

周楚悦, 方涵先, 段叠, 肖超, 任干明, 黄宏韬, 林扬. 2025. 基于 IGRF-13 模型的地球主磁场全球长期变化分析研究[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(3): 278-291. doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-012.

Zhou C Y, Fang H X, Duan D, Xiao C, Ren G M, Huang H T, Lin Y. 2025. IGRF-13 model-based analysis of global long-term variation of main magnetic field[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(3): 278-291 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2024-012.

基于 IGRF-13 模型的地球主磁场全球长期变化分析研究

周楚悦, 方涵先*, 段叠, 肖超, 任干明, 黄宏韬, 林扬

国防科技大学, 长沙 410073

摘要: 地磁场是保护地球的天然屏障, 维持着地球环境的稳定, 作为重要战略资源在各领域应用广泛, 但最近的研究表明近年来地磁场变化加剧. 本文利用第 13 代国际地磁参考场模型 (IGRF-13) 对 1900—2020 年以来的主磁场长期变化规律进行研究, 并进一步分析了南大西洋地磁异常区的演化特征. 研究结果表明, 近 120 年来, 主磁场强度在东半球大致呈现增加趋势, 而在西半球的变化较为多样化. 在此时间段内, 地球偶极矩不断减小, 非偶极磁矩不断增强, 代表偶极场 (非偶极子场) 对总场的贡献在减小 (增加). 1900 年以来, 地磁场的平均西漂速度为 $0.2^\circ/\text{a}$, 全球磁异常区的运动以西向漂移为主, 并伴随轻度的南北向漂移. 在水平方向上, 主磁场梯度异常焦点在北半球变化缓慢, 而在南半球呈现速度较快的西向漂移, 同时伴有轻微的南北向漂移. 自 1930 年左右非洲异常区形成以来, 纬向梯度的非洲和南大西洋零等值线发生较快的南移和西漂. 所有成分共同影响的磁极相对偶极场主导的地磁极变化较快, 且其移动方向和速度在南北半球存在差异: 在北半球, 磁极已从西半球跨越至东半球, 而在南半球, 磁极则向低纬度地区移动. 南大西洋地磁异常区作为地球主磁场中强度最弱的区域, 其西侧的主极小值与 2007 年在东侧新出现的次极小值相比, 在同时期表现出 10^3 nT 量级的显著低值. 尽管南大西洋地磁异常区的磁场强度总体呈现衰减趋势, 主极小值和次极小值之间的差距也在逐年缩小. 此外, 主极小值中心在这 120 年来整体表现为西南向漂移趋势, 而次极小值中心自 2007 年来向东漂移, 并伴随轻微的南北向漂移.

关键词: 地磁场; 主磁场长期变化; IGRF-13 模型; 南大西洋地磁异常区

doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-012

中图分类号: P318

文献标识码: A

IGRF-13 model-based analysis of global long-term variation of main magnetic field

Zhou Chuyue, Fang Hanxian*, Duan Die, Xiao Chao, Ren Ganming, Huang Hongtao, Lin Yang

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract: The geomagnetic field is a natural barrier to protect the Earth and maintain the stability of the Earth's environment, and is widely used in various fields as an important strategic resource. Many studies indicated that the changes in the geomagnetic field have intensified in recent years. This study uses the 13th generation of the International Geomagnetic Reference Field model (IGRF-13) to investigate the long-term changes in the Earth's main magnetic field from 1900 to 2020 and analyzes the evolution of the South Atlantic Anomaly (SAA). The results show that, the main magnetic field exhibits an increasing trend in the Eastern Hemisphere, while its variations in the Western Hemisphere are more diverse. The Earth's dipole moment is decreasing while the non-dipole moment is increasing in the last 120 years, which means the contribution from dipole (non-dipole) field is decreasing (increasing). The average westward drifting speed of the main field is $0.2^\circ/\text{a}$ since 1900, with the anomaly field exhibiting a predominant westward drift direction, complemented by a modest north-south oscillation. In the horizont-

收稿日期: 2024-03-02; 录用日期: 2024-07-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (42204166, 42304172)

Supported by the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (Grant Nos. 42204166, 42304172)

第一作者: 周楚悦 (2001-), 女, 在读博士研究生, 主要从事空间天气学的研究. E-mail: zhoucy_2001@163.com

*通信作者: 方涵先 (1974-), 男, 教授, 主要从事空间天气学的研究. E-mail: fanghx@nudt.edu.cn



al direction, the focuses of the main magnetic field gradient anomalies exhibit a slow variation in the Northern Hemisphere, whereas in the Southern Hemisphere, they demonstrate a more rapid westward drift accompanied by a slight north-south oscillation. Since around 1930, when the African anomaly formed, the zero contours of the latitudinal gradient in Africa and the South Atlantic have shifted southward and westward rapidly. The magnetic poles change more rapidly relative to the geomagnetic poles, and the direction and speed of movement differ in the Northern and Southern Hemispheres: in the Northern Hemisphere, the magnetic poles have crossed from the Western Hemisphere to the Eastern Hemisphere, while in the Southern Hemisphere, the poles have moved toward lower latitudes. The SAA represents the weakest region of the Earth's main magnetic field, and a comparison between its western primary minimum and the eastern secondary minimum, which emerged in 2007, reveals a notable low value of approximately 10^3 nT. Although the magnetic field strength in the SAA region exhibits an overall declining trend, the discrepancy between the primary and secondary minima has been progressively diminishing annually. Furthermore, the primary minimum center has demonstrated a general southwestward drift trajectory over the past 120 years, while the secondary minimum center has exhibited an eastward shift with a subtle north-south oscillation since 2007.

Keywords: geomagnetic field; main field long-term variation; IGRF-13 model; South Atlantic Anomaly

0 引言

地磁场是地球从内部至外部空间所有场源产生的磁场总和, 贡献主要来源于地球液态外核、地壳、电离层、磁层(白春华等, 2008). 在空间分布上, 目前的地磁极型场主要由一个偶极场构成, 但极型场的强度、倾角、偏角不随地磁纬度、经度规则分布(磁极与地理极之间存在夹角). 而在核幔边界层, 南北半球出现很多“磁斑区”(郭凤霞等, 2007), 即在磁偶极场背景上出现的尺度较小的非偶极场. 同时, 长期研究表明, 各种因素影响使得地磁场随时间发生变化, 包括地磁强度的改变、磁极在地表的移动、磁场的西向漂移等现象, 甚至每隔一定的时间就会发生一次磁极倒转现象, 而距今最近的一次是发生在 70 万年前的松山—布容倒转(李力刚, 2016). 地磁场在日地空间环境等科学研究和国家战略资源应用中均扮演着关键角色, 但地磁场的起源以及演化仍是当前世界待解前沿科学问题之一(Kennedy and Norman, 2005).

研究地磁场分布及其长期变化的重要基础是长期、连续、可靠的地磁观测资料和其他相关资料, 如岩石磁性与古地磁数据(李永祥和刘欣宇, 2021; 张伟杰等, 2022)、地震波数据(Лукишов et al., 2013)及实验室模拟实验(Davies and Constable, 2020; 徐文耀, 2005)等. 随着“国际地球位势研究十年计划”的开展, 高分辨率磁测数据涌现, 为现代地磁场建模和应用研究奠定了基础. 欧美各国综合利用球谐分析、球冠谐和分析、矩谐分析等方法,

提出各种各样的地磁场模型. 有以卫星数据为主、地磁台站观测为辅建立的模型, 如 CM (Comprehensive Models, Sabaka et al., 2020)、CHAOS (the CHAMP, Ørsted and SAC-C model of Earth's magnetic field, Finlay et al., 2020; Olsen et al., 2006)、POMME (Potsdam Magnetic Model of the Earth, Maus et al., 2006)等系列模型, 可以同时对外源场进行描述, 空间分辨率在几百公里; 除了这些综合场模型, 还有空间分辨率在 3 000 km 左右的主磁场模型, 如国际地磁参考场模型 IGRF (International Geomagnetic Reference Field, Alken et al., 2021)和世界地磁模型 WMM (World Magnetic Model, Chulliat et al., 2020). 最后还有一些专门针对某一场源进行描述的模型, 如岩石圈磁场模型 LCS (Lithospheric model derived from CHAMP and Swarm satellite data, Olsen et al., 2017)、MF (Magnetic Field model, Maus et al., 2008)等; 电离层电流场源模型, 如依托 Swarm 卫星数据和地磁观测站数据建立的 DIFI 模型 (the Dedicated Ionospheric Field Inversion model, Chulliat et al., 2016). 我国亦发展了自主的中国区地磁模型(陈斌等, 2016), 但相较于国外, 卫星磁测发展较晚, 缺少独立自主的全球磁测数据, 一直没有能够进入国际视野的全球地磁场模型. 直到 2018 年我国成功发射“张衡一号”电磁监测试验卫星(Shen et al., 2018)获取了全球高质量自主观测数据, 全球参考地磁场模型 CGGM (the CSES Global Geomagnetic field Model) 2020.0 (Yang et al., 2021) 基于该星数据得以建立.

基于上述地磁场模型, 科学家们发现近年来地磁场的变化正在加剧 (Alken et al., 2021; Finlay et al., 2020; 杨艳艳等, 2024), 例如磁极已由西半球跨越至东半球、且有加速的趋势; 偶极矩一直在持续减小; 全球地磁场的变化呈现出均匀性; 南大西洋异常区有扩张的趋势, 除了原有磁场极弱区外, 在南半球 40° 格林尼治子午线附近也开始出现一个低值区. 因此, 需要不断更新的地磁场模型来定性和定量追踪地磁场的演化规律.

