

翟世龙,黄静,雷晴,等. 2024. CGGM 全球地磁场模型和新疆地区台站主磁场逐月变化的一致性分析[J]. 地震研究,47(2): 253–262,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2024.0017.

Zhai S L,Huang J,Lei Q,*et al.* 2024. Consistency analysis of the monthly variation of the main magnetic field by the global geomagnetic field model and by the geomagnetic station in Xinjiang area[J]. *Journal of Seismological Research*,47(2):253–262,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2024.0017.

CGGM 全球地磁场模型和新疆地区台站主磁场 逐月变化的一致性分析*

翟世龙¹,黄静²,雷晴¹,麦麦提敏·图尔贡¹,艾萨·伊斯马伊力^{1✉}

(1. 新疆维吾尔自治区地震局,新疆乌鲁木齐830011;2. 新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆乌鲁木齐830052)

摘要:对2018年8月—2022年7月新疆地区的5个地磁台站的观测数据进行剔除外源变化磁场的处理,同CGGM全球地磁场模型的主磁场计算值进行一致性分析。结果表明:①台站观测的月变化速率观测值要略大于模型计算值,磁偏角 D 、磁倾角 I 的最大月变化速率差为 $0.086\ 88'$,其它5个要素中最大月变化速率差仅为 $0.891\ 4\ \text{nT}$ 。②CGGM模型和IGRF13模型计算值 F 值的均方根误差相差 $26.7\ \text{nT}$,随着“张衡一号”地震电磁卫星数据的增多,CGGM模型的计算精度还会进一步提升。③台站观测和模型计算的逐月变化量偏差很小,表明CGGM模型计算值和台站观测值有较好的一致性。④通过提取静日子夜均值的方法并不能够完全剔除外源场的影响,台站观测逐月变化量中会有几个 nT 的剩余磁场叠加其中,导致了台站观测值和模型计算值逐月变化差值的离散程度略有增大。⑤后验比较分析表明,CGGM模型的长期变化主磁场预测值和台站观测值之间一致性较好,可以很好地描述主磁场的长期变化。

关键词:CGGM模型;新疆地区;张衡一号;主磁场;逐月变化;一致性

中图分类号:P315.721 **文献标识码:**A **文章编号:**1000–0666(2024)02–0253–10
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2024.0017

0 引言

地磁场是重要的地球物理场之一,它是一个矢量场,是空间位置和时间的函数(陈斌等,2012)。地磁场是由地球内部的磁性岩石以及分布在地球内部和外部的电流所产生的各种磁场成分叠加而成的。其中内源场起源于地表以下的磁性物质和电流,分为地核场(主磁场)、地壳场(岩石圈磁场)和感应场3部分,外源场起源于地表

以上的空间电流体系,主要分布在电离层和磁层中。从全球范围来看,主磁场占地球总磁场的95%以上,岩石圈磁场约占4%,外源变化磁场及其感应磁场只占总磁场的1%(徐文耀,2009)。

地磁模型可以描述地磁场的时空分布。1839年,高斯把球谐函数分析方法应用于地磁场(徐文耀,2006),得出了地磁场的数学表达形式,1965年,Cain等(1965)研究了全球地磁资料的球谐分析,得出了主磁场的全球地磁场模型IGRF(International Geomagnetic Reference Field)。2018

* 收稿日期:2022–10–31.

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金特培项目(2022D03031);中国地震局震情跟踪项目(2023010415);新疆地震科学基金项目(202121)。

第一作者简介:翟世龙(1978–),工程师,主要从事地球物理数据分析与仪器运维工作。

E-mail: 36540700@qq.com.

✉通信作者简介:艾萨·伊斯马伊力(1985–),工程师,主要从事地震电磁学和地震预测研究工作。

E-mail: aisa@cug.edu.cn.

年2月2日15时51分,中国成功发射“张衡一号”地震电磁卫星 CSES (China Seismo-Electromagnetic Satellite) (Shen *et al*, 2018), 它是中国全新研制的国家民用航天科研试验卫星, 也是中国地球物理场探测卫星计划的首发星。科研人员利用该卫星2018年3月—2019年9月共19个月的磁场数据, 构建了基于中国地震电磁卫星数据的 IGRF 型全球地磁场模型 CGGM 2020.0 (the China Seismo-Electromagnetic Satellite Global Geomagnetic Field Model), 以下简称 CGGM 2020.0。

关于台站观测值与模型计算值的一致性, 国内外许多学者做过相关方面的研究, Bhardwaj 和 Rangarajan (1997) 利用1958—1990年印度地区6个台站 D 、 H 、 Z 三要素的年均值同 IGRF 模型作比较, 得出印度地区磁场有非常小的长期变化异常的结论; 王月华 (2000) 利用1960—1995年(5年间隔)中国地磁台站的年均值观测数据与 IGRF7 模型进行了比较, 求得了二者的平均差以及标准偏差。以往大多数研究是将模型的主磁场计算值和台站观测值直接进行比较, 使得台站观测数据中的外源场和岩石圈磁场成分极大程度影响了模型精度评估的结果。徐如刚等 (2014) 对增强地磁模型 (EMM2010) 在我国大陆的精度及其适用性进行了定量分析, 发现与世界地磁模型 (WMM2010)、第11代国际参考地磁场 (IGRF11) 相比, EMM2010 模型在我国大陆的总体精度平均提高了50%, 主要原因是该模型不仅包含了地球主磁场, 还包含了地壳磁场。综合以往研究发现, 对于台站观测数据与 CGGM 模型计算值的对比分析研究还比较稀缺。

