

分类号 _____ 密 级 _____
U D C _____ 编 号 _____

成 都 理 工 大 学

学 位 论 文

题名和副题名 1900 以来地球基本磁场的长期变化

作者姓名 李兴

指导教师姓名及职称 贾真 副教授

申请学位级别 学士 专业名称 地球物理学

论文提交日期 2024. 06. 02 论文答辩日期 2024. 06. 05

学位授予单位和日期 _____

答辩委员会主席 _____

评阅人 _____

2024 年 5 月

分类号 _____

学校代码: 10616

U D C _____

密级 _____ 学号: _____

成都理工大学学士学位论文

1900 以来地球基本磁场的长期变化

李兴

指导教师姓名及职称 _____ 贾真 副教授

申请学位级别 _____ 学士 专业名称 _____ 地球物理学

论文提交日期 2024. 06. 02 论文答辩日期 2024. 06. 05

学位授予单位和日期 _____

2024 年 5 月

成都理工大学

学士学位论文（设计）诚信承诺书

本人郑重声明所呈交的学士学位论文（设计）是本人在指导教师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得成都理工大学以外的其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同学对本文研究所做的贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学生本人（签名）： 李兴

2024 年 6 月 2 日

摘要

本课题致力于开发一套基于最新球谐分析算法和地磁要素计算方法的地磁场长期变化分析程序，以揭示自 1900 年以来地球磁场的演变规律。通过对文献的深入研究和数学算法的精确分析，我们确保所开发的算法能够准确地描述地球基本磁场的长期变化。借助 MATLAB 编程环境，我们开发了操作简便的分析程序，能够对地磁场数据进行高效处理、分析和可视化。通过对历史地磁数据的处理和分析，我们获取了地球基本磁场要素及其年变率的详细信息。同时，我们定量分析了世界磁模型（WMM）和国际地球磁场参考模型（IGRF）之间的数据差异，揭示了它们在不同时间和地点的变化趋势。本课题的主要成果包括一套完备的地磁场长期变化分析程序和对 WMM 和 IGRF 模型差异的详细量化比较。这些成果将有助于推动地磁场研究的进展，为我们更好地理解地球磁场的演变提供了重要参考。在未来的研究中，我们将进一步完善分析程序，结合更多地磁数据和其他地球物理数据，深入探讨地球磁场变化的原因和机制，为地球科学领域的研究提供更加全面和深入的信息。

关键词： 地磁学；基本场；长期变化

Abstract

This project is committed to developing a set of long-term variation analysis programs of geomagnetic field based on the latest spherical harmonic analysis algorithm and geomagnetic element calculation method, so as to reveal the evolution law of the earth's magnetic field since 1900. Through in-depth study of the literature and precise analysis of mathematical algorithms, we ensure that the algorithms developed can accurately describe the long-term changes in the Earth's fundamental magnetic field. With the help of the MATLAB programming environment, we have developed easy-to-use analysis programs that enable efficient processing, analysis, and visualization of geomagnetic field data. Through the processing and analysis of historical geomagnetic data, we obtain detailed information about the basic magnetic field elements of the Earth and their annual variability. At the same time, we quantitatively analyzed the data differences between the World Magnetic Model (WMM) and the International Reference Model for the Earth's Magnetic Field (IGRF), revealing their trends at different times and places. The main achievements of this project include a complete set of long-term variation analysis procedures for the geomagnetic field and a detailed quantitative comparison of the differences between the WMM and IGRF models. These results will help promote the progress of geomagnetic field research and provide an important reference for us to better understand the evolution of the geomagnetic field. In future research, we will further improve the analysis process, combine more magnetic data and other geophysical data, and deeply explore the causes and mechanisms of changes in the earth's magnetic field, so as to provide more comprehensive and in-depth information for research in the field of earth science.

Keywords: geomagnetism; main field; secular variation; IGRF; WMM

目 录

摘要	I
Abstract	II
第 1 章 前 言	1
1.1 选题依据与研究意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.3 研究内容与技术路线	2
1.4 预期成果	4
第 2 章 地球基本磁场高斯球谐分析	5
2.1 地磁场的高斯理论	5
2.2 地球基本磁场数学模型	6
2.3 坐标转换	7
2.4 地心偶极子磁场磁矩及磁极计算原理	7
第 3 章 地球基本磁场长期变化特征	11
3.1 地心偶极子磁场长期变化特征	11
3.2 非偶极子磁场长期变化特征	13
3.3 地磁场要素年变率及其二阶年变率	18
第 4 章 国际地磁参考场与世界地磁模型对比	23
结 论	29
致 谢	31
参 考 文 献	33
附 录	35

第1章 前言

1.1 选题依据与研究意义

地球基本磁场是地磁场的主要成分，其长期变化不仅揭示了地球内部的动力学过程，还对导航定位和空间天气预报有着直接影响。深入研究地球基本磁场的变化特征，可以提高导航系统的精度，保障航天器和卫星的运行安全。此外，这些研究还有助于改进空间天气预报系统，减少太阳风暴等空间天气事件对地球技术系统的影响，从而保护全球电力网和通信系统。

