

XU Yue, YANG Yanyan, WANG Jie, ZEREN Zhima. Comparison of Geomagnetic Models with Different Spatio-temporal Resolutions and Measured Data from Geomagnetic Stations (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(6): 1425–1438. CSTR:32142.14.cjss.2025-0001. DOI:10.11728/cjss2025.06.2025-0001

不同时空分辨率地磁模型与地磁 台站实测数据对比*

徐 玥 杨艳艳 王 婕 泽仁志玛

(应急管理部国家自然灾害防治研究院 北京 100085)

摘 要 在近年来磁场变化较快的北极以及南大西洋异常区选取了国际地磁台网 (INTERMAGNET) 的 4 个地磁台站, 利用国际地磁参考场模型 IGRF 以及目前国内时空分辨率最高的多场源 Swarm 模型两个时空分辨率不同的全球地磁场模型, 定量研究了模型空间分辨率以及更新周期相对地磁台站实测数据的偏差. 研究结果表明: 同等更新周期情况下, 在太阳活动宁静时期, 对于岩石圈磁异常不明显的区域, IGRF 和其他空间分辨率更高的地磁场模型给出的结果较为接近, 而对于岩石圈磁异常较为明显的区域, 空间分辨率更高的全球地磁场模型更接近实测值; 在 IGRF 未更新的 5 年 (2016–2020 年) 内, 地磁台站实测值与 IGRF 模型之间存在明显的时间漂移, 典型漂移可达 100 nT 以上, 但漂移的量值也存在地区差异, 这与地磁场全球变化不均匀有关. 相比之下, 地磁台站观测值与 Swarm 模型之间则未观测到明显的漂移现象. 这一结果表明, 在地磁场快速变化时期, 缩短主磁场的更新周期十分必要. 本项研究可以为全球地磁场模型的相关应用提供依据和参考.

关键词 地磁场模型, 地磁台站观测, 国际地磁参考场模型, 南大西洋异常区

中图分类号 P353.1

Comparison of Geomagnetic Models with Different Spatio-temporal Resolutions and Measured Data from Geomagnetic Stations

XU Yue YANG Yanyan WANG Jie ZEREN Zhima

(National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085)

Abstract This study focuses on four INTERMAGNET geomagnetic stations located in the Arctic region and the South Atlantic Anomaly regions, where rapid geomagnetic changes have been observed in recent years. Utilizing two global geomagnetic field models with different spatial and temporal resolutions, the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) model and the Swarm model, a multi-field source model that offers the highest spatiotemporal resolution currently available in China. The influence of model spatial resolution and update cycles on observatory measurements is quantitatively

* 国家自然科学基金项目资助 (42274214)

2025-01-01 收到原稿, 2025-05-13 收到修定稿

assessed. The findings are as follows. In regions without significant lithospheric magnetic anomalies, the IGRF and Swarm models yield relatively consistent results. However, for regions with more prominent lithospheric magnetic anomalies, the Swarm model with higher spatial resolution provides better agreement with the measurements. While the IGRF model showed significant temporal drift (often exceeding 100 nT) against station measurements during its five-year non-update period (from 2016 to 2020), the Swarm model exhibited no such drift. The magnitude of the IGRF drift varied regionally, reflecting the heterogeneity of global geomagnetic field variations. These results highlight the need to shorten the update interval for core field models during periods of rapid geomagnetic change. Statistical analysis from 120 global INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network) stations further confirms that, within the IGRF's five-year update cycle, the Swarm model exhibits smaller mean and median absolute deviation compared to the IGRF model. The higher spatiotemporal resolution of the Swarm model yields results that are more consistent with observations and thus offers a more accurate representation of the geomagnetic field. This study provides a valuable basis and reference for the application of global geomagnetic models.

Key words Geomagnetic field model, Geomagnetic observatory observation, IGRF, South Atlantic anomaly

0 引言

全球地磁场模型在国防建设、资源探测、地磁导航、科学研究等方面均有重大应用价值,同时在地磁台站、航磁以及海洋磁场等近地表数据处理分析中也发挥着非常重要的作用。目前国际上基于地磁台站、航磁、卫星磁测等数据建立了很多全球地磁场模型。这些模型按场源可以分为5类。第一类,主磁场模型,例如国际地磁参考场模型 IGRF^[1]、世界地磁模型 WMM^[2],空间分辨率均约 3000 km,更新周期均在 5 年左右。第二类,岩石圈磁场模型,例如 MF 模型^[3]、LCS 模型^[4]、Thébault 模型^[5]。根据数据来源不同,这些模型空间分辨率在几百到几十千米不等。因为岩石圈磁场较为稳定,一般不做定期更新。第三类,电离层或磁层磁场模型,主要用于描述电离层和磁层空间中电流体系扰动,例如 DIFI-5 模型^[6]、AMPS 等^[7]。第四类,海洋磁场模型,例如考虑半日潮 M2 的 Egbert 和 CO₂ 预测模型^[8,9]。第五类,同时包含上述部分或全部场源在内的多场源模型等,例如 GRIMM 模型^[10]、POMME 模型^[11]、CHAOS 模型^[12,13]、CM 模型^[14]、HDGM 模型^[15]、EMM 模型、CGGM 模型^[16]以及 Yang 等^[17]基于 Swarm 数据建立的 Swarm 模型。这些模型基本以卫星磁测数据为主,典型空间分辨率在几百 km,更新周期相较于 IGRF 也更短。由此可见,不同模型空间分辨率和更新周期均存在很大差异。

目前应用最广泛的全球地磁场模型为国际地磁参考场模型 IGRF,其次还有世界地磁模型 WMM。除此之外,随着卫星磁测发展起来的多场源模型,因其描述场源多、使用方便,也逐渐受到青睐。在实际应用中,地磁模型的精度作为关键指标与技术可靠性和经济效益息息相关。例如,在地磁导航领域,地磁模型精度不足可能导致航天器、卫星等姿态调整和轨道控制失败,航空、航海等航向偏差^[18];再如,在开展海洋、航磁等近地表磁异常数据提取时,往往需要利用主磁场模型进行正常场改正^[19],如果主磁场模型不够准确,可能导致磁异常信息提取不准确,影响最终的磁异常探测结果。而在资源探测和开采领域,低精度地磁模型可能导致油气等开采的钻井定向误差发生重大偏移^[20],影响开采效率或增加成本等。因此如何根据实际需要选择合适模型十分关键,然而目前并没有相关工作系统开展不同时空分辨率模型间的精度对比,而这又恰好是地磁模型实际应用中最受关注的问题。特别是以往国内很多实际应用主要依赖于 IGRF,在其一个 5 年更新周期内地磁模型精度变化量,以及中国近年来发展的更高时空分辨率模型精度提升量是开展地磁模型相关应用中最受关注的话题。

本文选用两种具有显著时空分辨率差异的模型进行对比分析:一是国际上应用最广泛的 IGRF 模型,二是中国目前时空分辨率最高的 Swarm 多场源

模型. 基于 INTERMAGNET 地磁台站实测数据, 通过开展不同时空分辨率地磁模型与这些地磁台站实测数据的对比分析, 为相关应用提供这两种完全不同时空分辨率模型的普适性量化参考依据, 在此基础上, 地磁模型用户可以根据本文研究结果结合各自科学研究或技术需求评估之后决定选择使用哪种模型. 首先选取近年来地磁场存在快速变化的两个典型地区开展对比研究, 其中一个为北极地区^[1], 另一个是在持续扩张的南大西洋异常区^[1,17]; 再开展全球地磁台站的对比统计研究.

1 模型与数据

1.1 地磁场模型

利用以下两个不同时空分辨率的全球地磁场模型开展研究.

