

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2025.02.014

基于 EMM2017 模型和地面台站数据的 中国地区岩石圈磁场建模

杨琳青¹, 赵旭东^{1,2}

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;
2. 国家地磁台网中心, 北京 100081)

摘要: 首先, 对 2017 年中国地磁台网中心的 39 个地面绝对观测数据进行预处理, 综合考虑了主磁场、主磁场的长期变化场、电离层磁场及磁层磁场对岩石圈磁场的影响, 并进行剔除。在建模过程中, 补充 EMM2017 模型的岩石圈磁场值以控制边界效应问题。最后, 通过球冠谐分析建立了中国地区岩石圈磁场模型。研究结果表明, X 分量在中国大部分地区呈东西横向分布, 正负磁异常相间; 而 Y 分量基本呈南北纵向分布。 F 分量与 Z 分量比较相似, 在塔里木盆地、四川盆地附近存在高值磁异常, 在青藏高原南部存在东西向的低值磁异常。

关键词: 球冠谐分析; 岩石圈磁场; EMM2017 模型; 国际地磁参考场模型; CHAOS 模型

中图分类号: P318

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2025)02-0129-08

Lithospheric magnetic field modeling in China based on EMM2017 and surface vector data

YANG Linqing¹, ZHAO Xudong^{1,2}

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;
2. Center of Geomagnetic Network of China, Beijing 100081, China)

Abstract: The absolute observation data of 39 geomagnetic observatories in the Geomagnetic Network of China in 2017 are pre-processed. The effects of the main magnetic field, secular variation field, ionospheric magnetic field and magnetospheric magnetic field on the lithospheric magnetic field are considered and removed. During the modeling process, the lithospheric values from the enhanced magnetic model 2017 (EMM2017) are replenished to control the boundary effect problem. Finally, the lithospheric magnetic field model of China is generated by the spherical cap harmonic model. The results show that the X component has an east-west horizontal distribution with positive and negative magnetic anomalies alternating in China, while the Y component has a north-south vertical distribution. The F component is similar to the Z component, with high-value magnetic anomalies in the Tarim Basin and Sichuan Basin, and east-west distributed low-value magnetic anomalies in the south of the Tibetan Plateau.

Key words: Spherical cap harmonic analysis; Lithospheric magnetic field; Enhanced magnetic model 2017

收稿日期: 2024-10-23; 修订日期: 2024-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(42374092); 中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项(DQJB23X15); 国家重点研发计划(2023YFC3007404)

作者简介: 杨琳青(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事地磁场模型构建方面的研究。

通信作者: 赵旭东(1983—), 男, 博士, 研究员, 主要从事地磁与空间电流方面的研究。

(EMM2017); International geomagnetic reference field(IGRF) model; CHAOS model

0 引言

地磁场是由地球内部(地核、地幔及地壳)不同构造部分的磁性物质和动力学过程,以及地球内部和外部电流体系产生的各种磁场组合叠加的结果。根据场源位置及其变化规律,地磁场可分为内源场(主磁场、地壳磁场及感应磁场)和外源场(电离层源磁场、磁层源磁场),分别占地磁场总成分的99%和1%。磁场模型的建立在研究磁场能量分布、计算地球内部结构及导航定位等方面都有应用。从全球地磁场中减去地核主磁场、变化磁场及其感应磁场后,得到许多大小尺度不等、正负相间分布的残余磁场,称为岩石圈磁场,也称为磁异常场或地壳场,是地磁场的重要组成部分,其强度约占地磁场总强度的4%^[1-4]。一方面,磁异常研究具有重要的理论意义,通过研究岩石圈磁场,可以更加了解地质结构、地壳组成以及对应的地表热流分布、地壳深度和居里等温面深度;另一方面,磁异常研究具有重要的经济价值,磁异常往往与磁性矿物的分布有关,磁法勘探在金属矿构造和油气藏区域构造勘探中占有重要地位^[5-6]。

目前,国际上使用较多的主磁场模型是国际地磁参考场(international geomagnetic reference field, IGRF)模型,该模型每5年更新一次,描述了从1900年—2025年的地球主磁场。IGRF-13是由英国地质调查局参与创建的第13代国际地磁参考场,由世界各地地磁学家参与合作完成,得到了国际地磁学和大气物理学协会(international association of geomagnetism and aeronomy, IAGA)的认可,IGRF-13模型的球谐阶数可以达到13阶^[7]。在目前主流的地磁场模型中,EMM2017(enhanced magnetic model 2017)的空间分辨力较高,能够描述更为全面的磁场信息。该模型结合了世界磁模型(world magnetic model, WMM)主磁场模型、美国国家地球物理数据中心-720(national geophysical data center-720, NGDC-720)岩石圈磁场模型和地球磁异常网格2弧分分辨率第3版(Earth magnetic anomaly grid at 2 arc min resolution version 3, EMAG2v3)磁异常网格等数据。EMM2017模型的球谐阶数可以达到790阶,其中,1~15阶为地球的主磁场,16~790阶为岩石圈磁场^[8-10]。