本文利用新疆地区3个地磁基准台和2个地磁基本台的观测数据, 通过数据处理对外源变化场进行分离, 得到了主磁场逐月变化量, 将其与 CGGM 模型计算的主磁场月均值和逐月变化量进行对比分析, 利用数值统计结果, 评估 CGGM 模型的精度及其适用性。

1 模型和数据选取

1.1 模型选取

本文模型由 CGGM 2020.0 演化而来。CGGM

2020.0 是采用球谐分析方法描述地球主磁场的一系列数学模型, 主磁场的标量位用截断的球谐级数表示 (Yang *et al*, 2021; 张素琴等, 2008):

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

式中: (r, θ, φ, t) 表示以地心为原点并随时间变化的球坐标系; 常数 $a = 6371.2$ km, 表示地球的参考半径; r 表示从地心起算的距离; n 是球谐级数的阶; m 是球谐级数的次; g_n^m 和 h_n^m 是随时间变化的球谐系数; $P_n^m(\cos\theta)$ 是施密特形式的缔合勒让德函数。模型确定的主磁场最大截止阶数为15阶, 前8阶同时考虑时间变化, 外源场包括磁尾电流以及内磁层环电流贡献, 最大截止阶数为2阶; 模型预测的长期变化主磁场模型最大截止阶数为8阶。其中 $n=1$ 的项为偶极子场, 代表了主磁场时空分布的主要特征, 约占全部主磁场的80%~85%, 其余部分为主磁场的非偶极子场。

本文使用的 CGGM 全球地磁场模型是基于“张衡一号”地震电磁卫星2018年8月—2021年4月共计33个月的磁场数据采用球谐分析方法计算得出的, 其主磁场标量位采用的截断的球谐级数同 CGGM 2020.0 相同, 但同 CGGM 2020.0 相比, 计算中舍弃了卫星在轨测试期间连续性和完整率较差的磁场数据, 计算模型采用的卫星磁场数据时段也有所延长, 所以模型的精度有了进一步提高。

1.2 数据选取与处理

截至2022年10月, 新疆地区共有乌鲁木齐、喀什、且末、红浅、乌什和温泉6个地磁台站 (图1)。其中乌鲁木齐、喀什和且末台为基准站, 使用磁通门经纬仪和质子旋进磁力仪进行 D 、 I 、 F 组合的地磁绝对观测, 同时使用磁通门磁力仪进行地磁相对记录, 可以产出连续的地磁场7要素绝对观测数据; 红浅、乌什和温泉台为基本站, 只进行地磁相对记录观测, 其中温泉台磁通门磁力仪因受温度影响较大导致数据质量差, 本文不采用。红浅和乌什台采用质子矢量磁力仪进行相对记录, 可记录 F 、 H 、 D 、 Z (其中 F 为绝对值, D 、 H 和 Z 为变化记录) 4个地磁要素, 数据质量较好, 其记录均能反映台站周边的地磁场变化情况。

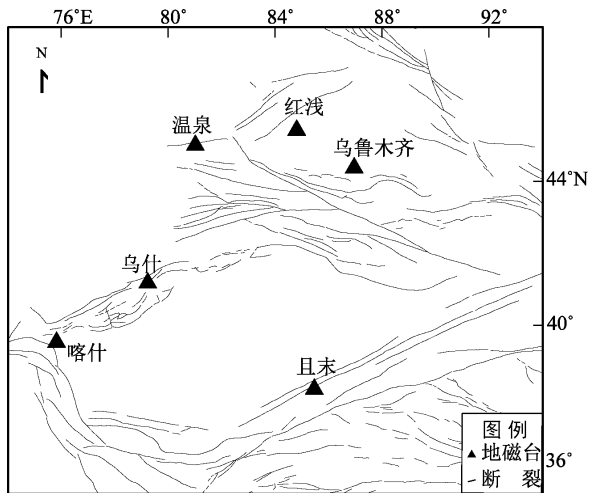


图1 新疆地区地磁台分布示意图

Fig. 1 Distribution of geomagnetic stations in Xinjiang

本文 CGGM 模型适用的时间范围, 可以取 2018 年 8 月—2026 年 4 月, 其中 2018 年 8 月—2021 年 4 月为确定的主磁场模型, 2021 年 5 月—2026 年 4 月为预测的长期变化主磁场模型。CGGM 模型可以按天计算任意一点的 (WGS84 大地坐标系) 主磁场 7 要素值, 本文利用 2018 年 8 月—2022 年 7 月新疆地区 5 个地磁台站的分均值观测数据 (其中磁偏角 D 东偏为正, 磁倾角 I 向下倾为正), 分析各台站观测值和 CGGM 模型值之间的差异, 通过引入均方根误差和标准偏差, 评估 CGGM 模型的精度及其适用性。

