



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782 CN 11-2021/P

基于第十三代国际地磁参考场模型在中国区域特征分析与研究

张秀玲 赵旭东

Regional characteristics analysis in China based on the 13th International Geomagnetic Reference Model

Zhang Xiuling, Zhao Xudong

引用本文:

张秀玲, 赵旭东. 2024. 基于第十三代国际地磁参考场模型在中国区域特征分析与研究. *地震学报*[J], 46(1): 120–128. DOI: 10.11939/jass.20220137

Zhang X L, Zhao X D. 2024. Regional characteristics analysis in China based on the 13th International Geomagnetic Reference Model. *Acta Seismologica Sinica*[J], 46(1): 120–128. DOI: 10.11939/jass.20220137

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220137>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于中国地磁台网地磁子夜均值数据对地磁急变的分析

Geomagnetic jerks based on the midnight mean of the geomagnetic field from geomagnetic networks of China
地震学报. 2019, 41(4): 512–523 <https://doi.org/10.11939/jass.20190009>

2021年5月22日玛多 $M_s7.4$ 地震震前岩石圈磁场变化特征分析

Characteristic analysis of the lithospheric magnetic anomaly before the Madoi $M_s7.4$ earthquake on 22th May 2021
地震学报. 2021, 43(4): 453–462 <https://doi.org/10.11939/jass.20210115>

基于XGBoost机器学习的地磁日变重构方法研究

Reconstruction method for diurnal variations of the geomagnetic field by XGBoost machine learning
地震学报. 2021, 43(1): 100–112 <https://doi.org/10.11939/jass.20200046>

利用中国北部连续重力站资料评估全球潮汐模型精度

Accuracy estimation of global tide models using continuous gravity observation data in northern China
地震学报. 2021, 43(1): 84–99 <https://doi.org/10.11939/jass.20200041>

利用区域地震体波走时评价华北地区三维地壳速度结构模型

Evaluation of 3D crustal velocity models in North China using regional earthquake travel time data
地震学报. 2019, 41(2): 139–154 <https://doi.org/10.11939/jass.20180057>

华北地区重力场变化特征与孕震模型研究

Gravity field characteristics and seismogenic model in North China
地震学报. 2021, 43(4): 441–452 <https://doi.org/10.11939/jass.20200150>

张秀玲, 赵旭东. 2024. 基于第十三代国际地磁参考场模型在中国区域特征分析与研究. 地震学报, 46(1): 120–128. doi: 10.11939/jass.20220137.

Zhang X L, Zhao X D. 2024. Regional characteristics analysis in China based on the 13th International Geomagnetic Reference Model. *Acta Seismologica Sinica*, 46(1): 120–128. doi: 10.11939/jass.20220137.

基于第十三代国际地磁参考场模型在 中国区域特征分析与研究*

张秀玲^{1,2),†} 赵旭东¹⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100095 北京白家疃地球科学国家野外科学观测研究站

摘要 根据最新的第十三代国际地磁参考场模型(IGRF13), 计算了 2015—2020 年中国区域地磁场模型七要素长期变化速率, 并在此基础上分析我国区域地磁场长期变化特征. 通过分析计算我国 28 个地磁台的 IGRF13 模型值与实际地磁场的长期变化速率、差值及均方误差, 结果显示: IGRF13 模型所显示的地磁场长期变化与我国区域地磁场实际观测变化基本一致, 但在局部区域也存在差异, IGRF13 模型能够体现中国区域地磁场的特征. 应用 IGRF13 模型数据时需要考虑局部区域与台站实际观测数据的误差.

关键词 地磁参考场模型 等变线 平均年变率 长期变化速率 均方根误差
doi: 10.11939/jass.20220137 中图分类号: P318.1 文献标识码: A

Regional characteristics analysis in China based on the 13th International Geomagnetic Reference Model

Zhang Xiuling^{1,2),†} Zhao Xudong¹⁾

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

2) *Beijing Baijiatuan Earth Sciences National Observation and Research Station, Beijing 100095, China*

Abstract: Based on the latest 13th International Geomagnetic Reference (IGRF13) Model, the long-term change rates of the seven elements of the regional geomagnetic model in China from 2015 to 2020 were calculated to analyze the long-term change characteristics of the geomagnetic field in China. By analyzing and calculating the long change rate, difference and mean square error between IGRF13 model values and the actual geomagnetic field of 28 geomagnetic stations in China, the results show that: The long-term variation of geomagnetic field shown by IGRF13 model is basically consistent with the actual observed variation of geomagnetic field in China, but there are also obvious differences. IGRF13 model can reflect the characteristics of geomagnetic field in China. When applying IGRF13 model data, the error between local area and actual observation data of the station should also be considered.