过往的研究中, 各研究者使用的地磁参数不一致, 掌握的资料不同, 尚未形成统一的方法, 得到的结果存在较大的差异 (Finlay et al., 2016, 2017; Nahayo and Korte, 2022; Sabaka et al., 2020; Shi and Moldwin, 2022), 因此对地磁场长期变化现象缺乏统一的认识. 而对于地磁现象纬度依赖性等问题的认识 and 解释, 直接影响着地磁场起源问题的进一步研究 (Davies and Constable, 2020).

IGRF 模型作为世界通用的地磁场标准描述地球主磁场及其长期变化 (Alken et al., 2021), 是目前国际上应用最广泛的参考场模型. 且在现有全球主磁场模型中, IGRF 模型描述时间最久, 可以给出 1900 年以来的主磁场值. 众多学者利用该模型开展了一系列长期变化特征研究: 不同深度地磁场的分布特征及变化规律 (郭凤霞等, 2007)、地球主磁场的空间分布和变化特征 (高国明等, 2012)、地磁场的偶极场、非偶极场、西向漂移、非偶极场磁场强度的长期变化 (曾凌云等, 2014)、地球磁极的长期变化 (Alken et al., 2021) 等. 当前处于地磁加剧变化时期, 亟需利用最新的应用广泛的地磁资料对地磁场各场源的分布特征及变化规律开展全面分析. 本文将借助 0.1°×0.1° 网格, 利用新一代国际地磁参考场模型 IGRF-13 对地磁场 1900—2020 年的地磁场长期变化开展更为细致的讨论, 定性和定量开展自 1900 年以来全球主磁场强度及长期漂移特征、空间梯度变化特征、磁偶极矩和磁极移动等研究, 给出全球地磁场长期变化规律, 并着重分析近年来出现新的演化特征的南大西洋磁异常区 (South Atlantic Anomaly, SAA) 的变化趋势.

1 地磁场的数学描述

1.1 地磁场的球谐分析

根据地磁场磁势的拉普拉斯方程 $\nabla^2 U = 0$, 在

以球心 O 为原点 (假设地球是一个球体, $R = a$), 以地球自转轴为轴极 (指向北极为正) 的球坐标系中求解得到测点 P 的球谐函数表达式为 (徐文耀, 2009):

$$U(r, \theta, \lambda, t) = a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left\{ \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) + \left(\frac{r}{a} \right)^n (j_n^m \cos m\lambda + k_n^m \sin m\lambda) \right\} P_n^m(\cos \theta) \quad (1)$$

式中 r 为球心 O 至测点 P 的距离, θ 为余纬, λ 为经度, 系数 g_n^m 、 h_n^m 、 j_n^m 、 k_n^m 即为高斯系数. 其中, g_n^m 、 h_n^m 为内源场系数, j_n^m 、 k_n^m 为外源场系数. 当观测点位于地球表面, 即 $r = a$ 时, (1) 式变为:

$$U(r, \theta, \lambda, t) = a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left\{ [(g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) + (j_n^m \cos m\lambda + k_n^m \sin m\lambda)] P_n^m(\cos \theta) \right\} \quad (2)$$

相应球坐标系下地磁场三分量, 即北向分量、东向分量和垂直分量 X、Y、Z 的表达式为:

$$\left\{ \begin{aligned} X(r, \theta, \lambda, t) &= \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \Big|_{r=a} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n [(g_n^m + j_n^m) \cos m\lambda + (h_n^m + k_n^m) \sin m\lambda] \cdot \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} \\ Y(r, \theta, \lambda, t) &= -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \lambda} \Big|_{r=a} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n [(g_n^m + j_n^m) \sin m\lambda - (h_n^m + k_n^m) \cos m\lambda] \cdot \frac{m}{\sin \theta} P_n^m(\cos \theta) \\ Z(r, \theta, \lambda, t) &= \frac{\partial U}{\partial r} \Big|_{r=a} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n [(n+1)g_n^m - n j_n^m] \cos m\lambda + [(n+1)h_n^m - n k_n^m] \sin m\lambda P_n^m(\cos \theta) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

1.2 偶极子场和非偶极子场

根据以上讨论可知, $n = 1$ 的项占全部地磁场的 80%~85%, 这部分与一个放置在地心的等效偶极子产生的磁场相当. 该偶极子即为中心偶极子. 非偶极子场是地磁场去除 $n = 1$ 项中心偶极子的磁场的剩余部分, 也被称为异常磁场, 在总磁场中约占 10%~20% (李安生和李振亭, 2007).

假设中心偶极子的磁矩为 M , 它在空间任一点

$P(r, \theta, \lambda, t)$ 处产生的磁势 (郭硕鸿, 2008) 为:

$$U = \frac{\mu_0 M \cdot r}{4\pi r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} (M_Z \cos \theta + M_X \sin \theta \cos \lambda + M_Y \sin \theta \sin \lambda) \quad (4)$$

由 (1) 式的内源场部分取 $n=1$, 可得:

$$U = a \left(\frac{a}{r} \right)^2 (g_1^0 \cos \theta + g_1^1 \sin \theta \cos \lambda + h_1^1 \sin \theta \sin \lambda) \quad (5)$$

比较 (4) 和 (5) 式, 可得:

$$g_1^1 = \frac{\mu_0}{4\pi a^3} M_X, \quad h_1^1 = \frac{\mu_0}{4\pi a^3} M_Y, \quad g_1^0 = \frac{\mu_0}{4\pi a^3} M_Z \quad (6)$$

(6) 式表明, 地磁场位的高斯级数中 $n=1$ 的项描述了中心偶极子的磁位. 其中, g_1^0 为该偶极子沿 Z 轴 (地球自转轴) 的分量, g_1^1 为沿 X 轴 (通过本初子午线与赤道面交点的轴) 的分量, h_1^1 为沿 Y 轴的分量.

偶极子磁矩 M 可以求出:

$$M = \sqrt{M_X^2 + M_Y^2 + M_Z^2} = \frac{4\pi a^3}{\mu_0} \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2} \quad (7)$$

2 地磁场长期变化特征研究

在现有全球主磁场模型中, IGRF 模型对主磁场的描述时间最久, 可以给出 1900 年以来的主磁场值. 因此, 本文将利用 IGRF 磁场模型, 开展主磁场及磁异常区的强度变化、西向漂移、主磁场各阶磁矩变化、磁极移动等研究, 从而给出主磁场的

长期变化规律.

2.1 地磁场的总体变化

图 1 展现了 1900—2020 年每 30 年间主磁场总强度值的差值分布情况. 可以看出, 各个时期磁场变化值和分布均存在差异. 东半球的总场大致呈现不断增加的趋势, 但 1990—2020 年间磁场增加趋势减弱, 在澳大利亚及其东部区域甚至出现磁场减弱趋势; 而西半球总强度值在各个时期较为多样化, 但是最近 30 年磁场整体呈减弱趋势.

图 2 显示着磁异常区其强度值的变化, 主要磁异常区地理位置如表 1 所示. 由图 2 可以看到最显著的是北大西洋磁异常区 (North Atlantic Anomaly, NAA) 的变化, 1900 年全球磁场地向分量 B_c 的负方向最强, 之后逐渐减弱, 至 2020 年几乎看不出异常区域的特征.

图 3 给出 1900—2025 年各磁异常中心地向分量 B_c 变化图 (2025 年为预测值). 本文研究的五个磁异常区中只有 AF 和 AUS 的磁场地向分量 B_c 为负值, 为了直观比较, 对这两个区域的磁场地向分量 B_c 取绝对值转为正值. 可以看出, 四个磁异常区 (AF、AUS、EUA、SAA) 的强度值都在增大, 其中 AF 强度值增加的幅度最大, 而只有 NAM 的磁场强度在逐渐减小.

由上述分析可以得出, 全球大尺度的五个磁异常区, 除了 NAM 的磁场强度减弱, 其他四个磁异常区强度均呈现增长趋势, 因此呈现全球非偶极子

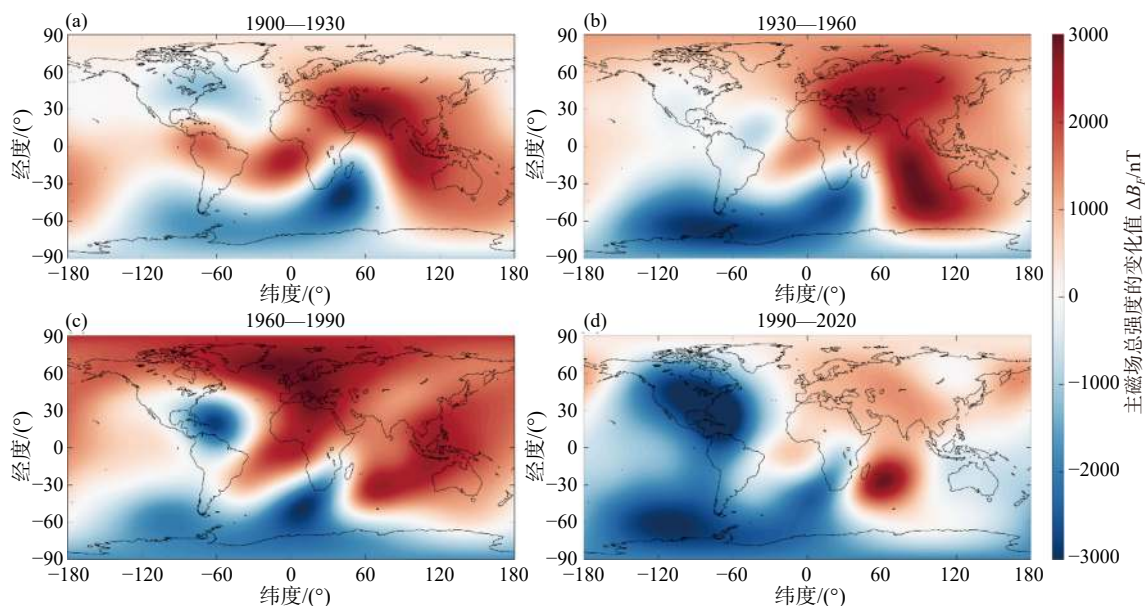


图 1 1900—2020 年每隔 30 年主磁场的总强度值变化情况

Fig. 1 Variations of the total strength of the main magnetic field every 30 years from 1900 to 2020

