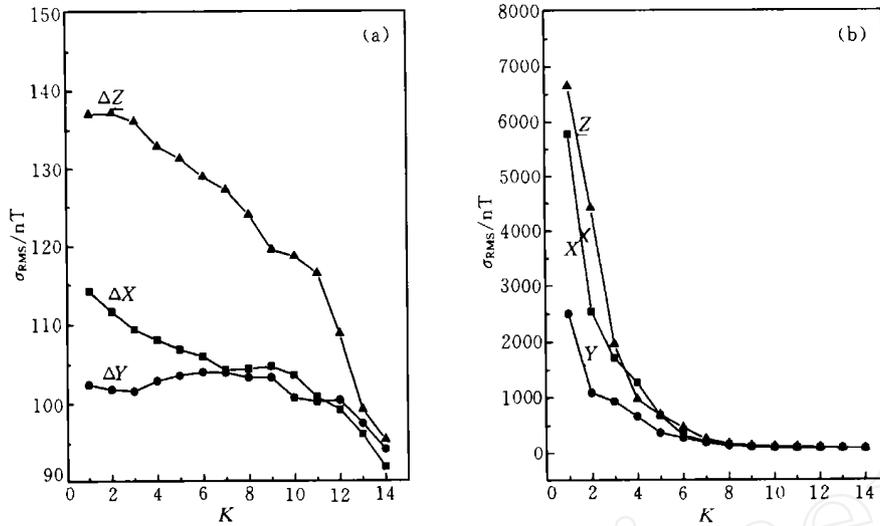


图 1 不同阶数 (K) 冠谐模型的均方偏差 (RMS)

(a) 地磁异常场 (X, Y, Z); (b) 地磁场 (X, Y, Z).

Fig. 1 RMS values of SCHA models with different order (K)

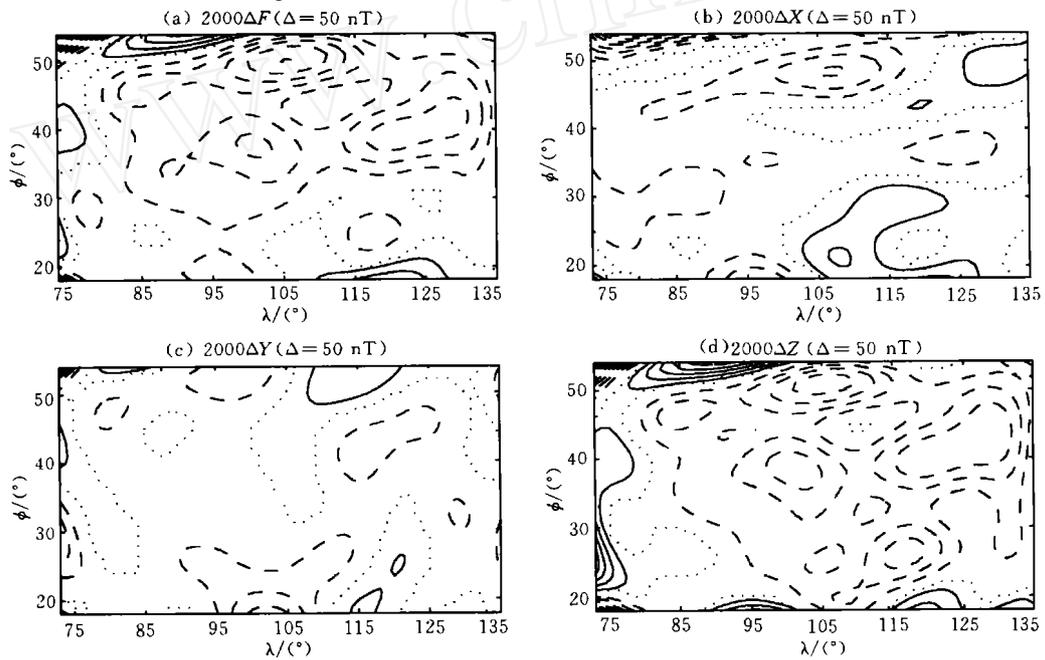


图 2 根据 8 阶冠谐模型绘制的 2000 年中国磁异常图

(a) F ; (b) X ; (c) Y ; (d) Z .