(1) 国际地磁参考场 IGRF. 该模型由国际地磁与高空物理协会 (IAGA) 牵头, 联合全球地磁科学家制作. 其提供了 1900 年至今的主磁场系数用来描述全球主磁场分布及线性变化. 其中主磁场系数求解至 13 阶, 对应空间分辨率约 3000 km, 变化场求解至 8 阶. IGRF 模型每 5 年进行一次更新, 目前正在更新第 14 代, 但由于 IGRF-13 版本之后处于太阳活动高年, 为了降低其带来的影响, 这里选择太阳活动水平较低时期的 IGRF-12 开展研究^[21].

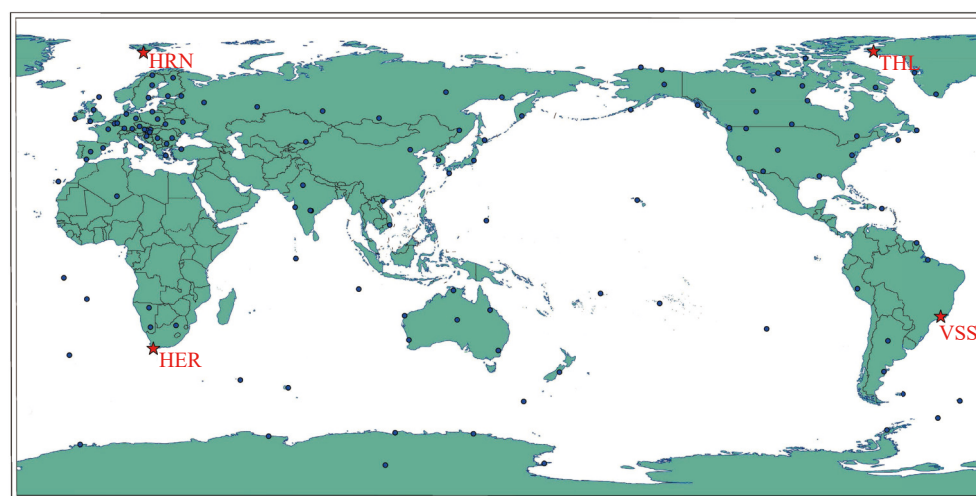
(2) Swarm 模型. 该模型为 Yang 等^[17] 基于

Swarm A 卫星 2014—2022 年末总计 9 年的观测数据构建, 是包含主磁场及其非线性变化、岩石圈磁场和磁层外源场在内的综合性 4D 地磁场模型, 模型系数求解至 70 阶, 对应空间分辨率为 571 km, 主磁场变化求解至 13 阶, 采用 6 阶 B 样条函数描述, 可实现 2014—2022 年间主磁场及其长期变化、长期加速度等信息更为准确的计算. 该模型是国内目前时空分辨率最高的全球多场源综合模型.

IGRF-12 是基于 2015 年之前的数据建立的, 在 2015—2020 年使用. 这里选择 2016—2020 年的台站观测数据来评估整个周期内的 IGRF 精度. 而 Swarm 模型选用 2015 年之后的数据, 代表引入更新机制后的模型精度.

1.2 地磁台站数据

目前全球最为完备和广泛应用的地磁台站观测数据来自国际地磁台网 (INTERMAGNET), 其地磁观测代表全球最高水平, 使用的地磁观测仪器分辨率优于 0.1 nT. 官方网站的台站列表中给出了详细的台站名称、经纬度位置、高度、状态及台站布设的相应测量设备. 图 1 为 INTERMAGNET 台站全球分布, 共收集了全球 100 多个地磁台站数据. 在近年来地磁场变化最快、最受关注的北极和南大西洋异常区选取典型地磁台站开展研究, 包括最靠近北极的图勒 THL 台站 (77.47°N, 69.227°W) 和霍恩松 HRN 台站 (77°N, 15.55°E), 位于南大西洋传统异常区的瓦苏拉斯 VSS 台站 (22.4°S, 43.65°W) 和第二异常区附近的



审图号: GS(2016)1663号

图 1 INTERMAGNET 台站全球分布

Fig. 1 Global distribution map of INTERMAGNET stations

赫曼纽斯 HER 台站 (34.43°S, 19.23°E). 为避免台站实测数据中可能存在的总场数据缺失, 研究中的总场由实测三分量数据计算得到.

1.3 坐标系及转换

地磁台站观测经常采用 WGS84 大地坐标系描述位置 (h, α, ϕ , 分别指代高度、纬度和经度), 地磁场矢量信息以 x, y, z 三分量表示 (代表北向、东向和地面向). 而在卫星观测和模型中常用地心球坐标系 (以地球平均半径 6371.2 km 为参考面), 并采用 r, θ, ϕ (分别代表地心距、极角即余纬度和方位角即经度) 描述位置, 采用 B_r, B_θ, B_ϕ (分别代表地心球坐标系下的径向分量、北向分量和东向分量磁场) 描述磁场. 两种坐标系之间的转换关系为^[22]

$$\cot \theta = \frac{h\sqrt{a^2\cos^2\alpha + b^2\sin^2\alpha} + b^2}{h\sqrt{a^2\cos^2\alpha + b^2\sin^2\alpha} + a^2} \tan \alpha, \quad (1)$$

$$r^2 = h^2 + 2h\sqrt{a^2\cos^2\alpha + b^2\sin^2\alpha} + \frac{a^4\cos^2\alpha + b^4\sin^2\alpha}{a^2\cos^2\alpha + b^2\sin^2\alpha}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} B_r \\ B_\theta \\ B_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\psi & 0 & -\cos\psi \\ -\cos\psi & 0 & \sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中, $a = 6378.137$ km 和 $b = 6356.752$ km 分别为 WGS84 给出的赤道和极区的参考半径, $\psi = \theta - 90^\circ + \alpha$. 这里利用上述转换关系将磁场统一到 (x, y, z) 坐标系开展分析.

1.4 地磁指数

Kp 指数是根据全球 13 个地磁观测站的标准化

K 指数 (K_s) 或地磁记录取均值计算得出的. Kp 指数数值范围为 0~9, 三等分为单位 (0o, 0+, 1-, 1o, 1+, 2-, 2o, 2+, ..., 8-, 8o, 8+, 9-, 9o), 数值越大表示地磁场越活跃. 研究所用 Kp 指数来源于 Coordinated Data Analysis Web (CDAWeb), 由以上 $Kp \times 10$ 得到.

2 研究结果

2.1 单日对比结果

2.1.1 北极地区台站

图 2 和图 3 分别给出了 2016 年 3 月 1 日磁宁静期 ($Kp \times 10 = 17$) HRN 和 THL 台站实测总场 F 、三分量 x, y, z 与 IGRF 和 Swarm 模型的残差 (dF, dx, dy, dz) 曲线, 分别对应子图 (a)(b), 图中 dF, dx, dy, dz 分别代表总场及磁场 x, y, z 三分量与台站实测值的差值量, 洋红色虚线为总场曲线的一次线性拟合结果. 从图中可以看出, 由于地磁场随时间变化, 模型与实测数据残差在一天之中也会发生变化. 选择当天地方时位于 0~2 h 的磁场数据进行对比, HRN 台站总场实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型的差值均值分别为 85.61 nT 和 65.65 nT, 但 THL 台站的对比结果分别为 160.48 nT 和 83.72 nT. HRN 站两个模型残差变化趋势一致, 且差异不大, 量值均在几十 nT 左右, 两个模型计算结果相差 19.96 nT. 而对于 THL 站, 图 3(a)(b) 两个模型给出的残差值差异为 76.76 nT, 台站实测数据与 IGRF 模型的总场以及东