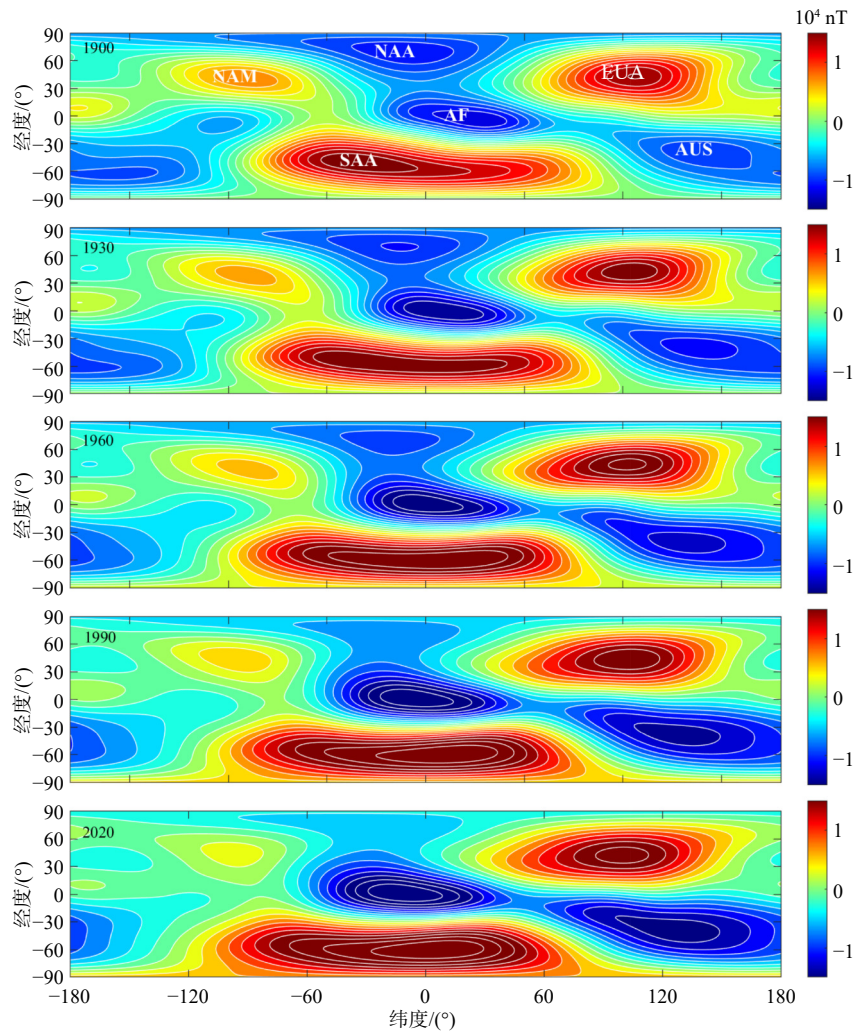


图2 1900—2020年每30年非偶极磁场 B_c 分量分布图

Fig. 2 Variations of the component B_c of non-dipole magnetic field from 1900 to 2020 (time interval: 30 years)

表1 主要磁异常区地理位置

Table 1 Geographical locations of major magnetic anomaly areas

磁异常区	纬度范围	经度范围
非洲磁异常(African Anomaly, AF)	30°S~30°N	40°W~70°E
大洋洲磁异常(Australasia Anomaly, AUS)	0°~80°S	90°E~180°E
欧亚磁异常(Eurasian Anomaly, EUA)	10°N~80°N	30°E~170°E
北美磁异常(North America Anomaly, NAM)	0°~70°N	140°W~40°W
南大西洋磁异常(South Atlantic Anomaly, SAA)	20°S~80°S	90°W~90°E

磁场强度增加的宏观表现, 而地磁场非偶极子磁场的特征也将越来越明显.

2.2 地磁场的西向漂移

图4是1900—2020年间每30年主磁场的磁偏角分布图, 将全球主磁场西漂的特征位置设为0°磁偏角与赤道的交点位置(圆点表示). 注意到圆点随时间推移逐渐向西移动, 在近120年间, 地磁场的平均西漂速度大致为0.2°/a, 在不同时间段存在差异. 对1900年以来的特征交点, 以每5年为一个

时间间隔, 计算其平均西漂速度, 如图5所示.

从图5中可以看出, 尽管地磁场一直存在西漂的趋势, 在不同时间段磁场的西漂速度存在差异. 西漂速度在1910年至1940年减小, 从1912.5年左右的0.2754°/a降低到在1937.5年左右达到最小值0.1401°/a; 1940年至1990年期间, 平均速度曲折增高, 但在2002.5年左右达到相对较小的平均速度值0.1775°/a, 之后再次呈现上升趋势. 近年来西漂速率有升高趋势, 后续需要加强对地磁场变化的观测.

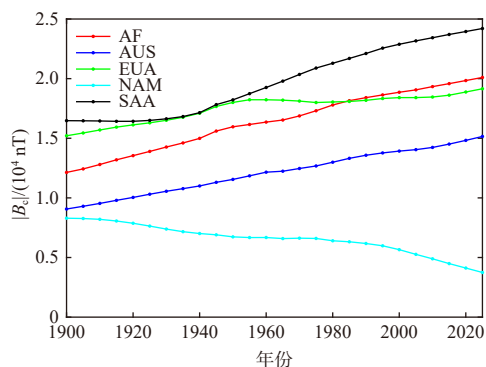


图 3 1900—2025 年的各磁异常中心 B_c 分量的绝对值变化图 (时间间隔: 5 年)

Fig. 3 Variations of the central component B_c of magnetic anomalies from 1900 to 2025 (time interval: 5 years)

通过分析不同时期和地区的资料发现, 西向漂移的现象并非全球一致, 其漂移速率因地区而异. 在本节, 通过计算 1900—2020 年各磁异常区的西向漂移速度, 分析各行星尺度磁异常区的漂移特点. 为了计算的精确度, 借助 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的网格, 选取各磁异常区 B_c 分量的强度值中心作为特征点进行计算. 从图 6 可以看出, 虽然各磁异常区的漂移存在差异, 如非洲磁异常 (AF) 的特征中心呈现平均速度 $0.34^\circ/\text{a}$ 的西向漂移, 而大洋洲磁异常 (AUS) 以 $0.1^\circ/\text{a}$ 、欧亚磁异常 (EUA) 和北美磁异常 (NAM) 的特征中心以 $0.05^\circ/\text{a}$ 的速度缓慢西漂, 南大西洋磁异常 (SAA) 的中心表现出年平