台站记录到的变化磁场是诸多不同成因、不同周期、不同形态、不同强度成分叠加的随机时间序列, 包含主磁场、岩石圈磁场和外源变化磁场及其感应场。其中岩石圈磁场的最大特点是空间结构极其复杂, 而在时间上却非常稳定, 其变化的时间尺度是以地质年代 (百万年量级) 计算的 (徐文耀, 2009)。与之相反, 外源变化磁场随时间变化较快, 主要由固体地球之外的空间电流体系所产生, 并且空间电流体系通过电磁感应在地球内部产生的感应电流对变化磁场也有一定贡献。为了使台站观测数据与模型计算主磁场数据具有可比性, 需要将岩石圈磁场、外源变化磁场及其感应场从台站观测数据中剔除, 数据处理方法如下:

(1) 按台站所处位置的经度, 将台站观测数

据 (分均值) 由 UTC (Universal Time Coordinated) 世界时转换为 LT (Local Time) 地方时 (精确至分钟), 其换算关系为: $LT = UTC + (\text{地方东经经度} / 15)$ (翟世龙等, 2022)。

(2) 由于夜间的地磁场观测值几乎不包含日变化, 本文根据国际地磁静日列表挑选每月 5 天的磁静日分均值观测数据并计算地方时子夜数据均值 (地方时 23 点 00 分—01 点 00 分), 可以最大程度地剔除当日台站观测数据中的外源变化磁场及其感应场成分, 台站观测月均值 (包含主磁场和岩石圈磁场) 由每月 5 天的磁静日子夜数据均值取平均得到, 后面均称之为台站观测值。

(3) 利用 CGGM 模型计算各台站位置处每日的主磁场 7 要素值, 各要素按月取平均后代表模型计算的当月主磁场月均值。

(4) 在没有大规模的地震活动或火山活动的地区, 岩石圈磁场在时间上是非常稳定的。2018 年 8 月—2022 年 7 月, 新疆地区的 5 个地磁台站周边没有发生大规模地震活动事件, 各地磁要素没有出现大的台阶, 其观测数据中的岩石圈磁场成分在本文研究的时间尺度内可以看做是一个常数, 通过台站观测月均值逐月相减可剔除岩石圈磁场成分, 剩余部分即为台站观测主磁场的逐月变化。同样, 对模型计算月均值进行逐月相减, 可以得到模型计算主磁场的逐月变化。

2 数据分析

2.1 台站观测值与 CGGM 模型计算值差值分析

2.1.1 台站观测值与 CGGM 模型计算值差值的变化特征

本文选择 2018 年 8 月—2022 年 7 月乌鲁木齐、喀什、且末 3 个地磁基准台的地磁场 7 要素月均值 (包含主磁场和岩石圈磁场) 观测数据 (红浅和乌什台只有 4 个要素数据质量较好, 故此处不选择), 计算了台站观测值和 CGGM 模型计算值的差值并分析其随时间的变化关系, 如图 2 所示。由图 2 可见, 要素 D 、 H 、 X 、 Y 的曲线均呈上升趋势, 这表明台站观测的月变化 (后月观测值减去前月观测值) 速率 $SV_{\text{观测}}$ 要大于模型计算的月变化 (后

月计算值减去前月计算值) 速率 $SV_{模型}$; 相反, 要素 I 的曲线呈下降趋势, 这表明 $SV_{观测}$ 要小于 $SV_{模型}$; 要素 Z 、 F 除乌鲁木齐台呈上升趋势外, 均呈现出先上升、后下降的趋势。

对台站观测值与 CGGM 模型计算值差值的时间序列按月进行拟合, 其中一阶拟合多项式的一次项系数, 即为 2018 年 8 月—2022 年 7 月的 $SV_{观测}$ 和 $SV_{模型}$ 差值的平均值; 从拟合多项式的一次项系数来看, 磁偏角 D 最大为 $0.08688 (^{\circ}) / \text{月}$ (乌鲁木齐台), 磁倾角 I 最大为 $-0.04873 (^{\circ}) / \text{月}$ (且末台), 其它 5 个要素中最大的是且末台水平分量 H , 一次项系数为 $0.8914 \text{ nT} / \text{月}$ 。

图 2b、c 中, 喀什台和且末台的 Z 、 F 要素呈现出先上升、后下降的趋势, 对其时间序列按月进行了二阶拟合, 二阶拟合多项式的形式为抛物线 $y = ax^2 + bx + c$, 其一阶导数 $y' = 2ax + b$ 即为 2018 年 8 月—2022 年 7 月第 x 个月 $SV_{观测}$ 和 $SV_{模型}$ 的差值。二阶拟合结果显示, a 均为负值, 抛物线

开口向下, $SV_{观测}$ 和 $SV_{模型}$ 的差值从 2018 年 8 月的正值 ($SV_{观测} > SV_{模型}$) 逐步减小到 2022 年 7 月的负值 ($SV_{观测} < SV_{模型}$), 抛物线的顶点处为 0 ($SV_{观测} = SV_{模型}$)。其中, 喀什台 Z 要素 $SV_{观测}$ 和 $SV_{模型}$ 差值的月变化范围是 $0.980 \sim -1.609 \text{ nT}$, F 要素为 $1.038 \sim -0.905 \text{ nT}$; 且末台 Z 要素 $SV_{观测}$ 和 $SV_{模型}$ 差值的月变化范围为 $1.476 \sim -1.525 \text{ nT}$, F 要素为 $1.626 \sim -0.732 \text{ nT}$ 。