区域模型是应用区域地磁数据,根据不同的数学物理方法建立的地磁场模型。常见的区域模型包括:1) Taylor 多项式模型,该模型系数较少、计算量小,适合建立大尺度地磁场模型,但不符合地磁场的位势理论要求^[11-12];2) 曲面 Spline 模型,该模型能较好地刻画空间分布复杂的岩石圈磁场,但是计算量较大,且系数不正交,无法通过功率谱分析解释磁场^[13];3) 矩谐分析(rectangular harmonic analysis, RHA)模型由 Alldredge 等于1981年提出,该模型可以得到三维空间磁场结构,但适用于小范围磁场建模,随着研究范围的增大,其误差也会增大^[14];4) 球冠谐分析(spherical cap harmonic analysis, SCHA)模型,该模型由 Haines 于1985年提出,是球谐分析(spherical harmonic analysis, SHA)方法的延伸,可以利用区域观测数据对较短波长的地磁场信息进行拟合,满足地磁场位势理论要求,是目前最常用的区域建模方法之一^[15-16]。

由于 EMM2017, CHAOS 等岩石圈磁场模型缺少中国地区地面观测数据的支持,难以描述中国地区复杂的岩石圈磁场变化。因此,本文利用中国地磁台网中心(geomagnetic network of China, GNC)的地面数据及 EMM2017 模型作为补充数据,通过 SCHA 建立中国地区的岩石圈磁场。本文第1章阐述了建模所用的数据与方法,第2章展示了岩石圈磁场模型,第3章给出了相应的结论。

1 数据与方法

1.1 数据

建模的数据为地面台站观测数据和 EMM2017 模型岩石圈磁场数据。首先,需要对地面观测数据进行预处理,即静日筛选以及通过 CHAOS-7.16 模型和 IGRF-13 模型进行场源分离,从而得到较为干净的地面台站岩石圈磁场值。然后,计算补充点 EMM2017 岩石圈磁场值。最后,利用球冠谐模型进行岩石圈磁场建模。具体的数据处理流程如图1所示。

1.1.1 地面数据

本文所使用的地面数据为 GNC 2017 年 38 个地磁基准站的绝对观测数据。这些观测数据包括 7 个地磁要素的数据产品,分别为北向分量 X 、东向分量 Y 、垂直分量 Z 、水平磁场强度 H 、总磁场强度

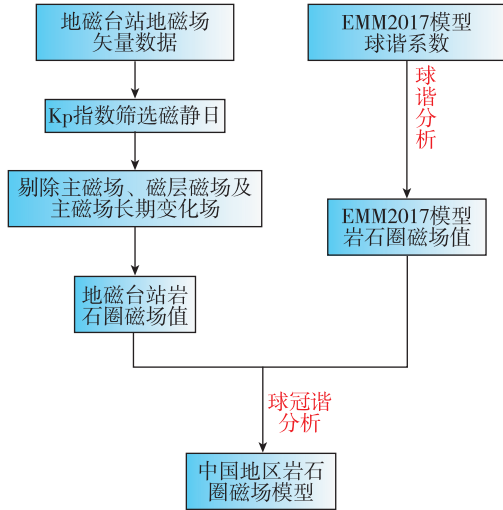


图 1 数据处理流程

Fig. 1 Flow of data processing

F 、磁偏角 D 及磁倾角 I 。本文主要利用 X, Y, Z 分量的分均值数据进行模型构建。

由于地面观测数据中包含了主磁场、岩石圈磁场、电离层磁场和磁层磁场。因此,在进行岩石圈磁场建模时,需要根据式(1)获得较为干净的岩石圈磁场值^[17]。

$$B_L = B_T - (B_M + B_1 + B_C) \quad (1)$$

其中: B_L 为岩石圈磁场; B_T 为地面数据; B_M 为磁层磁场; B_1 为电离层磁场; B_C 为主磁场。

由于夜间电离层电导率远低于白天,本文利用日本京都大学世界地磁数据中心(world data center for geomagnetism, WDCG)提供的 K_p 指数,选择当地时间 00:00~2:00, $K_p < 2_+$ 的数据减少电离层电流对磁场的影响。之后,根据 CHAOS-7.16 模型提供的近磁层和远磁层数据,剔除磁层磁场的影响^[18]。在成功剔除外源磁场的影响后,将 GNC 地磁台站的分均值数据按月进行平均。