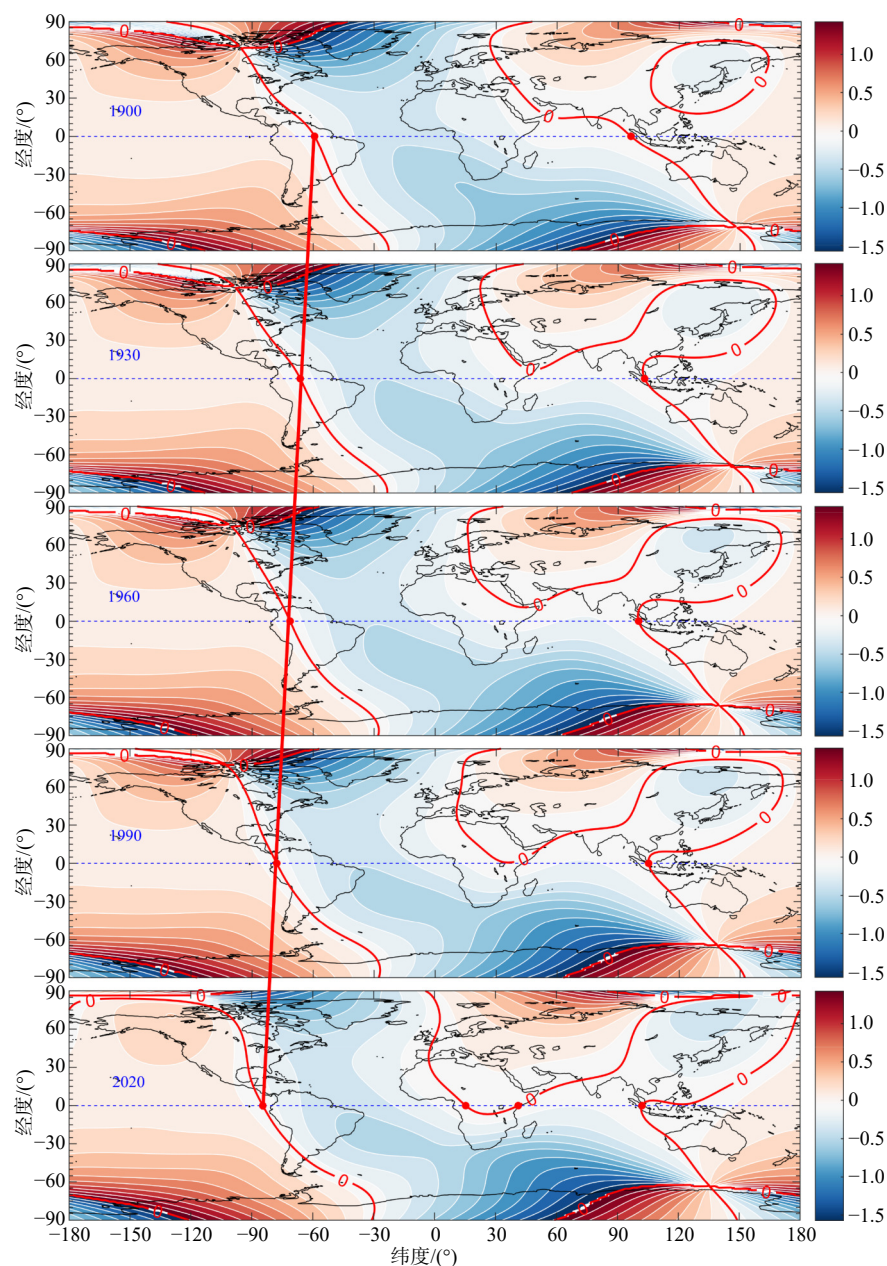


图 4 1900—2020 年每隔 30 年主磁场的磁偏角 $D(^\circ)$ 分布图

Fig. 4 Distributions of magnetic declination $D(^\circ)$ of the main magnetic field every 30 years from 1900 to 2020

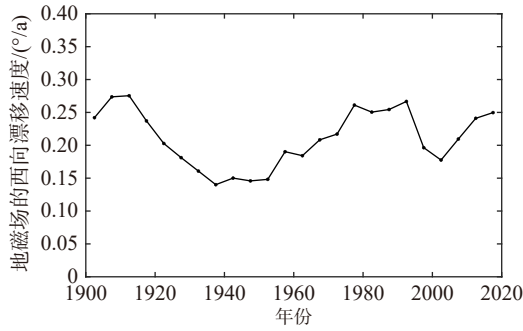


图5 地磁场整体西向漂移平均速度变化 (时间间隔: 5 年, 在每个时段的中点标注)

Fig. 5 Changes in the average velocity of the overall westward drift of the geomagnetic field (time interval: 5 years, marked at the midpoint of each period)

均速度 $0.34^{\circ}/\text{a}$ 的东漂趋势, 但西向漂移仍是全球磁异常区运动的主要特征, 且伴有轻度的南北向漂移。

2.3 主磁场的空间梯度变化

主磁场强度与其梯度并不相同, 分析梯度的长期变化, 有助于进一步认识主磁场的时间演变特点. 主磁场总强度 $F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$, 其在水平方向 (南北方向和东西方向) 和垂直方向的梯度为 (高国明等, 2012):

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \phi} &= \frac{X}{F} \frac{\partial X}{\partial \phi} + \frac{Y}{F} \frac{\partial Y}{\partial \phi} + \frac{Z}{F} \frac{\partial Z}{\partial \phi} \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} &= \frac{X}{F} \frac{\partial X}{\partial \lambda} + \frac{Y}{F} \frac{\partial Y}{\partial \lambda} + \frac{Z}{F} \frac{\partial Z}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial F}{\partial r} &= \frac{X}{F} \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{Y}{F} \frac{\partial Y}{\partial r} + \frac{Z}{F} \frac{\partial Z}{\partial r} \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) 中, 水平梯度表示地磁场沿 λ 或 ϕ 变化单位

角度 (1 角分, 1 min) 的变化值; 经度方向梯度向东为正, 纬度方向梯度向北为正, 垂直梯度指向地心为正. 图 7 展示了 1900 年和 2020 年主磁场总强度 B_F 及其在三个方向的梯度的空间分布. B_F 及其垂直梯度在空间分布上呈现一致性, 尽管异常中心的位置略有差异, 但均呈现赤道附近最小、向两极递增的特征. 全球范围内, 可以明确识别出四个主要异常区, 根据其所在位置命名, 分别为北美洲磁异常区 (North America Anomaly, NAM)、南大西洋磁异常区 (South Atlantic Anomaly, SAA)、东亚磁异常区 (East Asia Anomaly, EA)、大洋洲磁异常区 (Australia Anomaly, AUS)。

经度方向梯度 (图 7b 行) 在 1900 年的正异常区主要分布在北美洲、欧洲、南大西洋和印度洋地区, 形成北美磁异常 (NAM)、欧洲磁异常 (Europe Anomaly, EU)、南大西洋磁异常 (SAA)、印度洋磁异常 (Indian Ocean Anomaly, IO) 四个正异常区; 北大西洋、南美洲、东亚区域表现出负异常焦点, 形成北大西洋磁异常 (North Atlantic Anomaly, NAA)、南美洲磁异常 (South America Anomaly, SAM) 和东亚磁异常 (EA) 三个负异常区. 而至 2020 年, 印度洋正异常区焦点发生向西移动, 其余三个正异常区减弱至消失, 负异常区的空间范围扩大。

纬度方向梯度 (图 7c 行) 分布相对简单, 其特征以东西向分布为主, 正异常主要分布在北半球, 而负异常集中在南半球. 在北半球的 $20^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 中低纬度带内, 存在一条显著的强正异常带, 中美洲附近是该异常带强度最高的区域, 形成中美洲磁

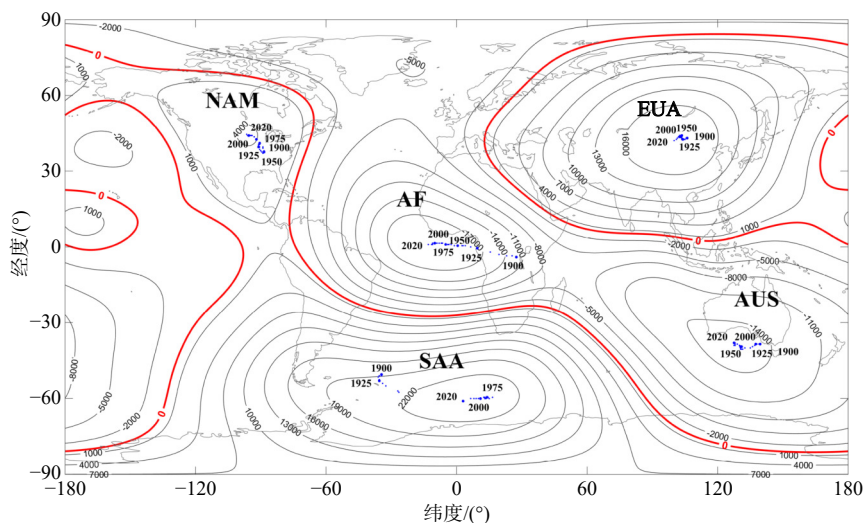
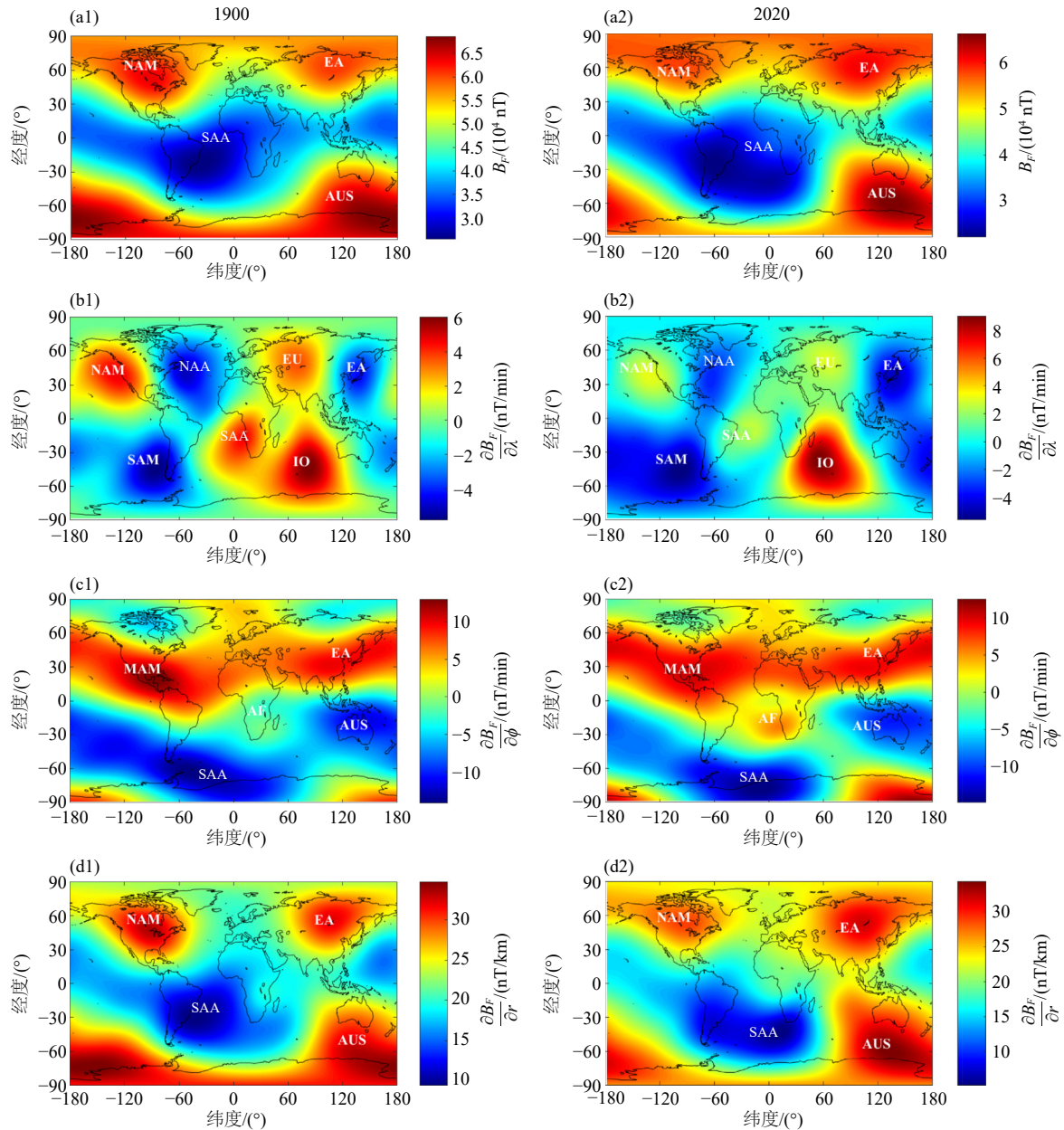