* 基金项目 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB23Z02)资助.
收稿日期 2022-08-04 收到初稿, 2022-10-10 决定采用修改稿.
作者简介 张秀玲, 高级工程师, 现主要从事地震地磁监测与研究, e-mail:
Zhangxl@cea-igp.ac.cn



Key words: geomagnetic reference field model; isopors; mean annual variability; long-term annual variability; root mean square error

引言

地磁场是重要的地球物理场之一, 由不同场源的磁场成分互相叠加而成, 是随着时间和空间变化而变化的矢量场(徐文耀, 2003; 陈斌等, 2010; 王振东等, 2017). 地球的主磁场是地球磁场中最主要的部分, 约占总磁场的 95%.

早在 16 世纪, 人们就注意到伦敦磁偏角经历着缓慢的变化. 地磁长期变化是指地磁场随时间的缓慢变化, 即地磁场各分量年均值的时间变化, 其时间尺度为若干年. 地磁场及其长期变化是地磁学的一项重要研究内容(徐文耀等, 2005; 陈斌等, 2010).

国际地磁学与高空物理学协会 1968 年发布了第一代国际地磁参考场(International Geomagnetic Reference, 缩写为 IGRF)模型, 即 IGRF1965, 随后每 5 年发布一次. 国际地磁参考场模型是表示地球主磁场的长期变化的模型, 在开展及通讯、航天领域、岩石圈异常及地震监测预报研究等生产科研工作中有着广泛的应用. 根据模型应用范围, 地磁模型分为全球地磁模型和区域地磁模型; 根据表现形式分为地磁图和地磁场模型, 即等直线图的形式. 采用球谐分析、球冠谐分析和矩谐分析等不同的数学分析方法建立的地磁场模型均是基于高斯磁位理论(顾左文等, 2004, 2006; 陈斌等, 2011).

地磁台站的主要任务就是取得连续可靠的地磁观测数据, 而这些数据对地球主磁场的空间变化和长期变化的研究非常重要. 我国最早于 1874 年在佘山地磁台(前身是徐家汇验磁台)正式产出地磁观测数据. 1957—1958 年根据第一届国际地球物理年联合观测的需求, 在全国先后建立了北京白家疃等 8 个地磁台, 俗称“老八台”, 并于 20 世纪 50 年代末开始正式记录观测. 截至目前, 我国建立了大量的地磁台, 这些台站组成了中国地磁观测的基本台网.

国内许多专家学者作了大量关于国际地磁参考场与国内地磁台站观测数据之间的差异分析研究工作. 例如: 徐文耀等(2005)利用第 8 代国际地磁参考场模型, 分析研究了全球长期变化模型与我国长期变化模型的共同点及差异; 之后其又探讨了地磁模型中产生各种误差的规律, 研究了地壳场及外源场对地磁场模型误差的影响等(徐文耀等, 2011); 陈斌等(2012)根据第 11 代参考模型分析 2005—2010 年我国区域地磁场的长期变化特征, 结果表明地磁参考模型与台站实际观测的长期变化在全国范围内基本一致, 但在区域范围内仍存在着差异.

国际地磁学与高空物理学协会(International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 缩写为 IAGA)在 2019 年 12 月发布了最新的第 13 代国际地磁参考场模型(IGRF13), 为国际上通用的全球主磁场标准模型. 其采用球谐分析的方法描述地磁主磁场及其长期变化, 为 13 阶主磁场模型. IGRF 包括了 1900—2024 年(间隔 5 年)共 24 个主磁场模型, IGRF13 模型表示的时间范围为 1900 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月 31 日.

为了研究 IGRF13 模型在我国区域的适用性, 本文拟根据我国 28 个地磁台 IGRF13 模型值和实际地磁观测数据分析研究 2015—2020 年期间我国区域磁场模型的长期变化形态特征, 并结合我国不同地磁台站的地球物理观测环境, 分析模型值与实际地磁场长期观测值之间的差异; 结合地磁台站的地理和地质环境, 探讨我国地磁场长期变化特征, 以期为认识区

域地壳场和岩石圈活动提供有用的信息,为应用国际地磁参考模型数据研究地磁场的学者提供参考.