由于主磁场存在长期变化(secular variation, SV),直接对数据进行年均值处理会引入误差。因此,本文将所有数据归算到 2017 年 1 月,具体步骤如下:由于长期变化场的线性变化部分要远大于非线性变化,首先根据式(2)进行差分运算并除以月间距,得到 SV 的月变化率;接着,利用式(3)从每个月的月均值中扣除相应的 SV,得到修正后的月均值;最后,对修正数据进行年平均,并利用 IGRF-13 模型剔除主磁场。

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{B(t_{12}) - B(t_1)}{12} \quad (2)$$

$$B(t_i) = B(t_i) - \frac{\partial B}{\partial t} \times (i - 1) \quad (3)$$

其中: B 为地磁场分量月均值; t 为表示月的时间单位;下标 i 为对应的月份。

1.1.2 EMM2017 模型数据

在建立区域模型时,中国新疆、西藏及边界区域地磁台站的分布比较稀疏。在建立磁场模型的过程中,当缺少区域观测资料时,很难准确描述岩石圈磁场的空间分布特征,而且随着截断阶数的增大,边界效应会更加严重^[19]。因此,本文在观测数据比较稀疏的地区,利用 EMM2017 模型岩石圈磁场值作为补充,以控制边界效应的影响。在补充边界点时,本文以 5° 为间隔进行数据点补充,但在 GNC 地磁台站经纬度 5° 附近则不进行数据补充,其具体分布如图 2 所示。其中,红色圆圈和蓝色五角星分别为 GNC 和 EMM2017 模型的地理位置,EMM2017 模型数据点总计补充 120 个。

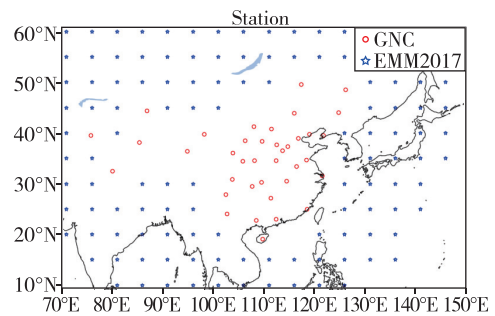


图 2 地磁台站分布

Fig. 2 Distribution of geomagnetic stations

EMM2017 模型采用 SHA 方法进行全球磁场建模。本文利用 EMM2017 模型(<https://www.ncei.noaa.gov/products/enhanced-magnetic-model>)提供的 16~790 阶球谐系数 g_n^m 和 h_n^m , 通过 SHA 方法计算得到图 2 坐标位置处的岩石圈磁场值,其具体的计算过程参考文献[5]。

1.2 球冠谐模型

SCHA 方法是 Haines 于 1985 年提出的,可以看作是 SHA 的延伸。该方法在地球某一球冠部分进行 SHA,符合地磁场位势理论,其解的形式与球谐级数相似,但施密特准归一化的缔合勒让德函数的阶数不再为整数,用 $n_k(m)$ 表示^[15,20-21]。Haines 认为,通过选择合适的基函数可以满足 SCHA 的边界条件,如式(4)所示。

$$\frac{dP_{n_k(m)}^m(\cos\theta)}{d\theta} = 0, k - m = \text{even}$$

$$P_{n_k(m)}^m(\cos\theta) = 0, k - m = \text{odd} \quad (4)$$

式中, $P_{n_k(m)}^m(\cos\theta)$ 是施密特准归一化的缔合勒让德函数。其中, 对于确定的 m , 可通过式(4) 确定非整数阶 $n_k(m)$ 。在求解得到 $n_k(m)$ 后, 可以通过球冠坐标系下三分量的表达式得到球冠谐系数 g_k^m 和 h_k^m , 具体计算过程请参考文献[15]和文献[17]。

在得到岩石圈磁场 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 分量之后, 可以利用式(5)计算得到磁异常值 ΔF 。

$$\Delta F = \frac{B_{CX}}{B_{CF}}\Delta X + \frac{B_{CY}}{B_{CF}}\Delta Y + \frac{B_{CZ}}{B_{CF}}\Delta Z \quad (5)$$