图6 各磁异常区 1900—2020 年特征中心漂移轨迹 (背景等值线: 2020 年非偶极场 B_c 分量的等值线)

Fig. 6 The trajectory of the feature centers of each magnetic anomaly region from 1900 to 2020 (background contours: contours of the B_c component of the non-dipole field in 2020)

图 7 1900 年和 2020 年 B_F 及其分量梯度的全球空间分布Fig. 7 Global spatial distribution of B_F and its component gradients in 1900 and 2020

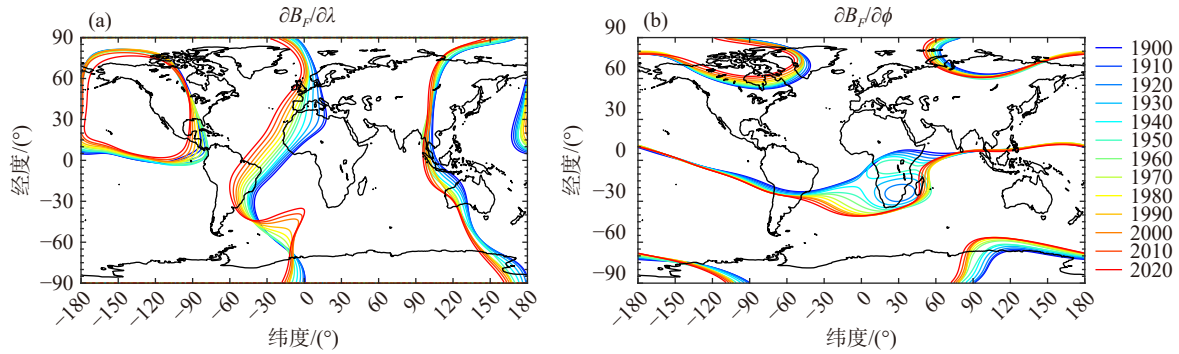
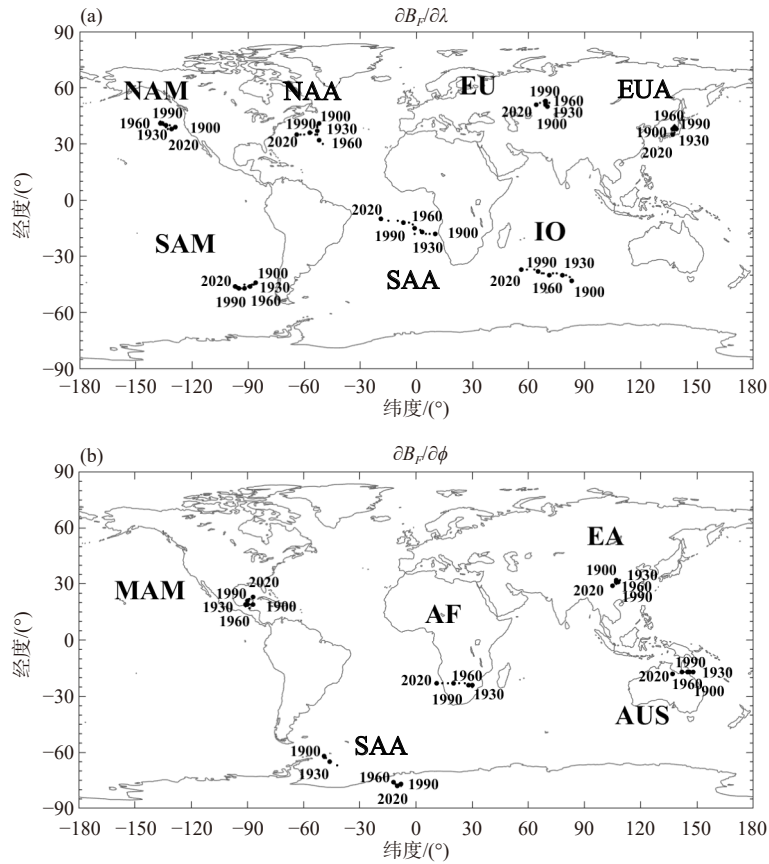
异常区 (Mesoamerica Anomaly, MAM). 南半球纬度范围 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{S}$ 的非洲地区呈现地磁异常现象的明显变化, 虽然该区域在 1900 年尚未形成显著的地磁异常特征, 而 2020 年已发展成为一个较强的地磁异常区域, 即非洲磁异常区 (AF).

对比图 7 中 1900 年和 2020 年主磁场空间梯度的分布图, 可以看出地球主磁场的空间梯度在这 120 年期间经历了显著变化. 进一步对每 10 年的水平方向的梯度变化情况进行分析. 图 8a 为地磁场强度 (F) 经向梯度的零等值线变化情况. 整体呈现西向移动, 在北半球中低纬地区, 等值线的变化范围的展宽相对较大; 在 $30^{\circ}\text{S} \sim 60^{\circ}\text{S}$ 地区, 零度等值线逐渐向东北方向扭曲. 图 8b 为地磁场强度 (F)

纬向梯度的零等值线变化情况. 1930 年之前, 零等值线缓慢南移. 1930 年左右, 非洲磁异常区 (AF) 开始形成, 并伴随着非洲和南大西洋区域的零等值线的快速南移和西向漂移现象.

图 9a、9b 为经向、纬向梯度各异常焦点位置的变化. 异常焦点在北半球移动缓慢, 南半球移动较快. 在南半球的异常区域内, 纬向梯度的 SAA 异常焦点东南向漂移, 其他异常焦点整点呈现西向漂移, 伴随轻微的南北向漂移.

图 10a、10b 为水平方向梯度各异常焦点强度的变化. 为方便比较, 对负异常焦点的强度值取绝对值. 可以看出水平梯度异常区的强度变化是不均匀的. 在经向方向上, IO 的焦点强度值不断增强,

图 8 1900—2020 年每 10 年 B_F 水平方向梯度的零等值线的变化Fig. 8 Variations of zero contour lines of the B_F horizontal gradient every 10 years from 1900 to 2020图 9 1900—2020 年每 10 年 B_F 水平方向梯度的异常焦点的变化Fig. 9 Variations of the locations of the anomalous focus of the B_F horizontal gradient every 10 years during 1900-2020

其他正异常区焦点强度值逐年衰减, 与图 7 中 NAM、EU、SAA 的变化情况相对应; 负异常区中, NAA 的焦点强度值在 2020 年较 1900 年衰减较大, 其他负异常区焦点强度变化相对平缓. 纬度方向上, 非洲地区在 1920 年左右开始展现异常区域特征, 至 2020 年 AF 焦点强度值已达到 5.76 nT/km; 其他异常焦点强度值的变化相对平缓.

2.4 主磁场各阶磁矩变化

由前面分析可知, 地磁场偶极子 ($n=1$) 磁矩 M_1 的具体计算公式为 (7) 式. 同样的方法可以计

算四极子 ($n=2$) 磁矩 M_2 , 八极子 ($n=3$) 磁矩 M_3 以及十六极子 ($n=4$) 磁矩 M_4 等非偶极子的磁矩. 鉴于在整个地磁场中, 更高阶极子所占的比例极低, 因此在当前研究中未对其进行计算与分析.

利用 IGRF-13 计算 1900—2020 年期间的地磁各阶磁矩, 将计算结果绘制在图 11. 可以看出, 地球偶极矩不断减小, 非偶极磁矩不断增强. 1900—2020 年的偶极矩减小幅度约 7.18%, 减少率为 $2.56 \times 10^{19} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{a}$. 结合 IGRF-13 给出的长期变化预测 (SV 20-25) 系数, 得到 2025 年的预测极矩, 可以看出这样的趋势仍在持续中.