1 数据选取和处理方法

1.1 数据的选取

本文选取了我国区域具有典型性与代表性的 28 个地磁基准台站(76°E—126.1°E, 19°N—49.6°N),由于部分台站的建立时间为 20 世纪 50 年代,受地理环境因素影响,台站选址分布不均匀,大部分台站集中在我国中东部地区,西部地区台站少,内蒙古、西藏和新疆等地区的台站尤为稀少.利用选取的 28 个台站 2015—2020 年 IGRF13 模型与实际观测值(年均值)分析地磁场长期变化的特点及差异.

1.2 数据处理方法

1) 国际地磁参考模型是采用球谐分析方法描述地球主磁场及其长期变化的一系列数学模型(徐文耀, 2011; 王宣文, 2003; 刘元元等, 2013).主磁场磁位式的表达式为:

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

式中, λ 和 θ 分别为位置的经度和地心余纬度, r 为测点与地心的距离, $a=6371.2$ km 为参考地球半径, m 和 n 分别为球谐函数的次数和阶数, $g_n^m(t)$ 和 $h_n^m(t)$ 为高斯系数, $P_n^m(\cos \theta)$ 为 n 阶 m 次 Schmidt 准归一化缔合勒让德函数.

地球内部的主磁场可以表示为标量磁位势 V 的负梯度, V 展开形式为式(1).根据式(1),对标量磁位 V 向北、向东和地心方向求导,得到地磁场北向分量 X 、东向分量 Y 和垂直分量 Z 的表达式.根据地磁场各要素之间的换算关系,可得到地磁场总强度 F 、水平分量 H 、磁偏角 D 和磁倾角 I 分别为

$$F = \sqrt{H^2 + Z^2}, \quad H = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad D = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right), \quad I = \arctan\left(\frac{Z}{H}\right), \quad (2)$$

$$X = \frac{\partial U}{r \partial \theta}, \quad Y = -\frac{\partial U}{r \sin \theta \partial \lambda}, \quad Z = \frac{\partial U}{\partial r}.$$

2) 年变率可采用一阶差分的方法求取,或者利用某两年年均值之差除以间隔年数,得到某两年间的平均年变率 S_v (徐文耀, 2011),即

$$S_v = \frac{B_m - B_n}{m - n}, \quad (3)$$

式中, S_v 为地磁场任意分量的年变率, B_m 为 m 年任意地磁七要素值, B_n 为 n 年任意地磁七要素值.

3) 使用差值(误差法) ΔB 及标准差(又称均方根偏差) RMS 来描述模型计算值与实际观测数据的差值和误差大小.计算方法为

$$\Delta B = B^{\text{IGRF}} - B^{\text{OB}}, \quad (4)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_i^{\text{IGRF}} - B_i^{\text{OB}})^2}{n}}, \quad (5)$$

式中, B^{IGRF} 为 IGRF13 模型计算值, B^{OB} 为台站实际观测数据的通日年均值, n 为地磁台站个数.

2 结果和讨论

2.1 IGRF13 模型在中国地区变化特征

因地磁场是矢量场, 由七个地磁要素组成, 即磁偏角 D 、磁倾角 I 、水平分量 H 、北向分量 X 、东向分量 Y 、垂直分量 Z 和总强度 F 。为了描述 2015—2020 年我国区域地磁场, 本文计算了我国区域 28 个地磁台七要素模型的长期平均年变率, 并采用克里金插值法绘制了中国区域地磁七要素的等变线图(图 1)。下文将详细阐述 2015—2020 年第 13 代参考模型年变率在中国地区的时空变化特征。