其中, $B_{CX}, B_{CY}, B_{CZ}, B_{CF}$ 分别为主磁场的 X, Y, Z, F 分量^[22]。

2 中国地区岩石圈磁场模型

2.1 模型构建与分析

本文在进行 SCHA 时, 球冠以(35°N, 105°E)为中心, 球冠半角为 35°。为了建立中国地区的岩石圈磁场, 首先要确定合适的截断阶数。对于基于数据拟合的区域模型而言, 截断阶数过低, 则无法反映磁场的实际分布情况, 尤其是空间分布比较复杂的岩石圈磁场; 而截断阶数过高, 则会出现过拟合的现象, 不能准确描述边界地区的岩石圈磁场分布。因此, 本文根据 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 分量的均方根误差判断模型阶数, 如式(6)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (B_{oi} - B_{Ei})^2}{N}} \quad (6)$$

其中, B_{oi} 和 B_{OE} 分别为台站观测值和模型值, 字母 B 可为 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 中的任一分量。

图 3 所示为不同截断阶数下的均方根误差。在 $K_{\max} = 1 \sim 15$ 阶期间, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 分量的均方根误差分别减小了 12.07%, 3.42%, 37.10%。其中 X 和 Y 分量在 11~15 阶基本平稳。然而, 当截断阶数达到 16 时, 其均方根误差开始增大, 出现了过拟合现象。综上所述, K_{\max} 最大值取 15。当 $K_{\max} = 15$ 时, $\Delta X, \Delta Y$ 和 ΔZ 的均方根误差分别为 62.41 nT, 56.55 nT 和 59.74 nT。通过式(4)计算得到 $n_k(m)$, 具体数值如表 1 所示。其中, $n_k(m)$ 的最大值为 39.36, 在地球表面的等效波长为 $\frac{2\pi a}{n_k(m)} \approx 1\,017.06$ km, 对应于 40 阶球谐模型。对应的球冠谐模型系数 g_k^m 和 h_k^m 共计 $(K_{\max} + 1)^2 = 256$ 个, 具体如表 2 所示。

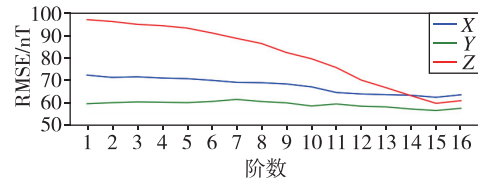


图 3 SCHA 下不同阶数的均方根误差

Fig. 3 Root mean square error for different orders in SCHA

表 1 球冠半角 $\theta = 35^\circ$ 的 $n_k(m)$ 值

Tab. 1 $n_k(m)$ values for half angle of spherical cap $\theta = 35^\circ$

k	m															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	3.43	2.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	5.79	5.79	4.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	8.53	8.26	7.98	6.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	11.00	11.00	10.55	10.01	8.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	13.66	13.50	13.33	12.75	12.14	10.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	16.16	16.16	15.87	15.57	14.89	14.16	12.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	18.80	18.68	18.56	18.16	17.76	16.98	16.14	14.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	21.32	21.32	21.10	20.88	20.40	19.91	19.04	18.11	16.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	23.94	23.84	23.75	23.45	23.14	22.59	22.02	21.08	20.01	17.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	26.47	26.47	26.29	26.16	25.74	25.37	24.75	24.11	23.09	22.00	19.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	29.08	29.00	28.92	28.68	28.43	28.00	27.56	26.88	26.17	25.09	23.92	21.52	0.00	0.00	0.00	0.00
12	31.62	31.62	31.47	31.32	31.02	30.71	30.22	29.72	28.98	28.22	27.07	25.84	23.35	0.00	0.00	0.00
13	34.22	34.16	34.09	33.88	33.67	33.31	32.95	32.41	31.85	31.06	30.24	29.04	27.74	25.16	0.00	0.00
14	36.76	36.76	36.64	36.51	36.25	35.99	35.58	35.16	34.57	33.97	33.13	32.26	31.00	29.64	26.98	0.00
15	39.36	39.31	39.25	39.07	38.89	38.58	38.27	37.81	37.35	36.72	36.07	35.18	34.26	32.95	31.53	28.79