为了进一步分析图 2 中喀什台和且末台 Z 、 F 要素先上升、后下降变化的原因, 绘制了 2018 年 8 月—2022 年 7 月 2 个台站观测值和 CGGM 模型计算值时序曲线, 如图 3 所示。为了便于比较, 对模型计算值进行了平移处理, 使台站观测值和模型计算值在 2018 年 8 月的起点保持一致。从图 3 可以看出, 模型计算值的时序变化比较稳定, 而台站观测值时序曲线具有转折现象, 表明台站观测值和模型计算值差值从上升到下降的变化趋势是由台站观测值数据的转折造成的。



图 2 3 个基准站观测值与 CGGM 模型计算值差值的特征变化

Fig. 2 Characteristic changes of the difference between the observed values at three stations and the calculated values through CGGM model

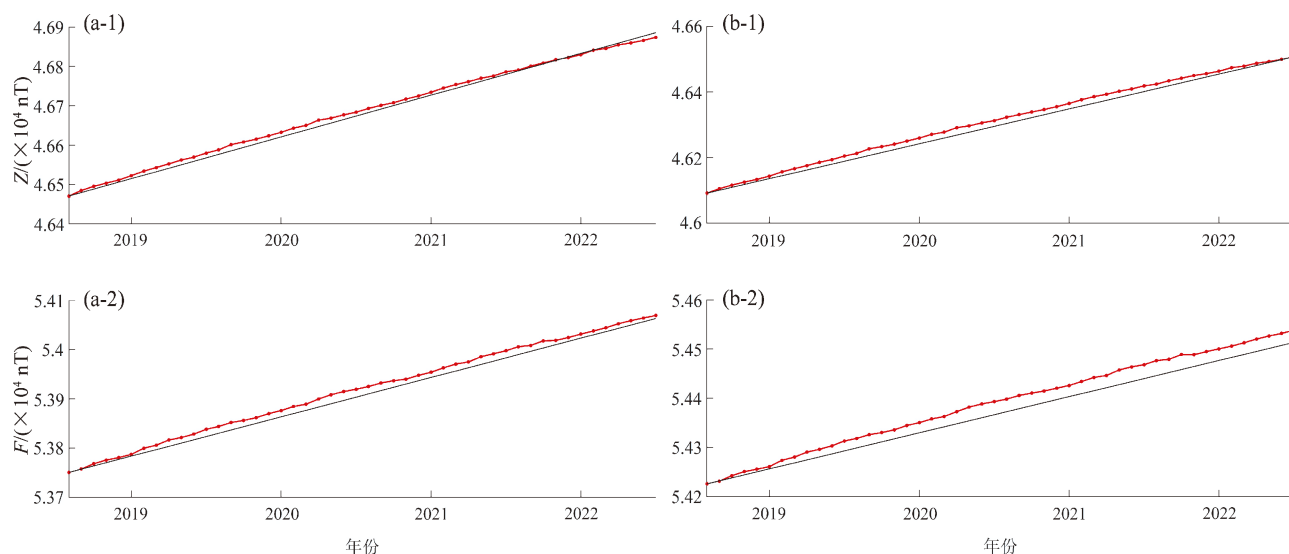


图3 喀什台 (a) 和且末台 (b) 观测值 (红线) 与 CGGM 模型计算值 (黑线) 的特征变化

Fig. 3 Characteristic changes of the observed values (red line) at Kashgar station (a) and Qiemo station (b) and the calculated values (black line) through CGGM model

2.1.2 台站观测值与 CGGM 模型计算值的均方根误差及其差值的标准偏差

为了进一步比较台站观测值和 CGGM 模型的关系,笔者计算了2018年8月—2022年7月乌鲁木齐台、喀什台和且末台3个基准站观测值和模型计算值的均方根误差 RMSE 及其差值的标准偏差 σ , 计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - L)^2}{n}} \quad (2)$$

式中: X 表示台站观测值; L 表示模型计算值; n 为统计期间的月数。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n}} \quad (3)$$

式中: Δ_i 表示台站观测月均值与模型计算月均值的差值; $\bar{\Delta}$ 表示 Δ_i 的平均值; n 为统计期间的月数。

$RMSE$ 可以反映模型计算值与台站观测值的偏离程度,因为台站观测值由主磁场和岩石圈磁场构成,而模型描述的是主磁场,所以 $RMSE$ 主要来源于岩石圈磁场,其次来源于模型的描述能力,即球谐函数模型本身的误差,该误差主要来源于忽略岩石圈磁场和外源场以及球谐级数的截断(王宣文, 2003)。表1 计算结果还显示同一要素不同台站间的 $RMSE$ 差别较大: D 变化范围为 $2.4' \sim 15.1'$, H 变化范围为 $37.2 \sim 66.1$ nT, Z 变化范围为 $91.2 \sim 279.2$ nT, F 变化范围为 $91.8 \sim 221.6$ nT, I 变化范围为 $0.9' \sim 11.2'$, X 变化范围为 $36.3 \sim 66.9$ nT, Y 变化范围是 $18.5 \sim 115.2$ nT。造成这种差别的主要原因是不同台站所处位置地下电性结构不同引起的岩石圈磁场的不均匀分布,

表1 3个基准站观测值与 CGGM 模型计算值的均方根误差及其差值的标准偏差

Tab. 1 Root mean square error and standard deviation of difference between three stations' observed values and the calculated values through CGGM model