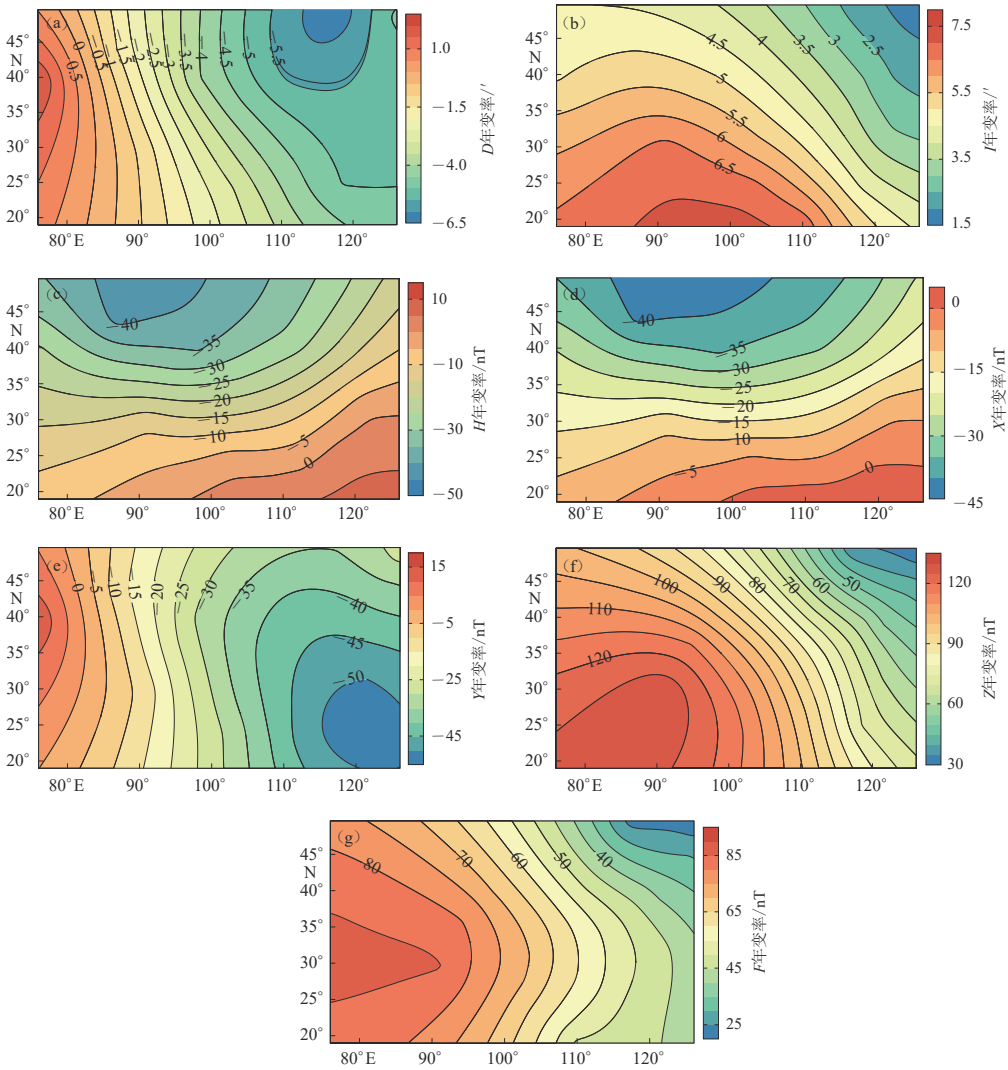


图 1 2015—2020 年中国地区 IGRF13 模型七要素等变线分布图

(a) 磁偏角 D ; (b) 磁倾角 I ; (c) 水平分量 H ; (d) 北向分量 X ; (e) 东向分量 Y ; (f) 垂直分量 Z ; (g) 地磁场总强度 F

Fig. 1 Distribution map of isometric lines of seven elements of IGRF13 model values in China during 2015–2020

(a) Magnetic declination D ; (b) Magnetic dip I ; (c) Horizontal component H ; (d) North component X ;
(e) East component Y ; (f) Vertical component Z ; (g) Geomagnetic field total intensity F

图 1a 为模型磁偏角 D 的年变率分布情况. 中国地区磁偏角存在偏东和偏西两种情况, 东部为负(西偏), 西部为正(东偏). 中国大部地磁偏角偏西, 为负值. 大部分地区 D 年变率为负值, 说明中国地区地磁偏角逐渐向西漂移. D 长期平均年变率最小值位于东北地区满洲里台, 为 $-6.41'/\text{a}$, 最大值位于西北地区, 为 $1.25'/\text{a}$, 等变线大致沿子午线(经线)方向南北延伸. 零等变线位于我国西部, 大至从 75°E — 85°E 附近穿过, 并随经度的增加 D 年变率逐渐变小, 曲线呈现由 SSW 向 NNE 方向汇集的趋势. 相比 2005—2010 年 IGR11 磁偏角零等变线处于 80°E — 90°E 附近(陈斌等, 2012), 2015—2020 年 IGR13 磁偏角 D 的零等变线沿着经度线向西偏移.