(点线表示零线, 实线为正异常, 虚线为负异常)

Fig. 2 Geomagnetic anomaly charts in China for 2000 constructed by 8-order SCHA model

4 2000 ~ 2005 年中国地磁长期变化冠谐模型

4.1 使用资料

从中国地磁台网选取 37 个地磁台计算磁偏角、年变率 (X, Y, Z), 可由下式计算

磁倾角、水平强度和总强度 2000 年的年变率 (分别用 D, I, H 和 F 表示). 从同时具备 1990 年和 2000 年两次地磁测量资料的中国地磁复测点网选取 60 个地磁测点, 计算磁偏角、磁倾角、水平强度和总强度的年变率 (D, I, H, F). 为了得到上述地磁台和地磁测点北向分量、东向分量和垂直分量 2000 年的

$$\begin{cases} X = \cos D \cdot H - H \sin D \cdot D, \\ Y = \sin D \cdot H + H \cos D \cdot D, \\ Z = (F \cdot F - H \cdot H) / Z. \end{cases} \quad (4)$$

与计算地磁场冠谱模型一样,为了改善长期变化冠谱模型的边界效应,在中国外围地区增补 36 个地点,根据 IGRF2000 和 2000~2005 年长期变化系数计算北向分量、东向分量和垂直分量的年变率(X, Y, Z).

4.2 计算结果

根据上述 133 个地点的年变率(X, Y, Z),利用公式(1)计算 2000~2005 年中国地磁长期变化冠谱模型. 计算了 $K=1 \sim 10$ 的长期变化冠谱模型的均方偏差. 经与根据最新的第 8 代 IGRF 绘制的 2000~2005 年中国地区长期变化等变线图比较,选择 $K=6$ 的长期变化冠谱模型作为 2000~2005 年中国地磁长期变化模型. 图 4 是根据这一模型绘制的 2000~2005 年中国地磁长期变化图(F, X, Y, Z).

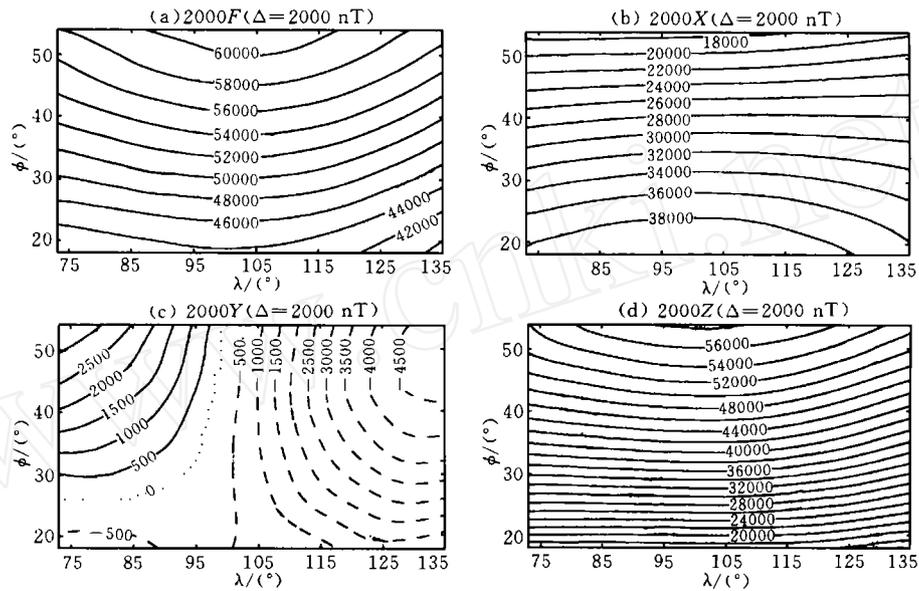


图 3 根据中国地磁参考场冠谱模型绘制的 2000 年中国地磁图
(a) F ; (b) X ; (c) Y ; (d) Z .