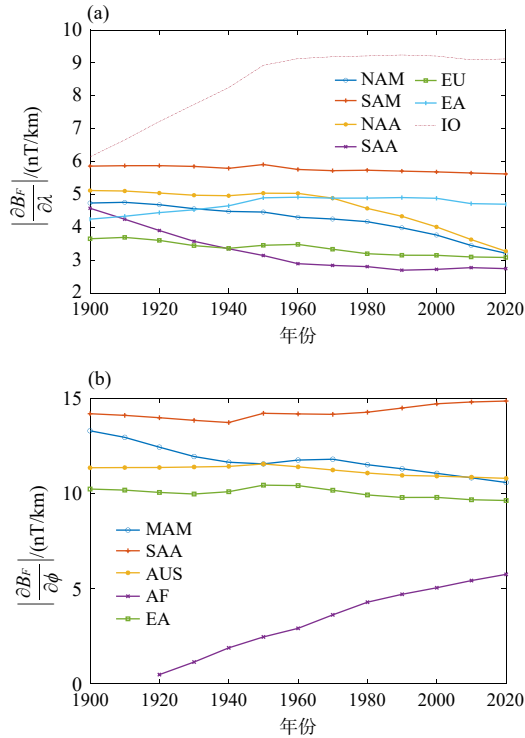


图 10 1900—2020 年每 10 年 B_F 水平方向梯度的强度的变化
Fig. 10 Variations of the intensity of the anomalous focus of the B_F horizontal gradient every 10 years during 1900-2020

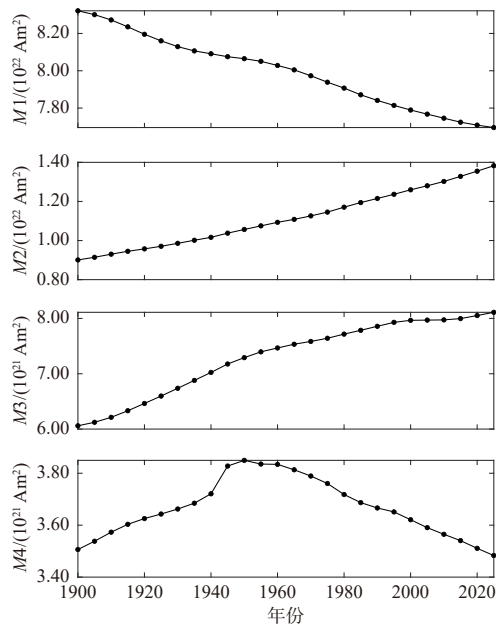


图 11 1900—2020 年期间偶极子 $M1$ 、四极子 $M2$ 、八极子 $M3$ 和十六极子磁矩 $M4$ 变化及 2025 年预测趋势
Fig. 11 Changes in magnetic moments of dipole $M1$, quadrupole $M2$, octupole $M3$ and 16-pole $M4$ during 1900-2020 and their predicted trends in 2025

2.5 磁极移动

借助 IGRF-13 模型给出的 $n=1$ 的高斯系数 (g_1^0, g_1^1, h_1^1) 计算地磁极的地理坐标, 具体计算公

式 (Laundal and Richmond, 2017) 为:

$$\begin{aligned} B_0 &= \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2} \\ \theta_N &= \cos^{-1} \left(-\frac{g_1^0}{B_0} \right) \\ \phi_N &= \text{atan2}(h_1^1, g_1^1) \\ \theta_S &= 180^\circ - \theta_N \\ \phi_S &= \phi_N + 180^\circ \end{aligned} \quad (9)$$

式中, B_0 为偶极矩, θ_N 、 θ_S 、 ϕ_N 、 ϕ_S 为地磁极与球面交点的地理余纬度和地理经度, 下标 N、S 分别代表北半球、南半球. 由此计算自 1900 年以来的地磁极在南北半球的经纬坐标, 并对比磁极的地理位置 (数据来源: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/GeomagneticPoles.shtml>), 并将这近 120 年的地磁极和磁极位置变化绘制到图 12. 由于地磁极对应于磁偶极轴与地球平均半径 6371.2 km 球体的交点, 即地磁极根据地球平均半径定义. 而磁极被定义为主磁场作为一个整体垂直于地球表面的位置, 用 WGS84 参考椭球表示. 所以对于一个理想的偶极子场而言, 地磁极和磁极的位置应近乎一致, 但实际上两者并不完全重合. 可以看出, 由于非偶极子结构的存在, 地磁极和磁极存在显著差异.

在过去的 120 年中, 由偶极场主导的地磁极 (蓝色点) 呈现出较为平缓的变化趋势, 而受所有成分共同影响的地磁极 (红色点) 则经历了较快的变化. 在北半球, 磁极已从西半球跨越至东半球, 而在南半球, 磁极则向低纬度地区移动, 且磁极在南北半球的轨迹变化速度也存在明显差异.

利用 Haversine 公式 (樊东卫等, 2019) 量化比较研究磁极在南北半球的移动速度差异. 通过计算发现, 南半球移动速度整体保持相对稳定, 基本维持在 20 km/a, 甚至 10 km/a 以内的量值, 仅在 1950—1955 年之间出现超过 20 km/a 的峰值; 而在北半球, 在 1990 年之前磁极变化基本在 20 km/a 以内, 但 1990 年之后磁极移动速率显著加快, 2000 年之后速度超过 50 km/a, 远超过南半球的磁极移动速度. 2025 年的预测值表明将会减小, 但需要更多磁测数据进行持续追踪和验证.

3 南大西洋地磁异常区长期变化研究

南大西洋地磁异常区是地球上磁场强度最弱的一块区域, 这个区域内的磁场强度弱、辐射高 (Soni et al., 2022), 并可能引起异常空间天气现

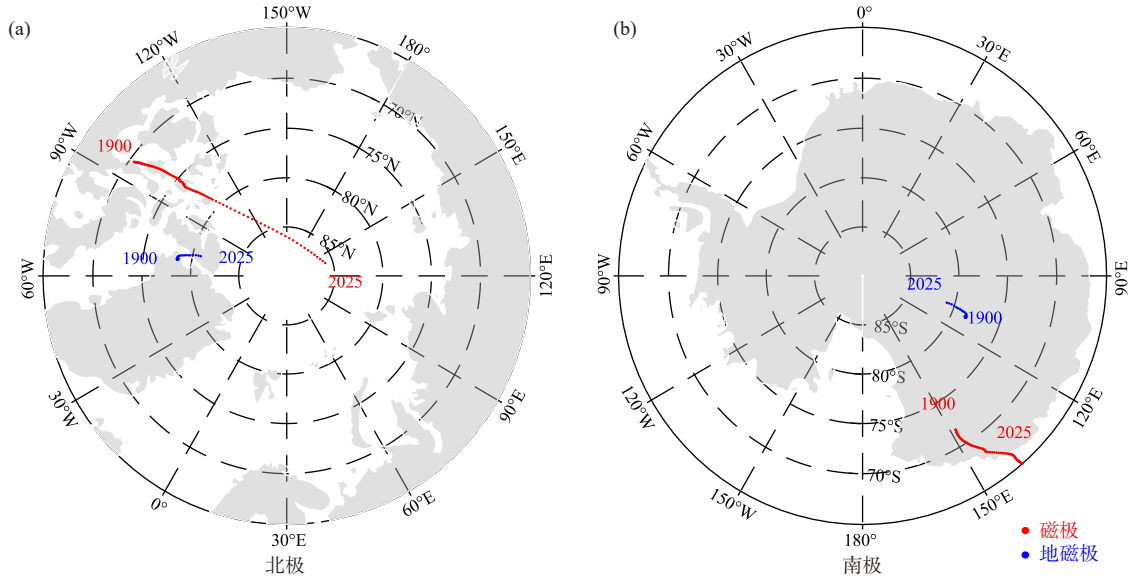


图 12 自 1900 年以来磁极 (红色点) 和地磁极 (蓝色点) 的移动轨迹. (a) 北半球; (b) 南半球

Fig. 12 The movement of magnetic poles (red dots) and geomagnetic poles (blue dots) since 1900. (a) Northern Hemisphere; (b) Southern Hemisphere

象 (He et al., 2020) 和对卫星通讯设备等造成负面影响 (Meier et al., 2023). SAA 作为地球磁场的一个显著结构, 在近百年来大致呈现磁场强度下降、向西漂移、向南漂移、面积扩张等特征 (岳铄辰等, 2024). 近几十年来, SAA 演化速度加快, 在 2007 年该区域的东南部 (非洲西南部) 出现一个新的次级异常中心 (图 13 所示). 该次级磁异常中心的出现暗示 SAA 可能正在分裂成两个独立的单元.

南大西洋磁异常区在近年来的变化, 说明 SAA 的演化可能正在进入一个新的阶段, 吸引了众多学者的关注 (Nasuddin et al., 2019), 但对 SAA 的演化尚未形成统一的定论. 因此, 本文利用 IGRF-

13 模型定量分析南大西洋磁异常区自 1900—2020 年的变化, 尤其关注 2007 年后出现的次级异常中心的发展动态.