台站	$D/(^{\circ})$		H/nT		Z/nT		F/nT		$I/(^{\circ})$		X/nT		Y/nT	
	$RMSE$	σ	$RMSE$	σ	$RMSE$	σ	$RMSE$	σ	$RMSE$	σ	$RMSE$	σ	$RMSE$	σ
乌鲁木齐	2.4	1.2	37.2	9.3	117.3	10.4	91.8	12.7	4.9	0.4	36.3	9.2	18.5	9.0
喀什	15.1	0.8	40.5	10.1	279.2	6.7	221.6	4.3	11.2	0.7	48.6	9.7	115.2	6.6
且末	2.6	0.9	66.1	13.1	91.2	5.8	111.8	7.9	0.9	0.8	66.9	13.0	19.7	7.6

其次是不同台站的观测环境、仪器和人员不同产生的误差（常宜峰等，2014；高明国，康国发，2010；聂琳娟等，2017）。

本文通过标准偏差 σ 来研究台站观测值和模型计算值差值的离散程度。从表 1 可以看出，各台站 D 和 I 的 σ 范围为 $0.8' \sim 1.2'$ 和 $0.4' \sim 0.8'$ ，强度分量（ H 、 Z 、 F 、 X 、 Y ）的 σ 均在 13.1 nT 以内。总体来看，各台站相同要素的差值 σ 相差不大，表明台站观测值与 CGGM 模型计算值的差值比较稳定，一致性较好。

2.1.3 CGGM 模型和 IGRF13 模型计算值与实测值差值对比

王亶文（2003）对 IGRF 模型在中国大陆地区的误差进行了分析，选取我国大陆岩石圈磁异常较小的 29 个台站，对 1998 年地磁场总强度 F 的台站实测值和模型计算值，进行了年均值的差值分析，得到差值范围为 $-305.0 \sim 435.6 \text{ nT}$ （主要是由台站实测值中岩石圈磁场和外源场的不均匀分布引起），均方根误差为 146.9 nT ，得出中国大陆地区 IGRF 误差略大于全球平均水平（ 90 nT ）（Burdelnaya *et al.*, 1999）。为了考察 CGGM 模型的精度情况，本文通过 CGGM 模型和 IGRF13 模型分别计算了 2019—2021 年地磁场总强度 F 的均值，与新疆地区 5 个台站实测的 2019—2021 年 F 均值进行差值计算，结果见表 2。

表 2 台站实测 F 值与模型计算 F 值差值及其均方根误差

Tab. 2 The difference between the F -values observed at the stations and the total geomagnetic intensity F calculated through CGGM model and their root mean square error					
台站	台站实测 F 值/ nT	模型计算值与实测值			
		模型计算 F 值/ nT		差值/ nT	
		CGGM	IGRF13	CGGM	IGRF13
乌鲁木齐	57 414.15	57 325.56	57 336.90	88.59	77.25
喀什	53 914.71	53 696.27	53 738.23	218.44	176.47
且末	54 386.96	54 278.76	54 320.47	108.21	66.50
红浅	57 541.06	57 472.90	57 490.70	68.16	50.36
乌什	54 977.70	54 946.93	54 989.20	30.77	-11.50
RMSE	—	—	—	120.72	94.02

综合 5 个台站的差值和 $RMSE$ 来看，IGRF13 模型略优于 CGGM 模型，两个模型与实测值差值相差最小的是乌鲁木齐台，为 11.34 nT ；最大为乌什台，为 42.27 nT ；两个模型与实测值的 $RMSE$ 相差 26.7 nT 。IGRF13 模型是由包括 CGGM 模型在内的 15 个模型计算得到的，更多的卫星数据、地面观测数据和更长的数据序列使得 IGRF13 模型的精度略高于 CGGM 模型，但相对于 5 万多 nT 的磁感应强度来说其差别可忽略不计，说明 CGGM 模型的精度是可靠的，随着“张衡一号”地震电磁卫星数据的增多，CGGM 模型的计算精度还会进一步提升。

2.2 台站观测值与 CGGM 模型计算值的逐月变化对比分析

由于台站观测值中包含了岩石圈磁场的成分，对台站观测月均值和模型计算月均值进行逐月相减，剩余部分即为台站观测主磁场和模型计算主磁场的逐月变化量，对其进行比较可以更加直观地分析 CGGM 模型计算的精度。本文选取 2018 年 8 月—2022 年 7 月乌鲁木齐、喀什、且末 3 个地磁基准站的地磁场 7 要素月均值和乌什、红浅 2 个地磁基本站相对记录的 D 、 H 、 Z 、 F 月均值观测数据，对台站观测和模型计算的逐月变化量计算 $RMSE$ 及其差值的 σ （表 3），这里的 $RMSE$ 描述的是模型计算与台站观测主磁场的逐月变化量的偏离程度。表 3 计算结果显示，各台站 D 和 I 的 $RMSE$ 变化范围为 $0.18' \sim 0.41'$ ， H 变化范围为 $4.61 \sim 5.10 \text{ nT}$ ， Z 为 $2.24 \sim 2.68 \text{ nT}$ ， F 为 $2.15 \sim 2.47 \text{ nT}$ ， X 为 $4.89 \sim 5.24 \text{ nT}$ ， Y 为 $1.42 \sim 1.80 \text{ nT}$ 。整体来看，各台站观测和 CGGM 模型计算的逐月变化量差值非常小，说明 CGGM 模型计算值和台站观测值具有比较好的一致性。从逐月变化量差值的 σ 结果可以看出，各台站相同要素的 σ 很小并且相差不大，表明逐月变化量差值离散程度较低，即 CGGM 模型计算值的稳定性较好。