表 2 中国地区模型误差 15 阶球冠谐模型系数 g_k^m 和 h_k^m

Tab. 2 The coefficients g_k^m and h_k^m of spherical cap harmonic model in China

nT

k	m	g_k^m	h_k^m	k	m	g_k^m	h_k^m	k	m	g_k^m	h_k^m	k	m	g_k^m	h_k^m
0	0	757.15	0.00	7	6	-24 838.61	-8 131.66	11	3	-98.87	-7 574.62	13	11	-12 347.31	16 253.67
1	0	-1 157.78	0.00	7	7	-14 369.95	2 501.31	11	4	5 376.50	235.29	13	12	60 128.73	-4 167.66
1	1	-1 021.47	-408.54	8	0	11 740.40	0.00	11	5	-2 245.09	-4 289.08	13	13	-1 963.10	-30 321.42
2	0	1 723.16	0.00	8	1	-13 375.79	-4 860.14	11	6	37 685.23	30 374.92	14	0	-5.56	0.00
2	1	3 513.72	1 780.26	8	2	13 583.51	-43 177.84	11	7	1 521.20	8 392.68	14	1	-37.32	-27.43
2	2	6 123.90	-1 918.59	8	3	-1 351.49	-3 267.48	11	8	-61 253.48	11 007.09	14	2	54.78	-197.52
3	0	-2 219.70	0.00	8	4	16 949.23	-2 014.40	11	9	-39 358.83	-29 614.86	14	3	249.30	131.71
3	1	-5 613.41	-3 842.61	8	5	526.92	-12 253.29	11	10	-6 217.14	-21 520.90	14	4	646.15	-122.79
3	2	-19 868.06	8 171.31	8	6	41 687.64	-5 924.05	11	11	-19 953.38	-1 069.42	14	5	555.73	1 611.34
3	3	-1 468.47	2 537.75	8	7	26 353.64	-11 818.37	12	0	-63.20	0.00	14	6	-9 783.53	127.98
4	0	3 733.53	0.00	8	8	-14 863.69	-3 576.16	12	1	-473.60	-708.36	14	7	-6 385.40	3 697.35
4	1	3 637.32	5 463.58	9	0	-7 010.22	0.00	12	2	2 224.52	-4 296.95	14	8	7 479.22	84.65
4	2	35 890.36	-19 102.42	9	1	7 745.53	4 945.68	12	3	1 549.44	3 535.56	14	9	15 176.84	-3 167.39
4	3	6 433.37	-8 830.05	9	2	-8 656.39	3 2167.48	12	4	-196.94	-657.61	14	10	27 025.09	-4 313.59
4	4	6 316.12	-2 688.36	9	3	5 452.27	-6 597.76	12	5	-264.68	5 671.65	14	11	4 904.41	-10 927.62
5	0	-7 326.75	0.00	9	4	2 238.12	-610.77	12	6	-43 019.31	-15 538.83	14	12	-35 977.53	1 756.37
5	1	3 334.95	-4 888.01	9	5	-9 195.52	8 508.10	12	7	-14 218.50	2 496.57	14	13	3 227.39	20 891.29
5	2	-44 300.71	33 500.98	9	6	-31 043.94	27 305.41	12	8	52 824.31	-5 773.80	14	14	-10 006.01	14 360.30
5	3	-12 302.92	16 503.97	9	7	-30 168.38	20 076.77	12	9	46 606.67	12 430.99	15	0	0.09	0.00
5	4	-20 537.23	5 966.45	9	8	-3 600.02	9 293.81	12	10	37 893.64	9 771.74	15	1	0.62	0.49
5	5	12 857.42	2 073.30	9	9	-3 970.00	-22 440.59	12	11	18 352.09	-10 794.52	15	2	-1.11	3.05
6	0	11 544.52	0.00	10	0	2 798.61	0.00	12	12	-59 326.95	4 115.41	15	3	-8.87	1.54
6	1	-12 184.89	1 571.60	10	1	-3 115.80	-3 455.60	13	0	51.39	0.00	15	4	-64.05	5.26
6	2	39 136.44	-44 619.32	10	2	7 088.52	-20 505.11	13	1	197.71	196.08	15	5	-236.11	-374.00
6	3	13 582.26	-19 970.93	10	3	-3 463.37	10 005.31	13	2	-545.02	1 200.25	15	6	1 658.93	-321.56
6	4	33 939.83	-7 689.83	10	4	-9 228.32	731.36	13	3	-1 003.04	-1 030.12	15	7	1 388.13	-991.23
6	5	-18 756.38	-6 154.44	10	5	7 581.95	-1 177.89	13	4	-1 356.30	424.15	15	8	-944.33	-126.60
6	6	4 525.73	9 705.97	10	6	-4 294.30	-37 524.64	13	5	-167.90	-3 912.00	15	9	-3 413.12	1 302.95
7	0	-13 622.06	0.00	10	7	17 652.78	-18 759.13	13	6	26 642.05	3 919.68	15	10	-6 910.06	1 563.42
7	1	16 093.20	2 329.52	10	8	38 023.09	-13 029.05	13	7	13 511.69	-5 955.93	15	11	-935.27	3 107.44
7	2	-24 683.81	47 993.89	10	9	19 795.78	33 482.63	13	8	-26 351.89	1 396.58	15	12	8 425.22	-366.38
7	3	-7 680.65	1 4991.03	10	10	-20 073.62	23 125.21	13	9	-34 956.76	201.83	15	13	-1 879.18	-6 927.05
7	4	-33 045.08	5 714.80	11	0	-513.70	0.00	13	10	-45 340.83	1 913.46	15	14	3 013.29	-4 171.11
7	5	13 812.20	10 780.79	11	1	1 134.29	1 838.75	11	3	-98.87	-7 574.62	15	15	-8 934.74	-10 498.83