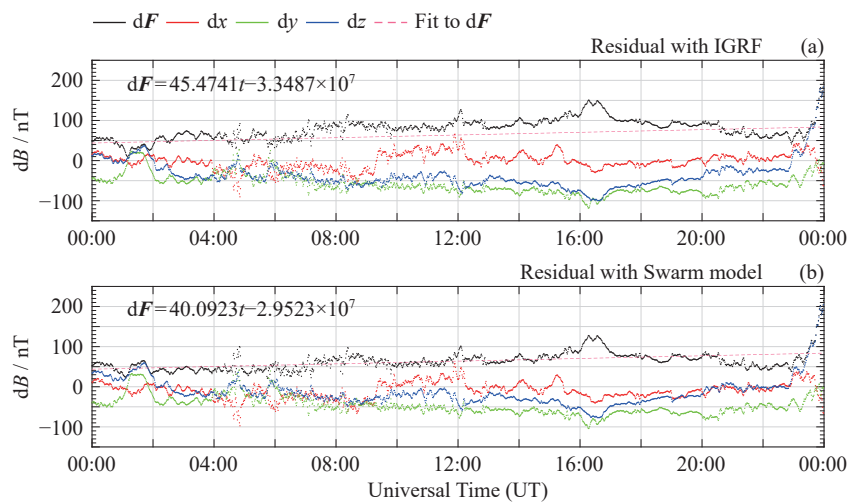


图 2 2016 年 3 月 1 日 HRN 台站实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型差值

Fig. 2 Difference between the measured data of HRN station and IGRF and Swarm model on 1 Mar. 2016

向分量差值均超过 100 nT, 而与 Swarm 模型总场差值约在 100 nT 以内, 表明 Swarm 模型与实测磁场更为接近. 需要指出的是, 对比两个台站所在地点发现, HRN 位于岩石圈磁异常并不显著的区域, 两个模型给出的残差较为接近; 而 THL 位于岩石圈磁异常较为显著的区域, 且由于 IGRF 的模型计算值并未包含岩石圈磁场, 而 Swarm 模型能够给出岩石圈磁场信息, 因此 THL 实测值与 Swarm 模型的残差值要小于 IGRF 模型 (代表与实测值更为接近), 图 2 和图 3 直观反映了不同空间分辨率模型与实测数据的差异性.

图 4 和图 5 进一步计算了 2019 年 1 月 1 日磁宁

静期 ($Kp \times 10 = 10$) 两个台站与 IGRF 和 Swarm 模型的对比结果. 此时 IGRF-12 模型已经超过四年未进行更新. 结合图 2 (a) 和图 3 (a) 可以看出, 相比 2016 年的结果, 实测数据与 IGRF 模型残差明显增大, 分量变化量和总场变化量分别从原来 <100 nT 和 100 nT 左右增加到 >100 nT 和 250 nT, 台站实测数据与 IGRF 模型的差异甚至可以超过 200 nT. 而相比之下, 持续更新的 Swarm 模型给出的差异则非常稳定, 总场差值在 60~80 nT, 固定值上下波动. x , y , z 分量在 HRN 台站差值分别为 -13, -40, -15 nT; 在 THL 台站分别为 -50, 32, -38 nT. 由此可见, 缩短地球主磁场模型的更新周期十分必要.

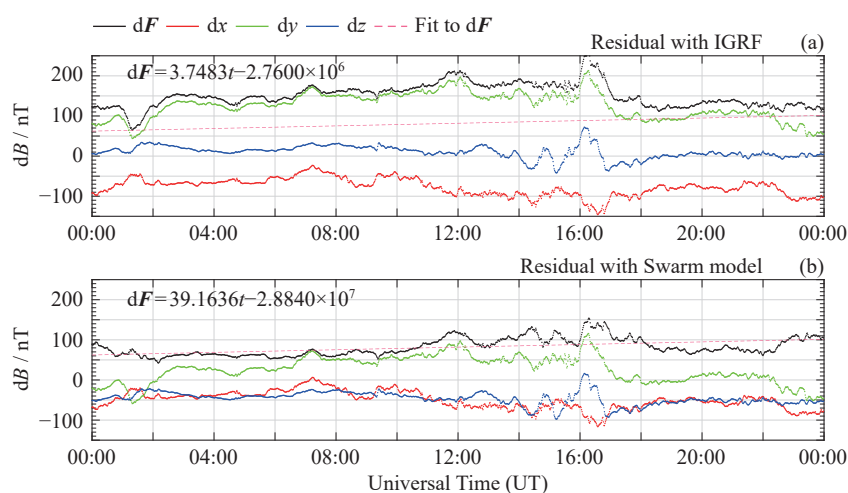


图 3 2016 年 3 月 1 日 THL 台站实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型差值

Fig. 3 Difference between the measured data of THL station and IGRF and Swarm model on 1 Mar. 2016

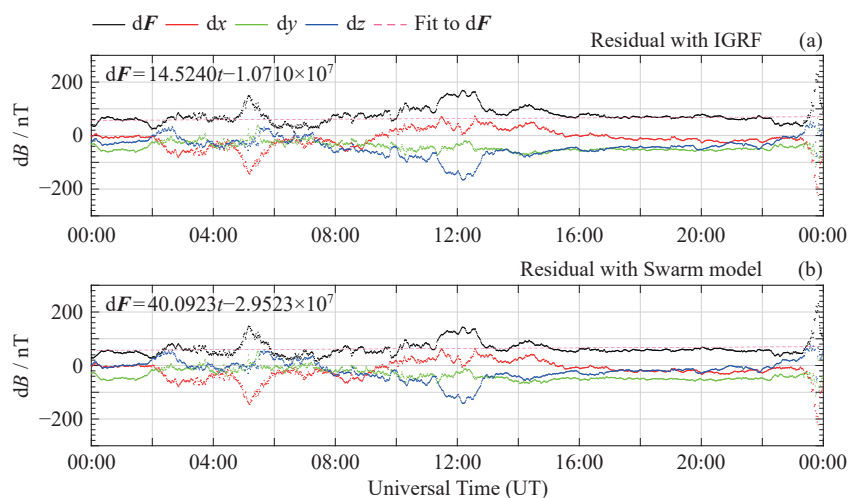


图 4 2019 年 1 月 1 日 HRN 台站实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型差值

Fig. 4 Difference between the measured data of HRN station and IGRF and Swarm model on 1 Jan. 2019

2.1.2 南大西洋异常区台站

图 6~9 给出了 VSS 台站和 HER 台站 2016 年 3 月 1 日和 2019 年 1 月 1 日同日期的单日实测数据与两个模型的残差对比结果. 图中 dF , dx , dy , dz 分别代表总场及磁场 x , y , z 分量与台站实测值的差值量, 洋红色虚线为总场曲线的线性拟合结果. 其中 VSS 台站靠近南大西洋传统异常区中心, HER 台站靠近近年来扩张的南大西洋第二异常区. 对于 VSS 台站, 图 6 表明在 2016 年观测值相较两个模型估算值的残差差异不大. 对比 3 年后的 2019 年观测结果 (见图 7), 可以发现实测值与两个模型的残差依然较为稳定, 且两个模型给出的结果差异不大, 表明

两个模型在 3 年内对 VSS 台站的描述能力相当.

由图 8 可以看出, HER 台站 2016 年的实测值和两个模型残差值差异不大. 由图 9 (a) 可以看出, 2019 年的观测值与 IGRF 模型各分量残差值均增大, 总场残差超过 100 nT. 由图 9 (b) 可以看出, Swarm 模型 2019 年的实测值残差相比 2016 年变化不大, 再次证明了 Swarm 模型对地磁台站实测数据的描述能力.