借助 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格, 计算这 120 年间南大西洋磁异常区的中心的地理位置 (图 14 所示) 和强度变化 (图 15 所示). 为方便表示, 将 SAA 区域的主磁异常中心记为 SAA1, 自 2007 年开始出现的次级磁异常中心记为 SAA2. 由图 14 可以看到, 自 1900 年至今, 南大西洋异常区西侧的主极小值中心展现出显著的地理迁移, 其空间动态表现为向南的漂移速度约为 $0.04^\circ/\text{a}$, 同时伴随向西的漂移速度约为 $0.18^\circ/\text{a}$. 这一迁移趋势与地磁场整体西向漂移的速度 ($0.2^\circ/\text{a}$) 在数量级上相仿. SAA 区域的东侧

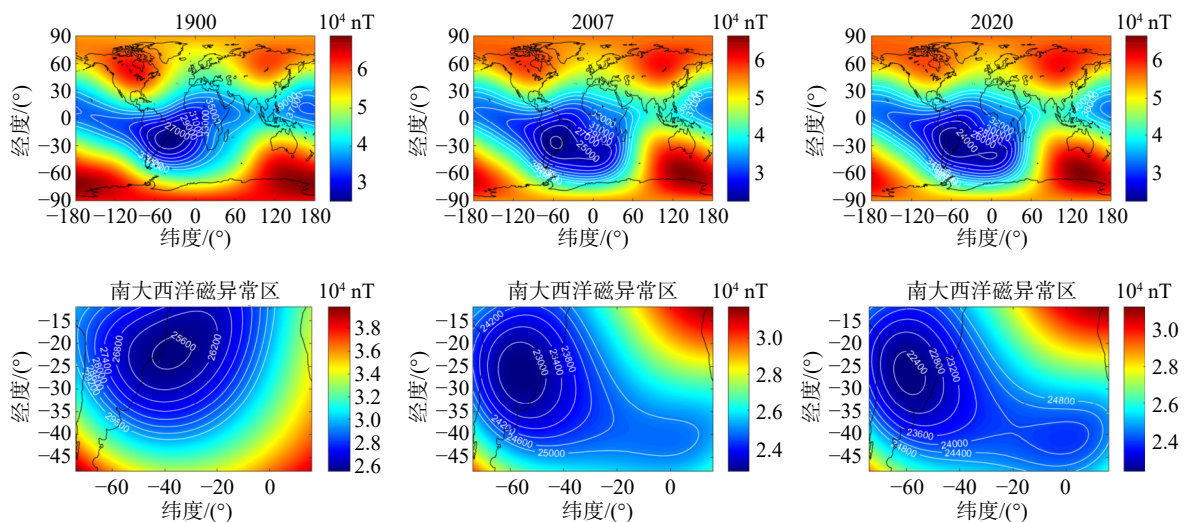


图 13 1900 年、2007 年和 2020 年地球表面的磁场强度, 白色的强度等值线表示南大西洋磁异常区

Fig. 13 Magnetic field strengths at the Earth's surface in 1900, 2007 and 2020, with the white contours indicating the SAA region

的次级小值中心自 2007 年呈现东向漂移的趋势并伴随轻微的南北向漂移, 东向漂移的年均速度约为 $0.17^\circ/\text{a}$, 南北向漂移的年均速度约为 $0.007^\circ/\text{a}$. 由图 15 直观看到, 在 SAA 区域磁场强度值整体衰减的趋势下, 主极小值和次极小值均在逐年衰减; 同时, 自 2007 年以来, 主极小值较次极小值相差约 10^3 nT , 但两者之间的差距也在逐年缩小.

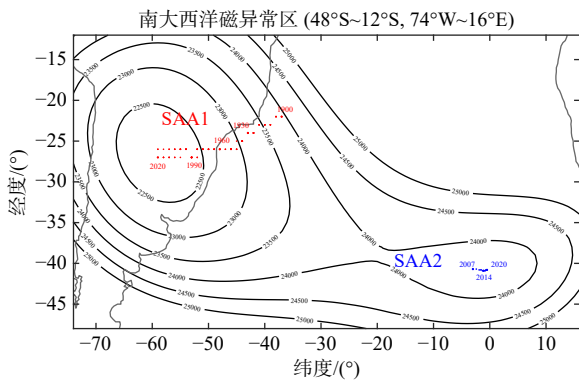


图 14 1900 年至 2020 年南大西洋磁异常区异常中心的地理位置演化 (背景等值线: 2020 年地磁场强度值的等值线, SAA1 表示主磁异常中心区, SAA2 表示自 2007 年后新生的次级磁异常中心区)

Fig. 14 Evolution of the location of the anomaly center in the South Atlantic Anomaly Region from 1900 to 2020 (background contours: contours of the 2020 geomagnetic field strength values. SAA1 indicates the center area of the main magnetic anomaly, and SAA2 indicates the central area of secondary magnetic anomalies that have been emerging since 2007)

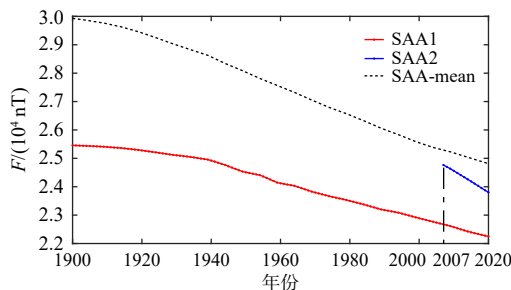


图 15 1900 年至 2020 年南大西洋磁异常区的异常中心强度值 (主磁异常中心强度值为 SAA1, 次级磁异常中心为 SAA2)、区域平均磁场强度值 (SAA-mean) 的变化

Fig. 15 Variations of anomaly center intensity values (Intensity value at the center of the primary magnetic anomaly is SAA1 and the center of the secondary magnetic anomaly is SAA2), regional average magnetic field strength values (SAA-mean) in the South Atlantic Anomaly region from 1900 to 2020

图 16 展示了 1900 年至 2020 年间的南大西洋地磁异常区主极小值中心和次极小值中心的经向、纬向漂移速度的计算结果. 结果表明, SAA 的主极小值中心和次极小值中心的经向、纬向漂移速度在

不同时段表现出差异性. 在相同的时间段, 经向漂移速度高于纬向漂移速度, 表明 SAA 的漂移以经向漂移为主. 此外, 对比 SAA 主极小值中心的经向漂移 (西向漂移) 速度和全球地磁场的平均西漂速度, 在 1945—1955 年和 1970—1995 年期间, 两者的差异较为显著; 而在其他时间段, 两者的漂移速度大致保持一致. SAA 次极小值自 2007 年形成以来, 其纬向漂移速度与 SAA 主极小值纬向漂移速度基本相似.

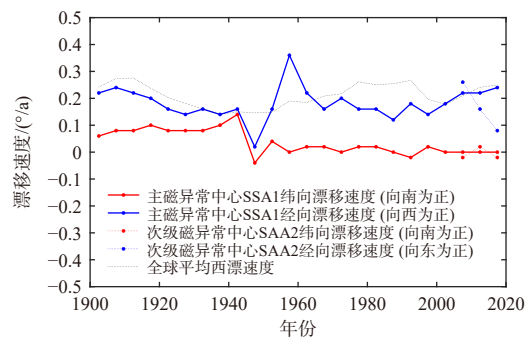


图 16 SAA 主极小值和次级小值中心的经向、纬向的漂移速度 (时间间隔: 5 年, 在每个时段的中点标注)

Fig. 16 Drift velocity in the longitudinal and latitudinal directions at the center of the primary minima and minor minima of the SAA (time interval: 5 years, labeled at the midpoint of each time period)

4 总结与讨论

本文利用 IGRF-13 模型进一步研究主磁场的长期变化规律, 得到主要结论如下:

(1) 主磁场的全球强度变化特征

主磁场在东半球大致呈现不断增加的趋势, 近 30 年增加趋势有所减弱; 在西半球总强度值在各个时期较为多样化, 近 30 年磁场呈衰减趋势. 近 120 年来地球偶极矩不断减小, 非偶极磁矩不断增强, 表明非偶极子场对总场的贡献在增加.

(2) 地磁场的西漂特征

地磁场一直存在西漂的趋势, 1900 年以来平均西漂速度为 $0.2^\circ/\text{a}$, 其速度在不同时期有所不同, 在近年来呈现升高趋势. 地磁异常漂移的区域表现出显著的差异性, 虽然南大西洋磁异常区 (SAA) 呈现较快的东向漂移, 但西向漂移仍是全球磁异常区运动的主要特征, 且伴有轻度的南北向漂移现象.

(3) 主磁场的空间梯度变化特征

水平方向的主磁场梯度异常焦点在北半球变化缓慢, 在南半球呈现速度较快的伴随轻度南北向漂移的西向漂移. 空间梯度的经度方向上, 印度洋正

异常区焦点呈现西向漂移趋势, 其他 3 个正异常区逐渐消亡; 负异常区的空间展布范围逐渐增大. 在 1930 年左右非洲异常中心出现后, 纬向梯度的非洲和南大西洋零等值线发生较快的南移和西漂.

(4) 磁极移动规律

近 120 年来, 由偶极场决定的地磁极变化比较缓慢, 而所有成分主导的磁极则表现出显著的快速变化. 在北半球, 磁极已从西半球跨越至东半球, 而在南半球, 磁极则向低纬度地区移动. 磁极在南半球移动速度整体平稳, 基本维持在 20 km/a 以内的量值; 而在北半球, 在 1990 年之前磁极变化基本在 20 km/a 以内, 但 1990 年之后磁极移动加速, 2000 年之后速度超过 50 km/a, 显著大于南半球的磁极移动速度.

(5) 南大西洋地磁异常区变化特征

2007 年 SAA 区域的东南部 (非洲西南部) 出现一个新的次级异常中心, 该次极小值与同时期的在 SAA 区域西侧的主极小值相比, 表现出约 10^3 nT 量级的显著高值. 虽然 SAA 磁场强度呈现整体衰减的趋势, 主极小值和次极小值之间的差距也在逐年缩小. 此外, 主极小值中心在 120 年来整体表现为西南向漂移趋势, 而次极小值中心自 2007 年来向东漂移, 伴随轻度的南北向漂移.

以上近 120 年来的全球磁场变化中, 地磁场西向漂移持续但区域变化存在差异、主磁场强度值持续减小、非偶极子增强、磁极在南北半球的移动变化不均匀等特征与历史上地磁倒转前的变化状态 (魏青云, 1990) 具有相似性, 但需要更多和更长时间的观测资料进行验证. 南大西洋地磁异常区次极小值中心的出现, 表明 SAA 的演化可能正在进入一个新时期, 未来是否会分裂为两个异常区或形成新的变化, 仍需要长期监测并结合古地磁数据进一步判断其可能的演化方向.