通过 SCHA 得到的中国地区岩石圈磁场模型 (以下简称 GNC-SCHA 模型) 具体如图 4 所示。ΔX 分量在中国大部分地区呈东西横向分布, 并且正负相间, 在内蒙古、四川南部及贵州北部都有较强的正异常; 而在陕西和甘肃南部有较强的负异常。ΔY 分量基本呈南北纵向分布, 在新疆西部、内蒙古中

部、华东及华南沿海地区存在正异常; 而在新疆东部、内蒙古西部及云南地区存在较强的负异常。ΔZ 分量在内蒙古中部、甘肃和陕西北部、贵州和云南北部有较强的负异常; 而在新疆西部、重庆及江苏地区有明显的正异常。ΔF 分量与 ΔZ 分量磁异常分布比较相似, 可以明显揭示中国地区的主要岩石

圈磁异常,例如位于塔里木盆地和四川盆地附近的正异常,以及青藏高原东西向的负异常。

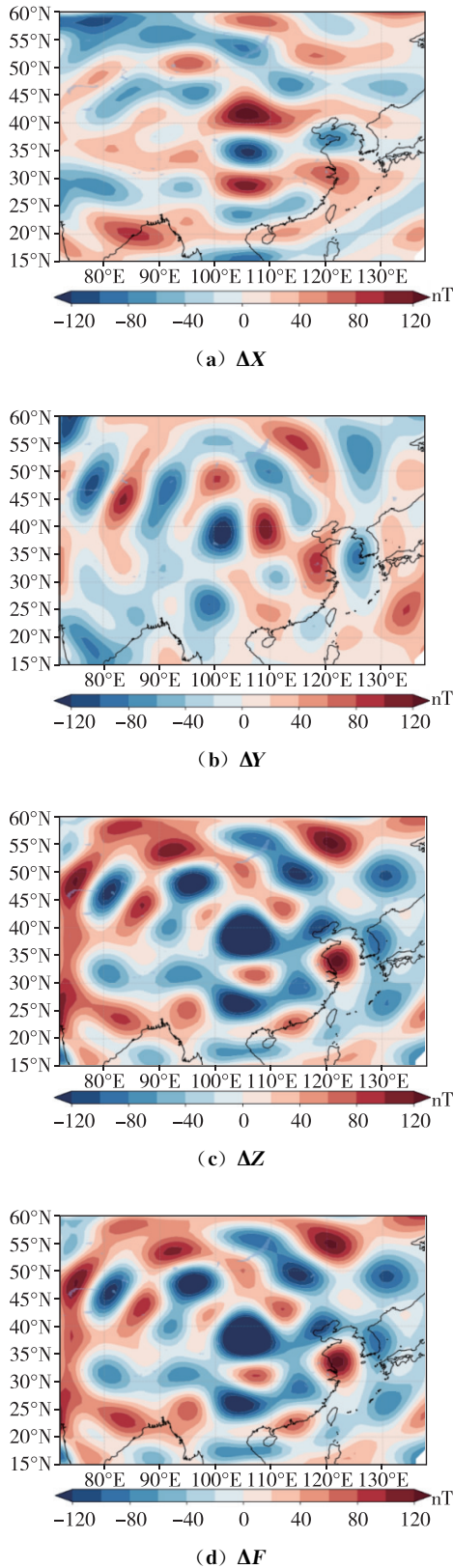


图4 利用GNC数据计算得到的GNC-SCHA模型

Fig. 4 GNC-SCHA model calculated by using GNC data

2.2 模型对比

为了进一步验证所建模型,本文首先利用IGRF-13模型和CHAOS模型对2018年GNC地磁站的绝对观测数据进行处理,剔除了主磁场、主磁场长期变化场和外源磁场的影响,得到了台站实测数据的岩石圈磁场值。然后,根据GNC-SCHA模型、CHAOS模型及冯彦等^[17]建立的SCH2000模型提供的系数,计算了各个模型在台站所处位置的岩石圈磁场值。最后,计算了台站实测数据的岩石圈磁场值与对应模型之间的均方根误差并进行对比分析,具体结果如表3所示。