2.2 5 年模型更新周期内的对比结果

2.2.1 北极地区台站

为进一步研究模型更新周期对模型计算结果和实测值的差异带来的影响, 开展了更长时序的对比分析, 考察 2016—2020 年 5 年内的地磁台站实测数据

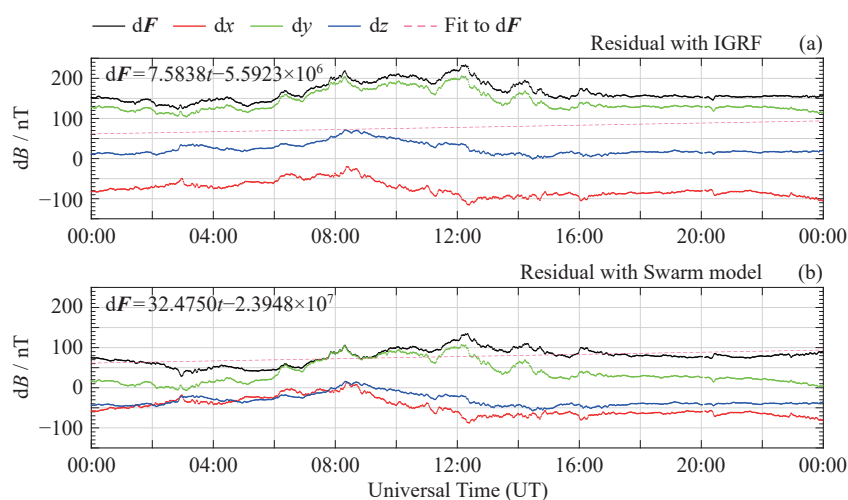


图 5 2019 年 1 月 1 日 THL 台站实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型差值

Fig. 5 Difference between the measured data of THL station and IGRF and Swarm model on 1 Jan. 2019

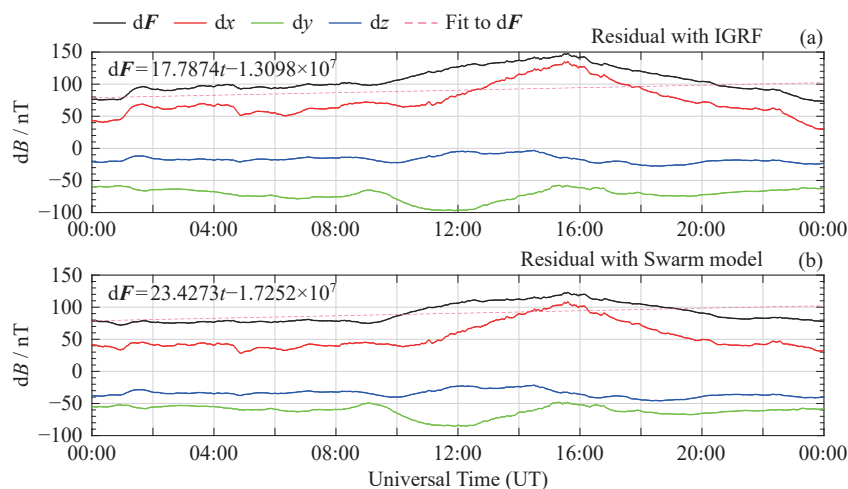


图 6 2016 年 3 月 1 日 VSS 台站实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型差值

Fig. 6 Difference between the measured data of VSS station and IGRF and Swarm model on 1 Mar. 2016

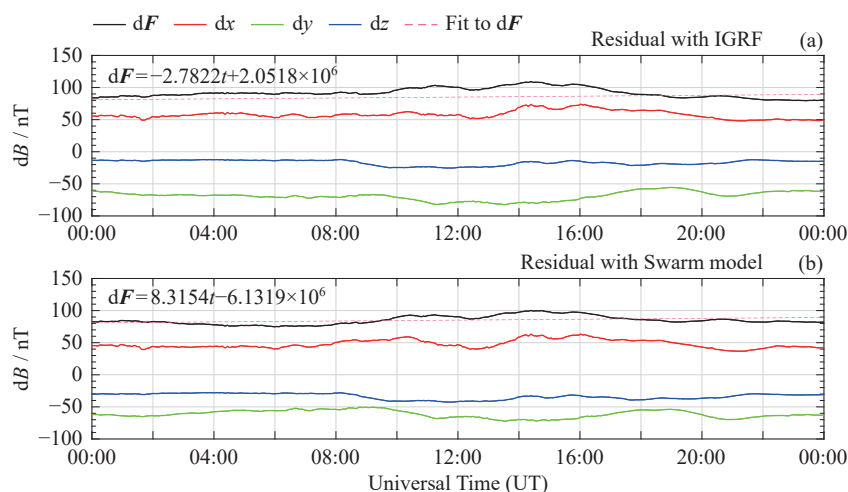


图 7 2019 年 1 月 1 日 VSS 台站实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型差值

Fig. 7 Difference between the measured data of VSS station and IGRF and Swarm model on 1 Jan. 2019

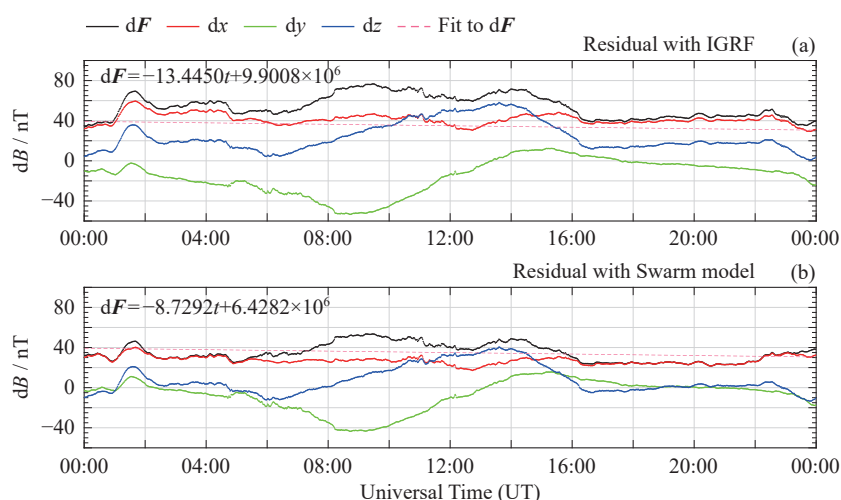


图 8 2016 年 3 月 1 日 HER 台站实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型差值

Fig. 8 Difference between the measured data of HER station and IGRF and Swarm model on 1 Mar. 2016

与 IGRF 模型和 Swarm 模型的残差变化. 为了尽可能排除其他因素影响, 挑选 $(Kp \times 10) < 23$ 的磁静时数据, 并对于每一个台站, 仅挑选位于 00:00–02:00 LT 的夜侧数据, 并取每天该时段内的数据计算均值, 用以代表当日的磁场情况, 再计算其与模型估计值的残差, 并按照时间序列绘制, 得到各台站 5 年来的实测数据与模型的对比结果.

图 10 和图 11 给出了北极 HRN 和 THL 两个台站分别与两个模型的对比结果, 其中图 10 (a) 表明, 在 HRN 台站实测值与 IGRF 模型残差的总场 dF 以及 dz 分量上观测到明显的时间漂移特征, 由 2016 年

的 < 50 nT 逐步增加至 > 100 nT. 而与 Swarm 模型的所有分量的残差值则一直稳定在 50 nT 以内 (见图 10b), 未观测到明显的时间漂移现象. 同时, 注意到台站实测值与两个模型的残差值存在明显尖峰, 其中 dx 分量和 dz 分量最明显, 这些尖峰应该来自电离层电流体系扰动 (例如场向电流等), 而两个模型均未考虑电离层电流体系引起的磁场变化. 对于 THL 台站, 图 11 (a) 所示 dy 分量、 dz 分量以及总场 dF 均存在时间漂移特征, dF 变化范围由 2016 年的 61~110 nT 增加至 2020 年的 177~250 nT, 5 年内的总场漂移幅度约 150 nT. 台站观测与 Swarm 模型残差