Fig.3 Geomagnetic charts in China for 2000 derived from CGRF 2000

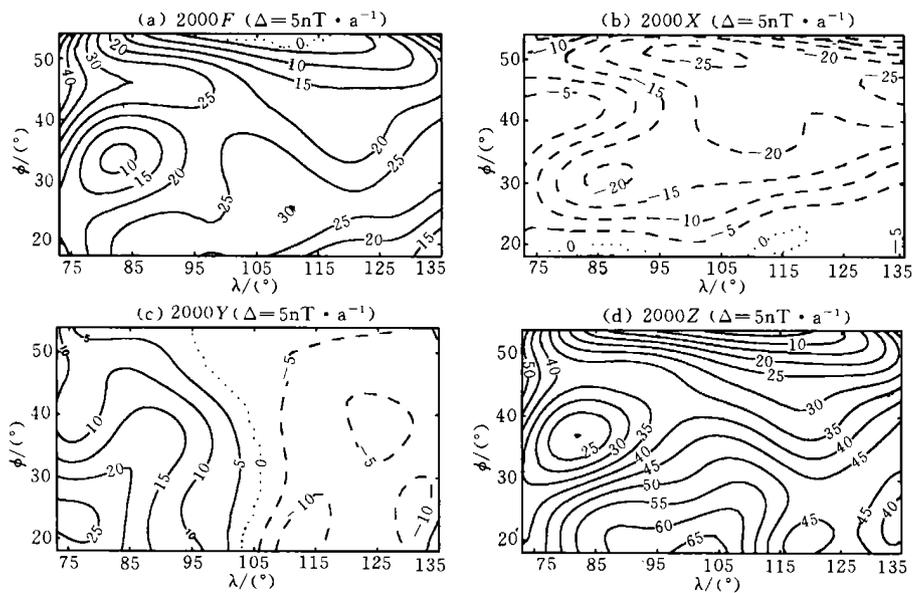


图 4 根据 6 阶冠谱模型绘制的 2000~2005 年中国地磁长期变化图
(a) F ; (b) X ; (c) Y ; (d) Z .

Fig.4 Geomagnetic secular variation charts in China for 2000~2005 constructed by 6-order SV SCHA model

5 结论与讨论

5.1 根据最新的中国地磁测量资料、地磁台站资料以及最新的 IGRF 球谐模型,首次用冠谐分析方法计算 2000 年中国地磁场冠谐模型和 2000 ~ 2005 年中国地磁长期变化冠谐模型. 依据这些模型绘制了 2000 年中国地磁图和 2000 ~ 2005 年中国地磁长期变化图.

5.2 中国地磁参考场 (CGRF) 比国际地磁参考场 (IGRF) 能更好地表示中国地区地磁场的时空变化. 例如本文给出的 2000 年中国地磁场 8 阶冠谐模型的均方偏差, X 分量为 104.4 nT, Y 分量为 103.3 nT, Z 分量为 123.9 nT; IGRF2000 相应的均方偏差分别为 114.2 nT (X 分量), 104.0 nT (Y 分量), 157.3 nT (Z 分量). IGRF 主要表示地核场在地球表面的分布, 所表示的最短波长为 4000 km. CGRF 不仅表示地核场的分布, 而且能表示来自岩石层长波长磁异常的分布. 本文计算的 8 阶冠谐模型相当于 25 阶的球谐模型, 所表示的最短波长为 1600 km, 所以本文计算的中国地磁参考场能更好地表示中国地磁场的三维结构.