图 1b 和 1f 分别为磁倾角 I 和垂直分量 Z 分布曲线, 两者长期年变率均为正值, 且均呈现上升趋势, 空间分布形态相近, 等变线呈现出自 NE 向 SW 方向逐渐增大的趋势. I 年变率最大值位于通海台, 为 $6.76'/\text{a}$, Z 平均年变率最大值位于拉萨台, 为 127.8 nT/a ; 磁倾角 I 和垂直分量 Z 年变率最小值均位于东北地区, 分别为 $1.75'/\text{a}$ 和 33.0 nT/a .

图 1c 和 1d 分别为水平分量 H 和北向分量 X 分布曲线. 2015—2020 年中国大部分地区地磁场水平分量呈现下降趋势, 长期年变率是负值, 只有少部分台站是正值, H 长期平均年变率介于 -41.4 — 4.2 nT/a 之间, 最大值位于华南地区, 最小值位于西北地区; X 长期平均年变率介于 -40.7 — 3.0 nT/a 之间, X 年变率最大值在华南地区的琼中台, X 最小值在西北地区的乌鲁木齐台. H 和 X 年变率等变线形态一致, 等变线曲线表现为沿纬度分布, 同一经度线等变线呈南高北低趋势, 年变率随台站纬度的增大呈缓慢减小趋势. X 和 H 零等变线位于 (19°N — 25°N , 98°E — 126°E) 附近, 与 2005—2015 年 X 和 H 零等值线相比, 10 年间地磁场东向分量和北向分量的零等变线沿纬度逐渐向高纬度方向移动.

图 1e 为东向分量 Y 等变线分布曲线, 2015—2020 年我国大部分台站 Y 分量为负值, 只有西部的拉萨台、乌鲁木齐台和喀什台为正值. Y 长期年变率均值为负值, 最大值位于西北地区乌鲁木齐, 为 12.6 nT/a , 最小值位于泉州台, 为 53.2 nT/a . 等变线长期年变率曲线大致沿子午线(经度线)方向呈自 NW 向 SE 方向, 数值逐渐减少, 且同一纬度西高东低. 零等变线位于 75°E — 83°E 之间, 与 2005—2010 年 IGR11 东向分量零等值线在 80°E — 90°E (陈斌, 2012) 相比逐渐西移.

图 1g 为磁场总强度 F 分布情况. 2015—2020 在我国区域所有地磁台站地磁总强度 F 呈上升趋势, F 长期平均年变率为正值, 增加了 55.9 nT/a . 总强度 F 等变线的空间分布形态呈现自 WSW 向 NNE 方向逐渐减少的趋势. F 年变率最大值位于西北地区, 为 85.2 nT/a , 最小值位于东北地区的满洲里台, 为 23.3 nT/a . 2015—2020 年我国地磁场总强度 5 年不断增加, 总强度 F 呈现出自东向西逐步增大的趋势, 等变线数值同一纬度呈现出西高东低的趋势. 与 2005—2010 年相比, 2015—2020 年零等变线沿着经度线向东移动.

中国区域地磁七要素 D , I , H , X , Y , Z , F 模型的等变线空间分布比较均匀, 个别区域地磁场要素等变线出现曲折的形态变化, 说明地磁场局部地区之间存在差异. 对于地磁异常区域, 如我国东部华北地区和华南的局部地区, 等变线呈现出较为明显的异常变化, 地磁场七要素零等值线不断变化.

2.2 长期变化速率

为了比较 IGR13 模型与我国实际地磁场变化的差异, 本文计算了 2015—2020 年地磁场七要素 IGR13 模型年变率与实际观测值年变率的差值, 各要素的平均年变率差值分别为

$\Delta D=0.17'/a$, $\Delta I=0.47'/a$, $\Delta H=-6.0\text{ nT/a}$, $\Delta X=-5.2\text{ nT/a}$, $\Delta Y=-2.6\text{ nT/a}$, $\Delta Z=5.0\text{ nT/a}$, $\Delta F=-0.1\text{ nT/a}$.

因地磁场是矢量场，一般用地磁场总强度 F 表示地区地磁场的大小程度。本文以地磁总强度为例，具体分析讨论 IGRF13 参考模型与我国区域台站实际地磁场长期变化速率之间的差异。

图 1 为我国区域地磁台 IGRF13 模型总强度平均年变率与实际地磁场总强度平均年变率对比图，28 个地磁台 IGRF13 地磁场总强度模型值长期变化速率与实际地磁场变化速率基本一致。

2015—2020 年我国区域 IGRF13 模型地磁场总强度平均年变率为 55.9 nT/a，实际地磁场总强度平均年变率为 56.0 nT/a，IGRF13 模型的长期变化速率比实际地磁场小 0.08 nT/a，IGRF13 参考模型年变率为实际地磁场年变率的 99.9%，IGRF13 模型基本可以反映地磁台的磁场变化。