References

- Alken P, Thébault E, Beggan C D, et al. 2021. International geomagnetic reference field: The thirteenth generation[J]. *Earth, Planets and Space*, 73(1): 49.
- Bai C H, Xu W Y, Kang G F. 2008. Main geomagnetic field models[J]. *Progress in Geophysics*, 23(4): 1045-1057 (in Chinese).
- Chen B, Ni Z, Xu R G, et al. 2016. The geomagnetic field in China and neighboring regions for the 2010.0 epoch[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(4): 1446-1456 (in Chinese).
- Chulliat A, Vigneron P, Hulot G. 2016. First results from the Swarm dedicated ionospheric field inversion chain[J]. *Earth, Planets and Space*, 68(1): 104.
- Chulliat A, Alken P, Nair M, et al. 2020. The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025[R]. National Geophysical Data Center; British Geological Survey.
- Davies C J, Constable C G. 2020. Rapid geomagnetic changes inferred from Earth observations and numerical simulations[J]. *Nature Communications*, 11(1): 3371.
- Fan D W, He B L, Li C H, et al. 2019. Spherical distance calculation method and precision comparison[J]. *Astronomical Research and Technology*, 16(1): 69-76 (in Chinese).
- Finlay C C, Olsen N, Kotsiaros S, et al. 2016. Recent geomagnetic secular variation from Swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model[J]. *Earth, Planets and Space*, 68(1): 112.
- Finlay C C, Lesur V, Thébault E, et al. 2017. Challenges handling magnetospheric and ionospheric signals in internal geomagnetic field modelling[J]. *Space Science Reviews*, 206(1): 157-189.
- Finlay C C, Kloss C, Olsen N, et al. 2020. The CHAOS-7 geomagnetic field model and observed changes in the South Atlantic Anomaly[J]. *Earth, Planets and Space*, 72(1): 156.
- Gao G M, Kang G F, Bai C H, Wang T Y. 2012. Characteristics of the spatial distribution and the secular variation of the main geomagnetic field gradients[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(8): 2651-2659 (in Chinese).
- Guo F X, Zhang Y J, Yan M H. 2007. The secular variation characteristics and mechanisms of geomagnetic field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(6): 1649-1657 (in Chinese).
- Guo S H. 2008. Electrodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 3rd edition (in Chinese).
- He F, Wei Y, Wan W. 2020. Equatorial aurora: The aurora-like airglow in the negative magnetic anomaly[J]. *National Science Review*, 7(10): 1606-1615.
- Лукишов Б Г, Спивак А А, Тер-Семенов А А. 2013. Effects of faulted seismic waves on the geomagnetic field[J]. Translated by Wang C, Wang L L. World Earthquake Translation Series, 44(3): 53-56 (in Chinese).
- Kennedy D, Norman C. 2005. What don't we know?[J]. *Science*, 309(5731): 75-75.
- Laundal K M, Richmond A D. 2017. Magnetic coordinate systems[J]. *Space Science Reviews*, 206(1-4): 27-59.
- Li A S, Li Z T. 2007. Research into the formation and change of the basic geomagnetic field[J]. *Progress in Geophysics*, 22(3): 744-750 (in Chinese).
- Li L G. 2016. What causes reversals in Earth's magnetic field?[J]. *Chinese Science Bulletin*, 61(13): 1395-1400 (in Chinese).
- Li Y X, Liu X Y. 2021. Research in the paleo geomagnetic field: Grand challenges and exciting opportunities[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(1): 64-74 (in Chinese).
- Maus S, Rother M, Hemant K, et al. 2006. Earth's lithospheric magnetic field determined to spherical harmonic degree 90 from CHAMP satellite measurements[J]. *Geophysical Journal International*, 164(2): 319-330.
- Maus S, Yin F, Lühr H, et al. 2008. Resolution of direction of oceanic magnetic lineations by the sixth-generation lithospheric magnetic

- field model from CHAMP satellite magnetic measurements[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(7): Q07021.
- Meier M M, Berger T, Jahn T, et al. 2023. Impact of the South Atlantic Anomaly on radiation exposure at flight altitudes during solar minimum[J]. *Scientific Reports*, 13(1): 9348.
- Nahayo E, Korte M. 2022. A regional geomagnetic field model over Southern Africa derived with harmonic splines from Swarm satellite and ground-based data recorded between 2014 and 2019[J]. *Earth, Planets and Space*, 74(1): 8.
- Nasuddin K A, Abdullah M, Abdul Hamid N S. 2019. Characterization of the South Atlantic Anomaly[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 26(1): 25-35.
- Olsen N, Lühr H, Sabaka T J, et al. 2006. CHAOS-a model of the Earth's magnetic field derived from CHAMP, Ørsted, and SAC-C magnetic satellite data[J]. *Geophysical Journal International*, 166(1): 67-75.
- Olsen N, Ravat D, Finlay C C, et al. 2017. LCS-1: A high-resolution global model of the lithospheric magnetic field derived from CHAMP and Swarm satellite observations[J]. *Geophysical Journal International*, 211(3): 1461-1477.
- Sabaka T J, Toffner-Clausen L, Olsen N, et al. 2020. CM6: A comprehensive geomagnetic field model derived from both CHAMP and Swarm satellite observations[J]. *Earth, Planets and Space*, 72(1): 80.
- Shen X, Zhang X, Yuan S, et al. 2018. The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission[J]. *Science China Technological Sciences*, 61(5): 634-642.
- Shi Y, Moldwin M B. 2022. Interhemispheric asymmetries in magnetosphere and ionosphere magnetic field residuals between Swarm observations and Earth magnetic field models[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127(3): e2021JA030190.
- Soni P K, Kakad B, Kakad A. 2022. Deepening of radiation belt particles in South Atlantic Anomaly Region: A scenario over past 120 years[J]. *Advances in Space Research*, 69(5): 2090-2101.
- Wei Q Y. 1990. Review and prospect of rock magnetism and paleomagnetism[J]. *Progress in Geophysics*, 5(3): 13-30 (in Chinese).
- Xu W Y. 2005. Laboratory experiments on geodynamo[J]. *Progress in Geophysics*, 20(3): 698-704 (in Chinese).
- Xu W Y. 2009. *Physics of Earth Electromagnetic Phenomena*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press (in Chinese).
- Yang 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*, 73(1): 45.
- Yang Y Y, Zhima Z, Shen X H, et al. 2024. Global geomagnetic field modeling based on Swarm Alpha magnetic field measurement[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 67(5): 1881-1890 (in Chinese).
- Yue Y C, Wei Y, Gao J W, et al. 2024. Review of secular variation studies in the South Atlantic Anomaly[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 55(6): 693-704 (in Chinese).
- Zeng L Y, Cao J B, Wei X H. 2014. Global changes of the geomagnetic field during 1980-2010[J]. *Progress in Geophysics*, 29(1): 116-121(in Chinese).
- Zhang W J, Gai C C, Liu J B, et al. 2022. Paleomagnetism: From the Earth to Mars[J]. *Earth Science*, 47(10): 3736-3764.

附中文参考文献

- 白春华, 徐文耀, 康国发. 2008. 地球主磁场模型[J]. *地球物理学进展*, 23(4): 1045-1057.
- 陈斌, 倪喆, 徐如刚, 等. 2016. 2010.0 年中国及邻近地区地磁场[J]. *地球物理学报*, 59(4): 1446-1456.
- 樊东卫, 何勃亮, 李长华, 等. 2019. 球面距离计算方法及精度比较[J]. *天文研究与技术*, 16(1): 69-76.
- 高国明, 康国发, 白春华, 王天媛. 2012. 主磁场梯度的空间分布和长期变化特征[J]. *地球物理学报*, 55(8): 2651-2659.
- 郭凤霞, 张义军, 言穆弘. 2007. 地磁场长期变化特征及机理分析[J]. *地球物理学报*, 50(6): 1649-1657.
- 郭硕鸿. 2008. *电动力学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 第三版.
- Лукишов Б Г, Спивак А А, Тервакврес А А. 2013. 经过断层的地震波对地磁场的影响[J]. 王超, 王琳琳 译. *世界地震译丛*, 44(3): 53-56.
- 李安生, 李振亭. 2007. 地球基本磁场的形成与变化的探讨[J]. *地球物理学进展*, 22(3): 750-758.
- 李力刚. 2016. 地磁倒转的原因是什么?[J]. *科学通报*, 61(13): 1395-1400.
- 李永祥, 刘欣宇. 2021. 古地磁场研究: 挑战与机遇[J]. *地质学报*, 95(1): 64-74.
- 魏青云. 1990. 岩石磁学与古磁学的回顾与展望[J]. *地球物理学进展*, 5(3): 13-30.
- 徐文耀. 2005. 地球发电机过程的实验室模拟研究[J]. *地球物理学进展*, 20(3): 698-704.
- 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.
- 杨艳艳, 泽仁志玛, 申旭辉, 等. 2024. 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*, 67(5): 1881-1890.
- 岳铤辰, 魏勇, 高佳维, 等. 2024. 南大西洋地磁异常区的长期变化研究进展[J]. *地球与行星物理论评(中英文)*, 55(6): 693-704.
- 曾凌云, 曹晋滨, 魏新华. 2014. 1980—2010 地磁场的变化[J]. *地球物理学进展*, 29(1): 116-121.
- 张伟杰, 盖聪聪, 柳加波, 等. 2022. 古地磁: 从地球到火星[J]. *地球科学*, 47(10): 3736-3764.