2.3 静日子夜均值分离外源变化磁场的不完全性分析

对台站观测数据提取静日子夜均值，能够最大程度剔除其中的外源变化磁场成分，但还是会有很小一部分剩余的电离层磁场叠加在台站观测

表3 台站观测值与 CGGM 模型计算值逐月变化量的均方根误差及其差值的标准偏差

Tab. 3 The mean square root error and standard deviation of the difference between the values observed at stations and the values calculated through CGGM model month by month

台站	$\Delta D/(')$		$\Delta H/\text{nT}$		$\Delta Z/\text{nT}$		$\Delta F/\text{nT}$		$\Delta I/(')$		$\Delta X/\text{nT}$		$\Delta Y/\text{nT}$	
	RMSE	σ	RMSE	σ	RMSE	σ	RMSE	σ	RMSE	σ	RMSE	σ	RMSE	σ
乌鲁木齐	0.27	0.26	4.84	4.90	2.32	2.19	2.15	1.94	0.29	0.29	4.89	4.84	1.80	1.69
喀什	0.21	0.20	5.10	5.10	2.28	2.27	2.29	2.28	0.32	0.32	5.24	5.19	1.55	1.49
且末	0.18	0.17	4.69	4.63	2.24	2.24	2.47	2.41	0.31	0.31	5.19	5.09	1.42	1.32
乌什	0.38	0.37	4.82	4.76	2.50	2.50	2.24	2.22	—	—	—	—	—	—
红浅	0.41	0.40	4.61	4.58	2.68	2.57	2.46	2.28	—	—	—	—	—	—

数据中。刘学旺等(2018)利用 TIG-GCM 模式计算电离层电流及夜间电离层磁场发现,磁平静时期中低纬($50^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{S}$)地区夜间电离层磁场的量级为几个 nT,高纬度地区可达几十 nT,且磁场的南北向分量和径向分量基本大于东西向分量。以乌鲁木齐台、喀什台、且末台的 X 、 Y 、 Z 三个要素为例,分析观测值和模型计算值逐月变化量随时间的变化特征,如图 4 所示。总体来看,台站观测值逐月变化量的变化幅度较模型计算值大几个 nT,台站观测值逐月变化量 X 、 Z 要

素的变化幅度大于 Y 要素,说明静日子夜均值剔除台站观测数据外源变化场是不完全的,台站观测值逐月变化量中会有几个 nT 的剩余电离层磁场叠加其中,使得台站观测值逐月变化量的变化幅度大于模型计算值,台站观测值逐月变化量序列的离散程度增大,否则,表 3 中逐月变化量差值的标准偏差会小很多。分析其原因,首先是台站观测值中剩余电离层磁场的矢量叠加具有随机性,其次是绝对观测中人员的观测误差也具有一定的随机性。



图4 3个基准站站观测值(红线)与CGGM模型计算值(黑线)逐月变化量的特征变化

Fig. 4 Characteristic changes of the monthly variation of the calculated values through the CGGM model and the observed values at the stations

3 后验比较

在时序预测环境中，后验分析是指利用既有历史数据评估预测方法准确度的过程。将本文台站观测值和模型计算值的逐月变化量分为 2018 年 8 月—2021 年 4 月（确定期）和 2021 年 5 月—2022 年 7 月（预测期）两个时段，通过式（2）分别计算 $RMSE$ （表 4）。这里，式（2）中的 X 表示台站观测值逐月变化量； L 表示模型计算值逐月变化量； n 为统计期间逐月变化量的个

数。总体来看，逐月变化量 $RMSE$ 预测期略大于确定期，其差值显示，各台站 D 要素差值变化范围为 $-0.07' \sim 0.11'$ ， I 为 $0.11' \sim 0.16'$ ， H 为 $1.83 \sim 3.18 \text{ nT}$ ， Z 为 $-0.68 \sim 0.42 \text{ nT}$ ， F 为 $-0.66 \sim 0.26 \text{ nT}$ ， X 为 $2.54 \sim 3.35 \text{ nT}$ ， Y 为 $0.15 \sim 0.46 \text{ nT}$ 。差值较大的是 H 、 X 两要素，其中喀什台 X 要素差值最大，为 3.35 nT ， Z 、 F 、 Y 要素的差值非常小，个别台站的差值甚至为负，表明 CGGM 模型的长期变化主磁场预测值和台站观测值之间的一致性较好，CGGM 模型可以很好地描述主磁场的长期变化。

表 4 后验分析中台站观测值与 CGGM 模型计算值逐月变化量的均方根误差
Tab. 4 Root mean square error of monthly variation of the values observed at the stations and the values calculated through CGGM model in posterior analysis