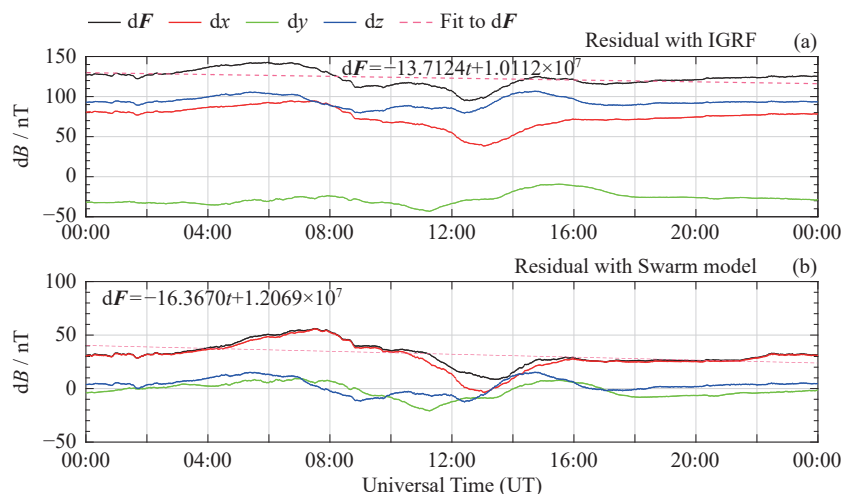


图 9 2019 年 1 月 1 日 HER 台站实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型差值

Fig. 9 Difference between the measured data of HER station and IGRF and Swarm model on 1 Jan. 2019

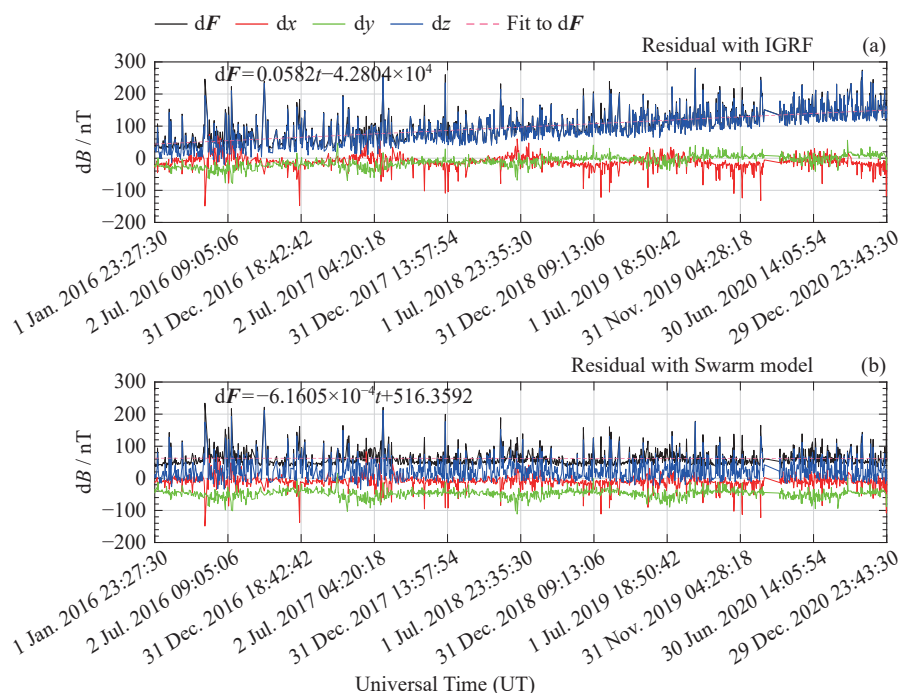


图 10 2016—2020 年 HRN 台站实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型差值

Fig. 10 Difference between the measured data of HRN station and IGRF and Swarm model from 2016 to 2020

结果如图 11 (b) 所示, 与 HRN 台站类似, 5 年内残差一直稳定在 50 nT 左右.

2.2.2 南大西洋异常区

图 12 和图 13 给出了两个南大西洋异常区台站在 2016—2020 年间与两个模型的残差变化情况. 其中 VSS 台站与 IGRF 模型残差如图 12 (a) 中 dy 和 dz 分量存在较明显的时间漂移, 二者 5 年内的漂移幅

度均在 50 nT 左右. 但由于 dy 分量和 dz 分量变化相反 (dy 增强, dz 减弱), 总场残差 dF 较为稳定, 未表现出明显的时间漂移. 而在 HER 台站图 13 (a) 中, dx , dy , dz 分量以及 dF 均观测到明显的时间漂移, dF 在 5 年内漂移幅度超过 150 nT. 另外一个现象是, 对比两个南大西洋异常区台站实测值与 IGRF 模型残差可以发现, 位于传统异常区的 VSS 台站的

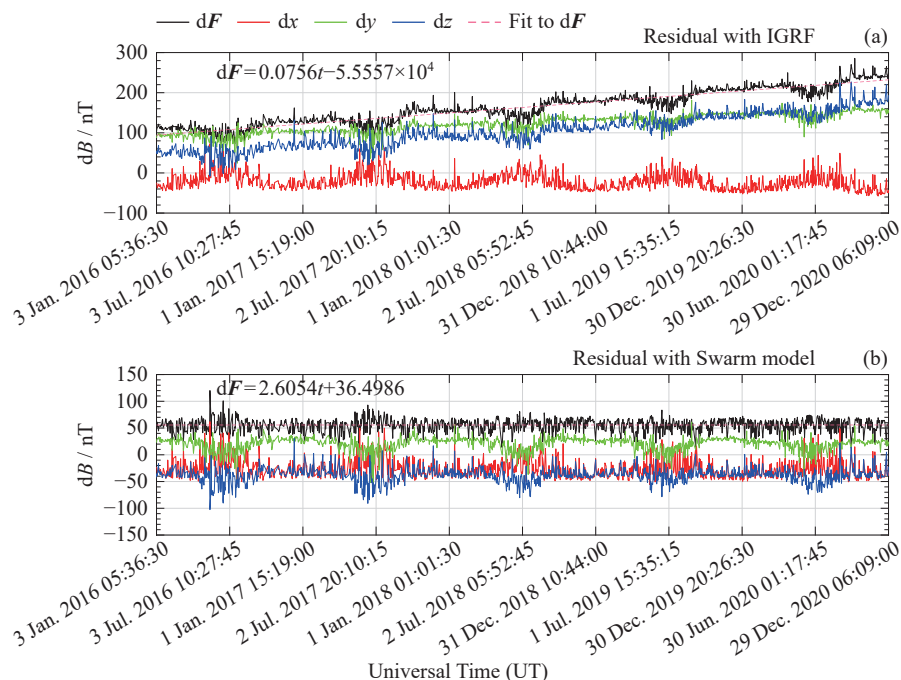


图 11 2016—2020 年 THL 台站实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型差值

Fig. 11 Difference between the measured data of THL station and IGRF and Swarm model from 2016 to 2020

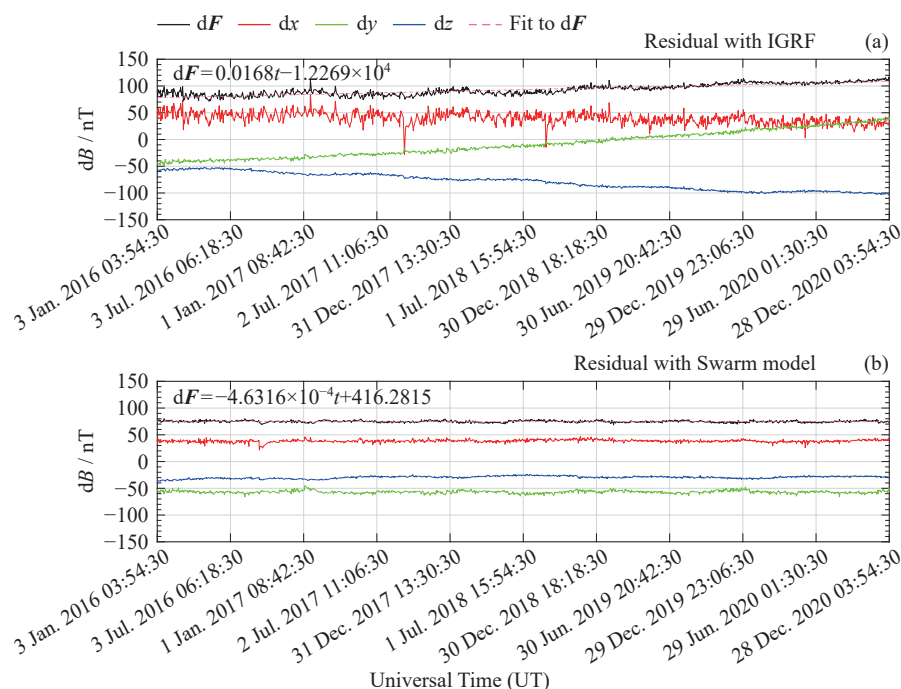


图 12 2016—2020 年 VSS 台站实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型差值

Fig. 12 Difference between the measured data of VSS station and IGRF and Swarm model from 2016 to 2020

dF 在 5 年内变化不大, 而位于扩张的第二异常区 HER 台站的 dF 则出现了非常明显的时间漂移特征. 由 Yang 等^[17] 基于 Swarm 卫星的地磁场建模研究中