表3 不同模型 ΔX , ΔY , ΔZ 分量的均方根误差

Tab. 3 Root mean square error of the ΔX , ΔY and ΔZ components of different models

模型	ΔX /nT	ΔY /nT	ΔZ /nT
CHAOS模型	91.69	79.74	133.02
SCH2000模型	84.33	77.91	145.41
GNC-SCHA模型	72.31	73.80	82.33

与CHAOS模型相比,GNC-SCHA模型的 ΔX , ΔY , ΔZ 分量均方根误差分别减小了19.38 nT, 5.34 nT, 50.69 nT;GNC-SCHA模型比SCH2000模型的 ΔX , ΔY , ΔZ 分量均方根误差分别减小了12.02 nT, 4.11 nT, 63.08 nT。一方面,岩石圈磁场的波长较短,其磁场信息会随着高度的增加而迅速衰减。由于CHAOS模型在中国地区主要依赖磁测卫星数据,缺少地面的磁场观测数据,其 ΔX , ΔY 分量的均方根误差均比GNC-SCHA模型和SCH2000模型大。另一方面,SCH2000模型 ΔZ 分量的均方根误差比GNC-SCHA模型和CHAOS模型都大,这主要是由于其在进行SCHA时综合利用了地面和CHAMP卫星两个高度的磁测数据。但在球冠谐方程中,没有合适的函数能描述地磁场在径向上的衰减。冯彦等在与其它全球模型进行比较时发现,SCH2000模型的Z分布比较简单,其影响因素包括对卫星数据点的网格化处理以及球冠谐模型的径向函数(要素Z方向)不能很好地模拟地磁场的径向变化^[17]。本文在利用球冠谐模型进行分析时,综合利用了地面数据和EMM2017模型数据建立模型,而EMM2017模型则是通过SHA将卫星数据归算到地面,有效地减小了球冠谐模型在不同高度资料联合反演时精度降低的影响。综上所述,相较于其他两个模型,GNC-SCHA模型的

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 分量均方根误差均相对较小。

3 结论

本文通过 GNC 的地面数据, 补充 EMM2017 模型数据进行 SCHA, 得到中国地区岩石圈磁场分布。研究得出:

1) ΔX 分量在中国大部分地区呈东西横向分布, 并且正负相间; ΔY 分量基本呈南北纵向分布。 ΔF 分量与 ΔZ 分量比较相似, 在塔里木盆地、四川盆地附近存在高值磁异常, 在青藏高原南部存在东西向低值磁异常。

2) 在确定模型的截断阶数时, 本文利用了 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 分量的均方根误差进行判断。当截断阶数过低时, 不能准确描述岩石圈磁场复杂的空间变化; 当截断阶数过高时, 则会引起边界效应。因此, 要根据实际的磁异常分布及均方根误差综合判断截断阶数。

3) 在进行模型的对比与分析时, 本文所建立的模型(GNC-SCHA)相较于 CHAOS 模型岩石圈磁场的均方根误差均有明显的减小。这主要是因为岩石圈磁场的波长信息会随着高度的增加而衰减, 而 CHAOS 模型缺少中国地区的地面数据。因此, 在进行岩石圈磁场模型构建时, 需要综合使用卫星和地面磁测数据建立中国地区的高精度地磁场模型。

致 谢

文中使用的地磁数据来自中国地震局地球物理研究所国家地磁台网中心, K_p 指数来自日本京都大学世界地磁数据中心, EMM2017 模型数据来自美国国家海洋和大气管理局, CHAOS 模型数据来自丹麦国家太空研究中心, IGRF 模型数据来自英国地质调查局, 在此表示诚挚的谢意。