台站	$\Delta D/(')$		$\Delta H/\text{nT}$		$\Delta Z/\text{nT}$		$\Delta F/\text{nT}$		$\Delta I/(')$		$\Delta X/\text{nT}$		$\Delta Y/\text{nT}$	
	确定期	预测期	确定期	预测期	确定期	预测期	确定期	预测期	确定期	预测期	确定期	预测期	确定期	预测期
乌鲁木齐	0.24	0.32	3.90	6.41	2.45	1.99	2.29	1.83	0.25	0.36	3.93	6.47	1.65	2.09
喀什	0.19	0.24	3.87	7.05	2.14	2.56	2.25	2.37	0.26	0.42	3.93	7.28	1.39	1.85
且末	0.18	0.19	4.03	5.86	2.25	2.22	2.38	2.64	0.26	0.39	4.02	7.06	1.37	1.52
乌什	0.40	0.33	3.81	6.48	2.61	2.25	2.32	2.07	—	—	—	—	—	—
红浅	0.37	0.48	3.48	6.39	2.88	2.20	2.65	1.99	—	—	—	—	—	—

4 结论

本文利用新疆地区 3 个地磁基准台和 2 个地磁基本台的最新观测数据，通过科学合理的数据处理方法，剔除了外源变化磁场和岩石圈磁场成分，从多个方面对 CGGM 模型的计算精度进行了评估，并且对静日子夜均值分离外源变化磁场的不完全性进行了分析，得到的主要结论如下：

（1）总体来看，台站观测的月变化速率 $SV_{\text{观测}}$ 要大于模型计算值 $SV_{\text{模型}}$ ，但差别不大， D 、 I 的最大月变化速率差为 $0.086\ 88'$ ，其它 5 个要素中最大月变化速率差仅为 $0.891\ 4 \text{ nT}$ ，表明台站观测和模型计算的长期变化速率差异较小。

（2）CGGM 模型 F 值的 $RMSE$ 略大于 IGRF13 模型，其差值为 26.7 nT ，相对于 5 万多 nT 的磁感应强度来说此差别可忽略不计，随着“张衡一号”地震电磁卫星数据的增多，CGGM 模型的计算精度

还会有进一步提升的空间。

（3）为了剔除台站观测数据的岩石圈磁场成分，对台站观测数据进行逐月相减，得到了台站观测的主磁场逐月变化，与模型的主磁场逐月变化进行比较，台站观测和模型计算的逐月变化量偏差很小，表明 CGGM 模型计算值和台站观测值具有比较好的一致性。

（4）通过提取静日子夜均值的方法并不能够完全剔除外源场的影响，台站观测逐月变化量中会有几个 nT 的剩余电离层磁场随机叠加其中，使得台站观测值逐月变化量序列的离散程度略有增大，否则，表 3 中逐月变化量差值的标准偏差会更小一些。

（5）把台站观测值和模型计算值的逐月变化量分为确定期和预测期两个时段，分别计算均方根误差。结果表明，CGGM 模型的长期变化主磁场预测值和台站观测值之间的一致性较好，可以很好地描述主磁场的长期变化。