5.3 本文给出的地磁长期变化冠谐模型是一个预报模型, 即根据地磁长期变化的过去和现在预报其将来的变化, 有效使用期为 5 年 (2000 ~ 2005 年). 假设在这 5 年内, 长期变化是线性变化 (年变率为常数). 由于地磁长期变化的复杂性, 所以几年以后 (通常为 5 年) 要根据新的地磁台年均值以及新的地磁复测点资料, 重新计算新的地磁长期变化模型, 以便更好地表示地磁场的时空变化. 过去我国每 10 年给出一个长期变化模型. IAGA 每 5 年给出一个 IGRF 的长期变化模型. 建议今后我国也应每 5 年计算一个新的地磁长期变化模型.

5.4 地磁场模型 (多项式模型、冠谐模型、矩谐模型) 都有边界效应问题. 如何改善地磁场模型的边界效应? 这是人们关注的问题, 本文给出了解决这一问题的途径. 原则上讲, 在测区周边地区要有地磁资料, 最好是有实测地磁资料; 如果没有测量资料, 则可根据 IGRF 球谐系数计算和补充某些地点的磁场值. 我们在中国周边地区增补 36 个地点的 IGRF2000 计算值, 这样在整个研究区域 ($18^{\circ}\text{N} \sim 54^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ}\text{E} \sim 135^{\circ}\text{E}$) 有较均匀分布的地磁资料, 从

而使中国地磁场冠谐模型的边界效应明显改善 (图 2).

5.5 高质量的地磁复测点资料是分析研究地磁长期变化的重要资料, 是对数量不够多、分布不够均匀的地磁台资料的很好补充. 为了充分发挥地磁复测点的作用, 地磁复测点应满足以下要求: (1) 复测点位置应保持不变, 可以在不同年代严格重复测量. (2) 复测点环境应保持不变, 对测量结果没有影响. (3) 复测周期应尽量缩短 (最好每 5 年复测一次), 以尽量满足地磁长期变化是线性变化的要求. 只有同时满足上述 3 点要求的地磁复测点资料才能用来分析研究地磁场的长期变化. 另外, 地磁复测点的布局应当合理, 在地磁台站较多的我国东部地区, 地磁复测点的数量可少些. 相反, 在台站较少的西部地区以及靠近边界的地区, 地磁复测点的数量可多些.

作者感谢夏国辉研究员提供有关的地磁资料和魏自刚博士的大力帮助.

参考文献

- [1] IAGA Division V, Working group 8. IGRF-2000. *Geophys. J. Int.*, 2000, **141**: 259 ~ 262
- [2] Haines G V. Spherical cap harmonic analysis. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90** (B3): 2583 ~ 2592
- [3] Allredge L R. Rectangular harmonic analysis applied to the geomagnetic field. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86** (B4): 3021 ~ 3026
- [4] 安振昌, 徐元芳, 王月华. 1950 ~ 1980 年中国地区主磁场模型的建立及其分析. *地球物理学报*, 1991, **34** (5): 585 ~ 593
AN Zhenchang, XU Yuanfang, WANG Yuehua. Derivation and analysis of the main geomagnetic field models in China for 1950-1980. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)*, 1991, **34** (5): 585 ~ 593
- [5] 安振昌, 谭东海, Golovkov V P 等. 1980.0 年东亚地磁场的勒让德多项式模型. *地球物理学报*, 1995, **38** (2): 227 ~ 233
AN Zhenchang, TAN Donghai, Golovkov V P, et al. Legendre polynomial models of the geomagnetic field over the Eastern Asia at epoch 1980.0. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)*, 1995, **38** (2): 227 ~ 233
- [6] 夏国辉, 郑双良, 吴莉兰等. 1980 年中国地磁正常场图及其数学模型. *地球物理学报*, 1988, **31** (1): 82 ~ 89
XIA Guohui, ZHENG Shuangliang, WU Lelan, et al. The geomagnetic field chart of China in 1980.0 and the mathematical model. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)*, 1988, **31** (1): 82 ~ 89
- [7] 徐文耀, 朱岗. 我国及邻近地区地磁场的矩谐分析. *地球物理学报*, 1984, **27** (6): 511 ~ 522
XU Wenyao, TSCHU Kangkun. A study of the RHA for the geomagnetic field of China and neighbouring region. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)*, 1984, **27** (6): 511 ~ 522