从图 2 可以看出，28 个台站之间地磁场总强度的长期平均年变率不同，IGRF13 模型地磁场总强度年变率与实际观测地磁年变率差值介于-4.4—5.8 nT/a 之间。我国 28 个台站所处的地理环境和位置不同，说明不同地质环境下的磁场变化和速度变化也不同，地磁场的变化不统一，且随时间的变化不均匀，说明地磁场变化具有非线性特点。研究结果也表明地磁长期变化具有区域性、局部性的变化特征。

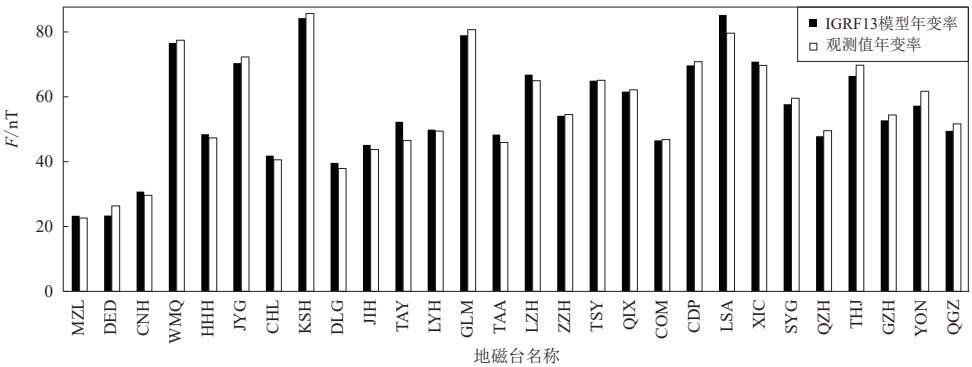


图 2 2015—2020 年地磁场总强度 F 的 IGRF13 模型值与台站观测值长期年变率

Fig. 2 IGRF13 model value of total intensity of geomagnetic field F and long-term annual variation rate of observed values at the station during 2015–2020

2.3 误差分析

地磁场的各种模型都是对地球磁场的一种近似描述，着重于描述地磁场的时空特征，而不追求局部细节，因此，凡是模型，必然存在误差。由于地磁台站覆盖面积有限，观测到的数据并不能表征全球各个区域的地磁场随时间的变化情况(徐文耀等, 2011; 刘元元等, 2013)，因此 IGRF13 模型值与台站实际观测值之间存在着各种误差。

把台站观测值的年均值当作标准，模型值与年均值之间的差即本文的差值 ΔB 。为了比较 IGRF13 模型值与实际观测值之间的差异，根据式(4)和式(5)计算了 2015—2020 年地磁要素 D , I , H , F , Y , X 和 Z 每年 IGRF13 模型值与台站观测值的差值、差值的平均值及均方误差，结果列于表 1。

从表 1 可以看出，我国地磁台站的 IGRF13 模型值与实际地磁场观测值之间的差值各不相同，有正有负，且同一台站不同要素的模型值与观测值的差值也不同，相差较大；对同一

表 1 2015—2020 年地磁场七要素 IGRF13 模型值与观测值的差值及均方误差

Table 1 Difference between model values of IGRF13 and observed values and mean square error for seven elements of the geomagnetic field during 2015–2020