图 3 (c) 可知, 南大西洋异常区的地磁总场变化存在明显的区域差异, 第二异常区变化最大, 在九年内的变化幅度在几百 nT 左右, 而 VSS 台站所在区域变化

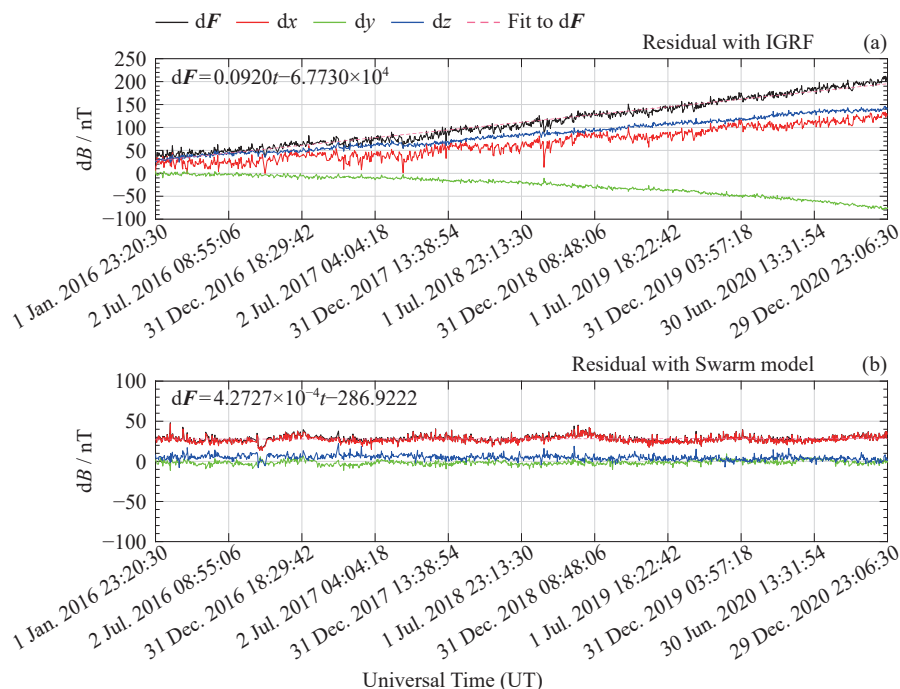


图 13 2016—2020 年 HER 台站实测数据与 IGRF 以及 Swarm 模型差值
Fig. 13 Difference between the measured data of HER station and IGRF
and Swarm model from 2016 to 2020

较小, 因此 5 年的主磁场模型更新周期对 VSS 台站总场影响不大, 但并不能很好地对变化大的 HER 台站实测值进行描述. 相比 IGRF 模型, 两个台站与 Swarm 模型的分量残差值分别如图 12 (b) 和图 13 (b) 所示, 在 5 年内非常稳定, 并未观测到明显的时间漂移特征, 表明该模型能够很好地对主磁场变化进行描述.

图 10~13 中发现的漂移主要原因是 IGRF 更新周期太长, 而实际的主磁场变化很复杂, 简单的线性关系已经不能描述这种变化 (而 Swarm 模型采用的更为复杂的 6 阶 B 样条函数描述这种变化). 在新一轮 IGRF 模型系数更新时, 会对上一版的模型系数利用最新观测数据进行修正, 例如 IGRF-13 发布时, 将 IGRF2015 模型更新为 DGRF2015. 下面图 14 为利用 IGRF-13 计算的 THL 和 HER 台站结果, 对比图 11 和图 13 可以看出, IGRF 模型更新后, 精度将会有一定提升, 但在 HER 台站还存在明显的漂移特征, 说明 IGRF 的主磁场线性模型并不能很好地表征所有台站 5 年内的变化.

2.3 全球地磁台站 5 年差值对比结果

在利用全球地磁台站开展统计之前, 首先对 4 年

间所选四个台站各分量的残差进行定量描述, 对存在时间漂移的分量进行了线性拟合, 详细参数见图 10~13. 表 1 给出了经过拟合后所选四个台站在 5 年内与 IGRF 模型计算结果残差的变化 (由 2020 年最后 1 天残差减去 2016 年第 1 天的残差计算得到, 例如 $d^2\mathbf{F} = d\mathbf{F}_{2020} - d\mathbf{F}_{2016}$), 可以看出这些地磁台站与 IGRF 模型残差值均存在不同程度的时间漂移, 只是具体漂移量值存在差异, 例如, VSS 台站总场残差变化较小, 5 年漂移约 30 nT, HER 台站则大得多, 约为 167 nT, 这与全球地磁场变化不均匀相关. 除 VSS 台站之外, 其他 3 个台站的 $d\mathbf{F}$ 典型漂移量均在 100 nT 以上. 相比 IGRF 模型, Swarm 模型与观测值的残差十分稳定, 表明其能更好地对主磁场的变化进行描述.

进一步比较 INTERMAGNET 提供数据的全球所有地磁台站观测值与模型计算结果的关系, 统计了 120 个台站 5 年内 (2016—2020 年) 观测量与两个模型计算结果差值的漂移量情况. 图 15~16 分别给出了总场差值 $d^2\mathbf{F}$ 以及三分量差值 d^2x , d^2y , d^2z 的分布情况, 可以看出 Swarm 模型全球整体残差值要远小于 IGRF 模型的残差值, 表明 Swarm 模型能够更好地反映全球地磁台站的真实观测值. 表 2 给出了两个

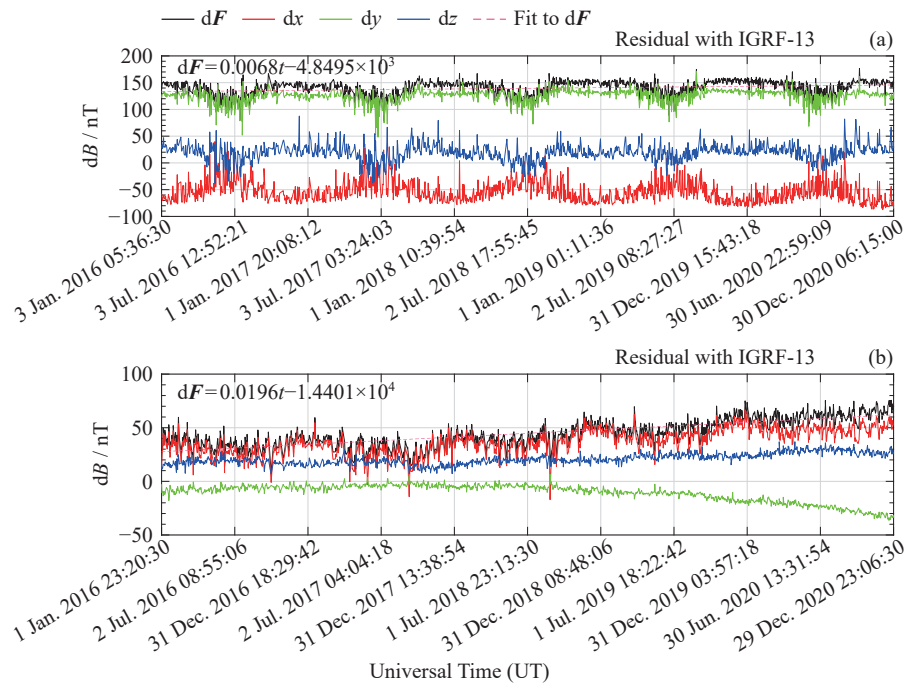


图 14 2016—2020 年 THL (a) 台站和 HER (b) 台站实测数据与 IGRF-13 模型差值
Fig. 14 Difference between the measured data of THL (a) and HER (b) station and IGRF-13 model from 2016 to 2020