应急管理部国家自然灾害防治研究院副研究员杨艳艳博士为本文提供了最新计算的 CGGM 模型及程序, 中国地震局地球物理研究所副研究员赵旭东博士和何宇飞博士给予了本文诸多有益的指导, 世界地磁数据中心, 日本 World Data Center for Geomagnetism, Kyoto 提供了国际地磁静扰日信息, 新疆维吾尔自治区地震局各地磁台站工作人员为连续可靠的地磁观测数据付出了大量辛勤的劳动, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- 常宜峰, 柴洪洲, 明锋, 等. 2014. 世界地磁场模型 WMM2010 与台站年均值对比[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 39(8): 923–929.
- Chang Y F, Chai H Z, Ming F, *et al.* 2014. Comparison between the world geomagnetic field model WMM2010 and the annual mean values of the stations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 39(8): 923–929. (in Chinese)
- 陈斌, 顾左文, 狄传芝, 等. 2012. 第 11 代国际地磁参考场[J]. 国际地震动态, (2): 20–29.
- Chen B, Gu Z W, Di C Z, *et al.* 2012. The 11th international geomagnetic reference field[J]. Recent Developments in World Seismology, (2): 20–29. (in Chinese)
- 高明国, 康国发. 2010. 卫星地磁场模型和 IGRF 模型与中国地磁台观测值的比较分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 32(5): 547–552.
- Gao M G, Kang G F. 2010. Comparison and analysis of satellite geomagnetic field model and IGRF model with observations from China geomagnetic observatory[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 32(5): 547–552. (in Chinese)
- 刘学旺, 李磊, 张艺腾, 等. 2018. 利用 TIE–GCM 模式计算电离层电流及夜间电离层磁场[J]. 空间科学学报, 38(1): 29–36.
- Liu X W, Li L, Zhang Y T, *et al.* 2018. Calculating ionospheric current and nighttime ionospheric magnetic field using the TIE–GCM model[J]. Chinese Journal of Space Science, 38(1): 29–36. (in Chinese)
- 聂琳娟, 邱耀东, 申文斌. 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. 2017. Accuracy evaluation and applicability analysis of IGRF12 and WMM2015 models in the Chinese region[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 42(9): 1229–1235. (in Chinese)
- 王宣文. 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. Error analysis of international geomagnetic reference field in Chinese mainland[J]. Chinese Journal of Geophysics, 46(2): 171–174. (in Chinese)
- 王月华. 2000. 第七代国际地磁参考场的检验与评价[J]. 地球物理学进展, 15(1): 89–97.
- Wang Y H. 2000. Test and evaluation of the seventh generation International Geomagnetic Reference Field[J]. Progress in Geophysics, 15(1): 89–97. (in Chinese)
- 徐如刚, 黎哲君, 张玮晶, 等. 2014. EMM2010 模型在中国大陆的精度评估及其适用性[J]. 吉林大学大学学报(地球科学版), 44(3): 1018–1030.
- Xu R G, Li Z J, Zhang W J, *et al.* 2014. Accuracy evaluation and applicability of EMM2010 model in Chinese mainland[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 44(3): 1018–1030. (in Chinese)
- 徐文耀. 2006. 地磁学发展史的启示[J]. 自然杂志, 28(6): 349–352.
- Xu W Y. 2006. Enlightenment from the development history of geomagnetism[J]. Chinese Journal of Nature, 28(6): 349–352. (in Chinese)
- 徐文耀. 2009. 地球电磁现象物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- Xu W Y. 2009. Physics of Electromagnetic Phenomena of the Earth[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press. (in Chinese)
- 翟世龙, 雷晴, 毛玉剑, 等. 2022. 乌鲁木齐地区地磁场静日变化特征分析[J]. 内陆地震, 36(3): 121–127.
- Zhai S L, Lei Q, Mao Y J, *et al.* 2022. Analysis on the characteristics of the static diurnal variation of the geomagnetic field in Urumqi area[J]. Inland Earthquake, 36(3): 121–127. (in Chinese)
- 张素琴, 杨冬梅, 李琪, 等. 2008. 中国部分地磁台站年均值与 IGRF 模型一致性分析[J]. 地震地磁观测与研究, 29(2): 42–49.
- Zhang S Q, Yang D M, Li Q, *et al.* 2008. Analysis of the consistency between the annual mean of some geomagnetic stations in China and the IGRF model[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 29(2): 42–49. (in Chinese)
- Bhardwaj S K, Rangarajan G K. 1997. Geomagnetic secular variation at the indian observatories[J]. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 49(9): 1131–1141.
- Burdelnaya I A, Golovkov V P, Fujiwara S, *et al.* 1999. Regional orthogonal models of the geomagnetic field changes over the Far East[J]. Earth Planets and Space, 51: 287–296.
- Cain J, Daneils W, Shirley J, *et al.* 1965. An evaluation of the main geomagnetic field, 1940–1962[J]. Geophys Res, 70(15): 3647–3674.
- Shen X H, Zhang X M, Yuan S G, *et al.* 2018. The state-of-the-art of the China Seismo–Electromagnetic Satellite mission[J]. Science China(Technological Sciences), 61(5): 634–642.
- Yang Y Y, Hulot G, Vigneron P, *et al.* 2021. The CSES global geomagnetic field model(CGGM): An IGRF–type global geomagnetic field model based on data from the China Seismo–Electromagnetic Satellite[J]. Earth, Planets and Space, 45: 1–21.

Consistency Analysis of the Monthly Variation of the Main Magnetic Field by the Global Geomagnetic Field Model and by the Geomagnetic Station in Xinjiang Area

ZHAI Shilong¹, HUANG Jing², LEI Qing¹, MAIMAITIMIN Tuergong¹, AISA Ismaili¹

(1. Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

(2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract

After having been eliminated their exogenous magnetic elements, the observed data at five geomagnetic stations in Xinjiang region from August 2018 to July 2022 are analyzed for their consistency with the calculated values of the main magnetic field by the China Seismo-Electromagnetic Satellite Global Geomagnetic Field Model (CGGM) based on the data observed by the China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES). The results show that: ①The monthly change rate (SVS) of the geomagnetic value observed at the stations is slightly larger than the monthly change rate SV_M calculated by CGGM model. The difference of the maximum monthly change rate of magnetic declination D is $0.08688'$, and so is difference of the maximum monthly change rate of the magnetic inclination I . For other five magnetic elements, their own difference of the maximum monthly change rate is only 0.8914 nT. ②The difference of the root mean square errors between the total geomagnetic intensity F calculated by CGGM model and the total geomagnetic intensity F calculated by the IGRF13 model is 26.7 nT. With the increase of the data from CSES, the computing accuracy of CGGM model will be improved. ③Both the monthly variations of the values observed at the stations and the monthly variations of the calculated values by CGGM model have little deviation. The root-mean-square error of D ranges from $0.18'$ to $0.41'$. The root-mean-square error of I ranges from $0.18'$ to $0.41'$ too. H ranges from 4.61 nT to 5.10 nT. Z ranges from 2.24 nT to 2.68 nT. F ranges from 2.15 nT to 2.47 nT. X varies from 4.89 nT to 5.24 nT, and Y varies from 1.42 nT to 1.80 nT. All these indicate that the calculated values by CGGM model have good consistency with the observed values by stations. ④The influence of external field could not be completely eliminated by extracting the mean value of the static day and static night. There would be several nanoteslas of magnetic residual superimposed in the monthly variation of the observed values at the station, resulting in a slight increase in the standard deviation of the monthly variation difference between the observed values at the station and the values calculated by the model. ⑤The posterior comparative analysis shows that the long-term variation of the main magnetic field predicted by the CGGM model is in good agreement with the observed value at the station; the predicted values can well describe the long-term variation of the main magnetic field.

Keywords: CGGM model; Xinjiang region; China Seismo-Electromagnetic Satellite; main magnetic field; monthly changes; consistency