台站名称	$D/\mu\text{T}$	$I/\mu\text{T}$	H/nT	F/nT	X/nT	Y/nT	Z/nT
MZL	1.2	-2.4	172	370	171	-21	330
DED	17.5	9.3	-72	134	-64	116	169
CNH	-3.7	16.3	-188	91	-190	6	202
WMQ	-2.4	-26.6	301	-236	302	-1	-401
HHH	-3.9	-7.4	1	-210	-2	-31	-242
JYG	-1.2	-2.2	-17	-96	-17	-9	-102
CHL	9.4	0.1	81	157	90	66	134
KSH	-12.6	-12.0	90	-143	97	-93	-218
DLG	11.5	-49.3	437	-385	446	34	-736
JIH	-2.6	-7.1	78	-31	75	-31	-85
TAY	3.1	2.0	-38	-31	-36	30	-12
LYH	13.5	0.4	77	147	89	109	126
GLM	-1.3	14.5	-91	174	-91	-12	272
TAA	-24.1	49.9	-600	33	-619	-151	474
LZH	0.5	4.7	-2	103	-2	4	127
ZZH	-16.0	-3.8	4	-70	-8	-146	-90
TSY	-8.5	7.5	-37	92	-41	-76	143
QIX	-0.9	3.7	26	120	25	-10	131
COM	-16.3	-6.2	-43	-161	-59	-152	-178
CDP	-7.8	0.3	1	6	-2	-77	7
LSA	31.7	8.1	-256	-247	-254	319	-98
XIC	19.3	14.7	-205	-83	-199	208	96
SYG	1.3	-1.6	23	12	24	13	-8
QZH	1.8	-2.2	48	38	49	15	0
THJ	0.2	-13.0	26	-100	26	1	-202
GZH	-6.4	9.5	-50	27	-53	-68	120
YON	1.1	1.6	-13	-1	-13	13	17
QGZ	3.8	0.0	-20	-23	-19	44	-12
平均值	0.3	0.3	-9.6	-11.2	-9.8	3.6	1.3
均方根差	11.5	16.3	178.9	156.6	182.4	100.7	236.0

地磁要素，不同台站之间的模型值和观测值的差值也不同。从表中可以看出，MZL（满洲里台）、WMQ（乌鲁木齐台）、DLG（大连台）、TAA（泰安台）和 LSA（拉萨台）不同分量 IGRF-13 模型值与实际地磁观测数据差值较大：如 TAA（泰安台）地磁七要素中五个要素（ D ， I ， H ， X ， Z ）的差值较大， H 和 X 分量差值达到了-600 nT 和-619 nT，可能与泰安台处于磁异常有关；WMQ（乌鲁木齐台）的 Z 分量差值为-401 nT，经仔细核查发现该台站 Z 的年均值在 2013 年比 2012 年增加了 484 nT，需要在观测环境、数据处理质量和地磁场变化方面进行分析。

IGRF 模型的一般全球估计精度为 50—300 nT，磁偏角和磁倾角精度在 30'之内(聂琳娟等, 2017)，据此可排除因受台站所在磁异常位置、观测环境、观测质量、数据处理、地球物理场变化及地质构造运动等情况(陈斌等, 2012)的影响而超出 300 nT 和 30'误差的数据，我国区域地磁场 H ， X ， Y ， Z ， F 分量差值及均方根误差分别-16.3 nT，95.4 nT；-16.2 nT，95.9 nT；-8.1 nT，81.0 nT；12.3 nT，142.2 nT；-16.3 nT，95.4 nT。 D 和 I 的差值及均方根误差

分别为 $-2.2'$, $9.9'$ 和 $-0.3'$, $9.4'$ 。排除差值较大的数据, 均方误差更小, 精度更高, IGRF13 模型能充分体现中国区域地磁场的变化特征。

3 结论

通过对 2015—2020 年我国 28 个地磁台 IGRF13 模型长期年变率、长期变化速率和差值等的分析, 得到如下结论:

我国区域地磁场分布特征: 磁偏角 D 和东向分量 Y 等变线大致沿子午线(经度线)方向, 零变线将中国分为东西两部分, 并逐渐向西漂移; 垂直分量 Z 和磁倾角 I 等变线呈现沿 NE 向 SW 逐渐增大的趋势; 水平分量 H 与北向分量 X 等变线呈现为沿纬度圈分布, 并向高纬度方向移动; 地磁场总强度 F 处于上升阶段, 呈现从东向西逐渐增大的趋势, 零等变线沿经度线向东移动。

第 13 代国际地磁参考场(IGRF13)模型的长期变化速率为实际地磁场变化速率的 99.9%, 即两者的长期变化基本一致, 但也存在一定差异。其中台站的误差较大, 例如泰安地磁台, 可能与台站周边地理环境、地质构造及地磁场变化等有关。

2015—2020 年国际地磁参考场(IGRF13)能体现中国地区磁场长期变化的空间分布特征, 也能反映我国区域地磁场和局部磁异常, 但在应用 IGRF13 模型数据时, 需要考虑局部区域的地理环境和台站实际观测数据的误差等因素。