表 1 5 年内地磁台站观测值与 IGRF 模型残差值变化

Table 1 Change of residual values between geomagnetic station observations and IGRF models in five years

台站	d^2x/nT	d^2y/nT	d^2z/nT	d^2F/nT	$\frac{d^2F}{dt}/(\text{nT}\cdot\text{a}^{-1})$
HRN	—	—	122.4437	106.6224	21.3245
THL	—	71.1189	132.8542	137.7824	27.5565
VSS	—	81.3349	-52.7932	30.5422	6.1084
HER	107.5876	-72.2271	113.3895	167.8455	33.5691

注 “—” 表示随时间漂移不明显的分量不纳入计算。

模型与台站观测值的差值在各个分量上的均值, 结果显示 Swarm 模型所有台站四分量残差均值分别为 55.26, 15.37, 39.91, -3.82 nT; 而 IGRF 模型所有台站四分量残差均值分别为 95.05, 52.98, 52.69, 25.80 nT, 四分量均值分别相差 39.798, 37.6088, 12.7835, 29.6287 nT, 总场的差值最大。

由于台站数据质量不均等因素存在, 可能会造成模型和台站观测值之间差值存在异常, 影响上述均值统计。因此, 本文引入绝对中位差 MAD (δ_{MAD}) 剔除异常峰值后开展定量对比分析。绝对中位差作为一种鲁棒性统计量比标准差更能适应数据集中的异常值,

少量异常值并不会影响实验结果, 其定义为

$$\delta_{\text{MAD}} = \text{median}(|A_i - A_m|). \quad (4)$$

其中, A_i 为数据集中的第 i 个值, A_m 为该数据集的中位数。表 3 给出了全球地磁台站分别与两个模型差值的绝对中位差计算结果, 可以看出 Swarm 模型给出的绝对中位差基本在 5 nT 以内, 而 IGRF 给出的结果均在几十 nT。该统计结果再次证明 Swarm 模型计算结果与台站观测值更接近, 在全球范围内可以更精确地描述地磁场观测值。因此, 在地磁相关的监测研究时建议选择时空分辨率更高的地磁场模型 (如 Swarm 模型) 作为参考。

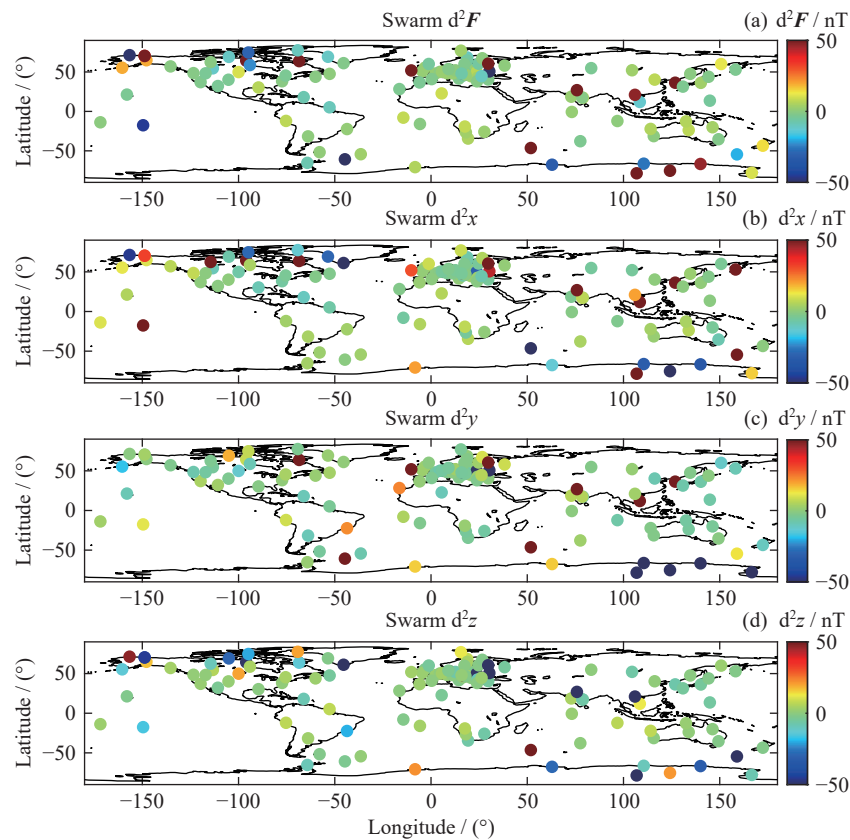


图 15 Swarm 高分辨率模型与 INTERMAGNET 全球台网实测的地磁漂移量分布 (2016—2020)

Fig. 15 Swarm high-resolution model and the distribution of the geomagnetic drift observed by INTERMAGNET global network (2016—2020)

3 结论与讨论

IGRF 模型和 Swarm 模型分别为采用球谐分析方法建立的全球主磁场模型和综合性地磁场模型. IGRF 模型仅采用线性外推的形式预测主磁场长期变化, 适用于短时间尺度, 长周期的模型预测误差会显著增大. 而 Swarm 模型同时考虑内、外源场, 且主磁场变化采用更为复杂的非线性描述, 能够给出长期变化、长期加速度等信息, 因此在长周期的模型预测方面更有优势, 同时能够随时根据最新数据实现模型更新, 具有地磁场变化的持续追踪能力. 本文对比了地磁台站实测数据和 IGRF, Swarm 两个地磁场模型估计值之间的残差结果. 选取磁场变化较快的北极和南大西洋磁异常区的台站进行了磁场残差数据日变化、年变化的时序分析. 结果表明, 太阳活动低年的宁静时期, 岩石圈磁异常不明显的区域, 分辨率不同的模型与台站观测的残差结果较为一致; 岩石圈磁异常明显的区域, 空间分辨率更高, 场源更丰富的 Swarm 模

型更稳定地接近实际测量值. 在 IGRF 模型一个 5 年的更新周期内, 地磁台站实测值与 IGRF 模型估算值存在非常明显的时间漂移. 为进一步定量描述全球地磁台站的整体对比情况, 对 INTERMAGNET 上全球 120 个台站开展了统计分析, 各个磁场分量的残差均值和绝对中位差均表明, 包含场源多、更新周期快的 Swarm 模型能够更准确地对台站观测值进行描述. 该研究表明模型和观测数据的长期一致性有助于更精确地追踪地磁场的演化规律, 缩短地磁场模型的更新周期对准确描述观测值具有重要意义.

本项工作通过开展系统性的研究, 为地磁模型用户提供完全不同类型模型的量化精度差异, 研究结果为不同时空分辨率模型的使用提供了案例和统计参考依据. 例如, 在开展航天器、卫星、航海等地磁导航应用时, 建议适时缩短主磁场模型的更新周期, 特别是在近年地磁场变化较快的时期. 而在针对油气开采等区域性的作业时, 除考虑磁场模型更新周期外, 还应采用包含岩石圈磁场在内的地磁场模型.