参考文献

- [1] 徐文耀. 地磁学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
XU Wenyao. Geomagnetism[M]. Beijing: Seismological Press, 2003(in Chinese).
- [2] ALKEN P, MAUS S, LÜHR H, et al. Geomagnetic main field modeling with DMSP[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2014, 119(5): 4010-4025.
- [3] HULOT G, SABAKA T J, OLSEN N, et al. The present and future geomagnetic field[J]. Treatise on Geophysics, 2015, 5(12): 33-78.
- [4] 陆一, 魏东岩, 纪新春, 等. 地磁定位方法综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 119-130.
LU Yi, WEI Dongyan, JI Xinchun, et al. Review of geomagnetic positioning method[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(2): 119-130(in Chinese).
- [5] 徐文耀. 地球电磁现象物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
XU Wenyao. Physics of electromagnetic phenomena of the earth[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009(in Chinese).
- [6] 王安琦, 冯彦. 基于航空磁测数据和全球模型的适用于中国地区的岩石圈磁场模型初步研究[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(4): 1507-1516.
WANG Anqi, FENG Yan. Preliminary study on global lithospheric magnetic field that suitable for China based on aeromagnetic data and geomagnetic models[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(4): 1507-1516 (in Chinese).
- [7] ALKEN P, THÉBAULT E, BEGGAN C D, et al. International geomagnetic reference field: the thirteenth generation[J]. Earth, Planets and Space, 2021, 73(1): 1-50.
- [8] MAUS S, BARCKHAUSEN U, BERKENBOSCH H, et al. EMAG2: a 2-arc min resolution Earth magnetic anomaly grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2009, 10(8): 1-12.
- [9] CHULLIAT A, MACMILLAN S, ALKEN P, et al. The US/UK world magnetic model for 2015-2020[R]. National Geophysical Data Center, NOAA. Technical Report, 2015.
- [10] CHULLIAT A, BROWN W, ALKEN P, et al. The US/UK world magnetic model for 2020-2025 [R]. National Geophysical Data Center, NOAA. Technical Report, 2020.
- [11] 区家明, 杜爱民, 徐文耀, 等. 小尺度地磁场勒让德多项式建模方法[J]. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2669-2675.
OU Jiaming, DU Aimin, XU Wenyao, et al. The Legendre polynomials modeling method of small-scale geomagnetic fields [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(8): 2669-2675(in Chinese).
- [12] ZMUDA A J. Limiting form of Taylor series used in extrapolating components of the geomagnetic intensity [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1956, 37(1): 9-12.
- [13] 冯彦, 蒋勇, 孙涵, 等. 地磁场三维曲面 Spline 模型

- [J]. 地球物理学报, 2018, 61(4): 1352-1365.
- FENG Yan, JIANG Yong, SUN Han, et al. The three-dimensional surface Spline model of geomagnetic field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(4): 1352-1365 (in Chinese).
- [14] ALLDREDGE L R. Rectangular harmonic analysis applied to the geomagnetic field[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1981, 86(B4): 3021-3026.
- [15] HAINES G V. Spherical cap harmonic analysis [J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90 (B3): 2583-2591.
- [16] 姜乙. 联合全球卫星模型和航磁数据的中国大陆地区岩石圈磁场建模研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- JIANG Yi. Research of regional lithospheric field modelling in continent China combining global satellite models and aeromagnetic data[D]. Nanjing: Nanjing University of Information & Technology, 2022(in Chinese).
- [17] 冯彦, 孙涵, 蒋勇, 等. 基于 CHAMP 卫星和地面矢量数据联合建立中国地磁模型[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2669-2675.
- FENG Yan, SUN Han, JIANG Yong, et al. Joint establishment of the geomagnetic model for mainland China based on CHAMP satellite and surface vector data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60 (7): 2669-2675(in Chinese).
- [18] FINLAY C C, KLOSS C, OLSEN N, et al. The CHAOS-7 geomagnetic field model and observed changes in the South Atlantic Anomaly[J]. Earth Planets Space, 2020, 72(1): 1-32.
- [19] 安振昌, ROTANOVA N M. 东亚地磁场模型的计算与分析[J]. 地球物理学报, 2022, 45(1): 35-41.
- AN Zhenchang, ROTANOVA N M. Calculations and analyses of the geomagnetic field models for East Asia[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 45 (1): 35-41(in Chinese).
- [20] HAINES G V. Computer programs for spherical cap harmonic analysis of potential and general fields[J]. Computers and Geosciences, 1988, 14(4): 413-447.
- [21] HAINES G V. Regional magnetic field modelling: a review[J]. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 1990, 42(9): 1001-1018.
- [22] 王婕, 申旭辉, 杨艳艳, 等. 基于张衡一号卫星数据的中国区域岩石圈磁场球冠谱分析[J]. 地球物理学报, 2023, 66(7): 2973-2982.
- WANG Jie, SHEN Xuhui, YANG Yanyan, et al. The spherical cap harmonic model of lithospheric magnetic anomaly in Chinese region derived from CSES satellite data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(7): 2973-2982(in Chinese).

(编辑:孟彬)