中国地震局地球物理研究所国家地磁台网中心提供了文中所用的地磁数据, 作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- 陈斌, 顾左文, 高金田, 袁洁浩, 狄传芝. 2010. 中国地区地磁长期变化研究[J]. 地球物理学报, **53**(9): 2144–2154.
- Chen B, Gu Z W, Gao J T, Yuan J H, Di C Z. 2010. Study of geomagnetic secular variation in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(9): 2144–2154 (in Chinese).
- 陈斌, 顾左文, 高金田, 袁洁浩, 狄传芝. 2011. 2005.0 年代中国地区地磁场及其长期变化球冠谱和分析[J]. 地球物理学报, **54**(3): 771–779.
- Chen B, Gu Z W, Gao J T, Yuan J H, Di C Z. 2011. Analyses of geomagnetic field and its secular variation over China for 2005.0 epoch using Spherical Cap Harmonic method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(3): 771–779 (in Chinese).
- 陈斌, 顾左文, 高金田, 袁洁浩, 狄传芝. 2012. IGRF-11 描述的 2005—2010 年中国地区地磁长期变化及其误差分析[J]. 地球物理学进展, **27**(2): 512–521.
- Chen B, Gu Z W, Gao J T, Yuan J H, Di C Z. 2012. Geomagnetic secular variation in China during 2005–2010 described by IGRF-11 and its error analysis[J]. *Progress in Geophysics*, **27**(2): 512–521 (in Chinese).
- 顾左文, 安振昌, 高金田, 韩炜, 詹志佳. 2004. 京津冀地区地磁场球冠谱分析[J]. 地球物理学报, **47**(6): 1003–1008.
- Gu Z W, An Z C, Gao J T, Han W, Zhan Z J. 2004. Spherical cap harmonic analysis of the geomagnetic field in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **47**(6): 1003–1008 (in Chinese).
- 顾左文, 安振昌, 高金田, 詹志佳, 姚同起, 韩炜, 陈斌. 2006. 2003 年中国及邻区地磁场模型的计算与分析[J]. 地震学报, **28**(2): 141–149.
- Gu Z W, An Z C, Gao J T, Zhan Z J, Yao T Q, Han W, Chen B. 2006. Computation and analysis of the geomagnetic field model in China and its adjacent area for 2003[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **28**(2): 141–149 (in Chinese).
- 刘元元, 王仕成, 张金生, 郑玉航, 乔玉坤. 2013. 最新国际地磁参考场模型 IGRF11 研究[J]. 地震学报, **35**(1): 125–134.

- Liu Y Y, Wang S C, Zhang J S, Zheng Y H, Qiao Y K. 2013. Research on the eleventh generation IGRF[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **35**(1): 125–134 (in Chinese).
- 聂琳娟, 邱耀东, 申文斌, 张素琴, 张兵兵. 2017. IGRF12 和 WMM2015 模型在中国区域的精度评估及其适用性分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, **42**(9): 1229–1235.
- Nie L J, Qiu Y D, Shen W B, Zhang S Q, Zhang B B. 2017. Accuracy evaluation and applicability of IGRF12 and WMM2015 model in Chinese Mainland[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **42**(9): 1229–1235 (in Chinese).
- 王亶文. 2003. 国际地磁参考场在中国大陆地区的误差分析[J]. 地球物理学报, **46**(2): 171–174.
- Wang D W. 2003. Analysis of the international geomagnetic reference-field error in the China continent[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **46**(2): 171–174 (in Chinese).
- 王振东, 顾左文, 陈斌, 王桀, 袁洁浩. 2017. CHAOS-6 模型描述的中国地区地磁长期变化及误差分析[J]. 地震研究, **40**(3): 404–410.
- Wang Z D, Gu Z W, Chen B, Wang J, Yuan J H. 2017. Geomagnetic secular variation in China described by CHAOS-6 model and its error analysis[J]. *Journal of Seismological Research*, **40**(3): 404–410 (in Chinese).
- 徐文耀. 2003. 地磁学[M]. 北京: 地震出版社: 23.
- Xu W Y. 2003. *Geomagnetism*[M]. Beijing: Seismological Press: 23 (in Chinese).
- 徐文耀, 魏自刚, 夏国辉. 2005. 2000 年中国地区地磁场长期变化的区域特征[J]. 地球物理学报, **48**(3): 551–560.
- Xu W Y, Wei Z G, Xia G H. 2005. Regional features of the secular variation of the geomagnetic field in China for 2000[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **48**(3): 551–560 (in Chinese).
- 徐文耀, 区家明, 杜爱民. 2011. 地磁场模型误差分析中的几个问题[J]. 地球物理学进展, **26**(5): 1485–1509.
- Xu W Y, Ou J M, Du A M. 2011. An analysis of errors in geomagnetic field models[J]. *Progress in Geophysics*, **26**(5): 1485–1509 (in Chinese).