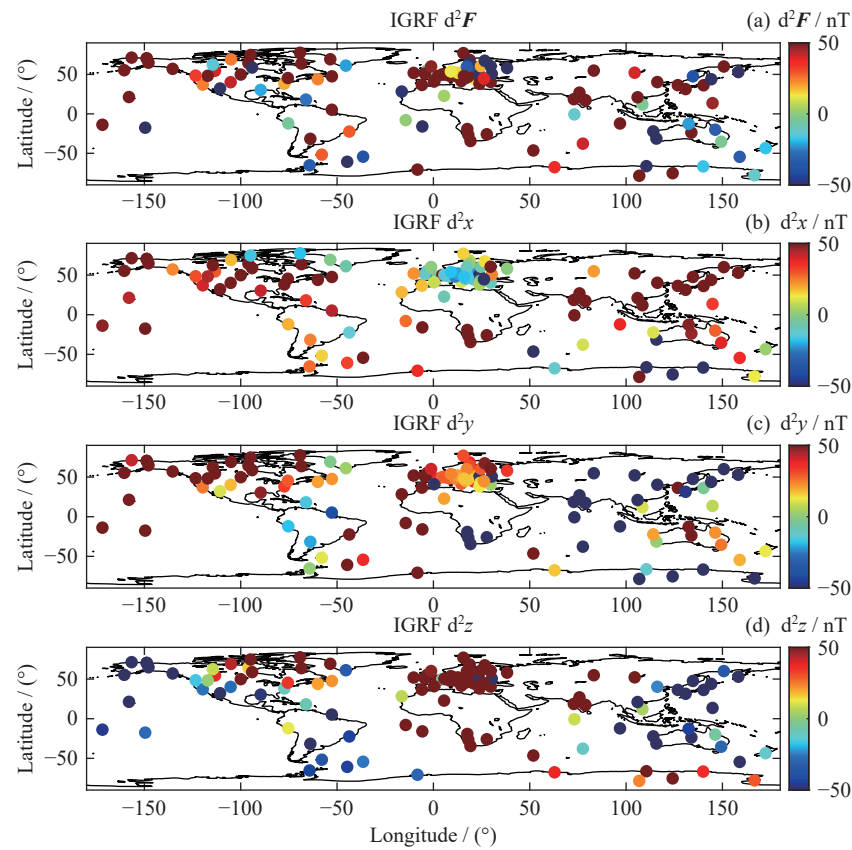


图 16 IGRF 标准模型与 INTERMAGNET 全球台站实测值的地磁长期变化漂移量分布 (2016—2020)
Fig. 16 Distributions of global geomagnetic secular variation drift between the IGRF Standard Model and INTERMAGNET measurements (2016—2020)

表 2 模型与台站观测值差值的均值对比

Table 2 Comparison of mean values of differences between models and station observations

模型	d^2F/nT	d^2x/nT	d^2y/nT	d^2z/nT
Swarm	55.2609	15.3731	39.9163	-3.8206
IGRF	95.0589	52.9819	52.6998	25.8081

表 3 模型与台站观测值差值的绝对中位差

Table 3 Median absolute deviation between the model and the station observations

模型	d^2F/nT	d^2x/nT	d^2y/nT	d^2z/nT
Swarm	4.16735	5.2352	4.7719	4.3705
IGRF	60.6932	39.942875	33.2245	68.30735

致谢 本文采用国际实时地磁观测网 International Real-time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET) 的地磁台站数据, 该数据由英国地质调查局 British Geological Survey (BGS) 提供, 具体获取路径为其官方数据平台 (https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2).

IGRF 地磁场模型任务数据由国际地磁与航空协会提供 (<https://geomag.bgs.ac.uk/research/modelling/IGRF.html>). Swarm 地磁场模型数据由应急管理部国家自然灾害防治研究院提供.

参考文献

- [1] ALKEN P, THÉBAULT E, BEGGAN C D, *et al.* International geomagnetic reference field: the thirteenth generation[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, **73**(1): 49
- [2] CHULLIAT A, ALKEN P, NAIR M, *et al.* The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025: Technical Report[R]. Boulder: National Centers for Environmental Information, NOAA, 2020
- [3] MAUS S, YIN F, LÜHR H, *et al.* Resolution of direction of oceanic magnetic lineations by the sixth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite magnetic measurements[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, **9**(7): Q07021
- [4] OLSEN N, RAVAT D, FINLAY C C, *et al.* LCS-1: a high-resolution global model of the lithospheric magnetic field derived from CHAMP and Swarm satellite observations[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, **211**(3): 1461-1477
- [5] THÉBAULT E, HULOT G, LANGLAIS B, *et al.* A spherical harmonic model of Earth's lithospheric magnetic field up to degree 1050[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(21): e2021gl095147
- [6] CHULLIAT A, VIGNERON P, HULOT G. First results from the swarm dedicated ionospheric field inversion chain[J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, **68**(1): 104.
- [7] LAUNDAL K M, FINLAY C C, OLSEN N, *et al.* Solar wind and seasonal influence on ionospheric currents from swarm and champ measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(5): 4402-4429
- [8] EGBERT G D, BENNETT A F, FOREMAN M G G. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1994, **99**(C12): 821-852
- [9] TYLER R H, MAUS S, LÜHR H. Satellite observations of magnetic fields due to ocean tidal flow[J]. *Science*, 2003, **299**(5604): 239-241
- [10] LESUR V, WARDINSKI I, HAMOUDI M, *et al.* The second generation of the GFZ reference internal magnetic model: GRIMM-2[J]. *Earth, Planets and Space*, 2010, **62**(10): 765-773
- [11] MAUS S, ROTHER M, STOLLE C, *et al.* Third generation of the Potsdam Magnetic Model of the Earth (POMME)[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, **7**(7): Q07008
- [12] OLSEN N, LÜHR H, SABAKA T J, *et al.* CHAOS—a model of the Earth's magnetic field derived from CHAMP, Ørsted, and SAC-C magnetic satellite data[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, **166**(1): 67-75
- [13] 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 and Space*, 2020, **72**(1): 156
- [14] SABAKA T J, TOFFNER-CLAUSEN L, OLSEN N, *et al.* CM6: a comprehensive geomagnetic field model derived from both CHAMP and Swarm satellite observations[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, **72**(1): 80
- [15] MAUS S, NAIR M C, POEDJONO B, *et al.* High definition geomagnetic models: a new perspective for improved wellbore positioning[C]//IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. San Diego, California, USA: SPE, 2012
- [16] YANG Y Y, HULOT G, VIGNERON P, *et al.* 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*, 2021, **73**(1): 1-21
- [17] YANG Yanyan, ZEREN Zhima, SHEN Xuhui, *et al.* Global geomagnetic field modeling based on Swarm Alpha magnetic field measurement[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, **67**(5): 1881-1890 (杨艳艳, 泽仁志玛, 申旭辉, 等. 基于 Swarm 卫星磁测数据的全球多场源地磁场建模[J]. 地球物理学报, 2024, **67**(5): 1881-1890)
- [18] WANG Q, ZHENG C, WU P L, *et al.* Geomagnetic/inertial navigation integrated matching navigation method[J]. *Heliyon*, 2022, **8**(11): e11249
- [19] 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): Q08005
- [20] POEDJONO B, BECK N, BUCHANAN A, *et al.* Improved geomagnetic referencing in the arctic environment [C]//SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition. Moscow, Russia: SPE, 2013
- [21] THÉBAULT E, FINLAY C C, BEGGAN C D, *et al.* International geomagnetic reference field: the 12th generation[J]. *Earth, Planets and Space*, 2015, **67**(1): 79
- [22] HULOT G, SABAKA T J, OLSEN N, *et al.* The Present and Future Geomagnetic Field[M]. Treatise on Geophysics (2nd Edition). Amsterdam: Elsevier, 2015, 5: 33-78

作者简介



徐 玥 女, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事张衡一号卫星磁场数据处理、地震前电离层磁异常扰动信号分析方面的研究。

E-mail: xuyue222@mails.ucas.ac.cn



杨艳艳(通信作者) 女, 1987 年生, 研究员, 博士, 硕士生导师, 毕业于中国科学院国家空间科学中心, 张衡一号卫星电磁场分系统主任设计师, 主要负责全球地磁场建模及地磁场变化、近地卫星磁测数据在轨道标处理和质量评价、空间天气等方面研究工作。

E-mail: youngyanyan@163.com