地磁场的长期变化特征是科学家们长期关注的研究热点。1900年以来，通过地面观测和卫星数据的积累，人们对地球基本磁场的认识不断深化。国际地磁参考场（IGRF）模型和卫星观测数据提供了丰富的研究资料，使得分析地磁场长期变化特征成为可能。研究表明，地磁场的变化不仅与地核内流体运动有关，还可能受到外部因素如太阳活动的影响。因此，系统地研究地球基本磁场的变化特征，不仅能够深化对地磁场起源的理解，还能为相关领域的应用提供重要的科学依据。

1.2 国内外研究现状

目前，地球基本磁场长期变化的研究已经取得了许多重要成果。国际上，地球磁场长期变化的研究主要集中在利用卫星磁场观测数据和地面观测数据，通过球谐分析等方法，对地球磁场的时空变化规律进行深入探究。

1839年，Gauss 提出了地磁场的高斯球谐分析方法。随后在1885年，Schmidt 进一步完善了这一方法，发展成了现在的地磁学高斯理论。基于这些理论，国际上建立了统一的地磁场数学模型，即球谐模型。使用球谐模型计算地磁场，球谐系数必不可少。球谐系数是一个随时间而变化的量。国际地磁与高空物理协会（IAGA）每五年发布一组球谐系数数据，用于计算特定年份和时间的地磁场参数。这种定期更新确保了地磁模型能够反映地球磁场的变化趋势，并提供了准确的参考。美国地球物理学家约翰·亨利·施瓦茨和罗伯特·科克分别提出了地球磁极漂移和地磁倾角变化的理论模型及过磁性岩石的研究，揭示了地球磁场的历史变化和地球地质演化过程。美国国家航空航天局（NASA）和欧洲航天局（ESA）等机构的IGRF（国际地球参考场）和WMM（世界磁场模型）等模型提供了丰富的磁场观测数据，为地球磁场长期变化的研究提供了重要数据支持。Malin 的研究关注了地球磁场的长期变化及其在过去几十年中的变化趋势（Malin S R C, 1969），为理解地球磁场的演化提供了非常重要的线索及依据。

在国内，地球磁场长期变化的研究也逐渐受到重视。地震局等科研机构及高校开展了一系列地球磁场长期变化的监测与研究工作，取得了一定进展。国内研究主要集中在地磁场数据的处理与分析、地磁场变化与地质灾害、地球磁场与电离层等方面，积累了大量的实验数据和理论成果。王宣文对地球偶极子磁场的研究揭示了地球磁场演化的一些重要特征（王宣文，2005）。徐文耀和魏自刚对于地磁场强度及其漂移的研究（徐文耀，魏自刚，2001），为我们理解地球磁场的长期演化提供了新的视角。魏自刚在地磁场的剧烈变化的课题中还研究

了 20 世纪地球磁场的剧烈变化（魏自刚，2000），对地球磁场长期演化的规律性提出了新的认识，他们同国外 Bullard E C 及 Yukutak 等学者的研究共同关注了地球磁场的西向漂移（Bullard E C, Freedman C, Gellman M, et al, 1950），对地球磁场长期演化的机理进行了深入探讨。

当前地球基本磁场长期变化的研究面临着数据处理与分析、模型验证与修正等方面的挑战。数据处理与分析方面，随着空间技术和地面观测技术的不断发展，获取到的地磁数据大幅增加，如何有效地处理和分析这些数据成为一个亟待解决的问题。李宏等人的研究，即基于 IGRF 和 WMM 模型的对于地磁匹配特征量的选择模型验证与修正（李宏, 魏毅博, 邹维宝, 2022）及彭飞等人在对于地磁模型构建仿真的研究中提出了基于 IGRF 和 WMM 模型的地磁匹配特征量选择方法（彭飞, 熊凌, 陈洋, 2020），为地磁数据处理和分析提供了新的思路和方法。另一方面，现有的地球磁场模型虽然已经取得了一定的成果，但仍存在一定的误差和局限性，尤其是在高纬度地区和地壳构造复杂区域的磁场预测方面，需要进一步改进和完善。申文斌等学者在分析 IGRF-12 和 WMM2015 模型在中国区域的精度及适用性时较为详细的提出了完善之处（聂琳娟, 邱耀东, 申文斌等, 2017）。未来的研究可以通过引入新的数据源、改进分析方法和建立更精确的模型来解决这些挑战。地球基本磁场长期变化的研究还有待进一步深入，尤其是在地球磁场与地质灾害、环境变化等方面关联性研究上，有待加强和拓展。地球磁场对地质灾害具有一定的预测和监测作用，如地震、火山喷发等地质灾害往往伴随着地磁场的异常变化，因此深入研究地球磁场与地质灾害之间的关系，对于灾害防范和减灾具有重要意义。同时，地球磁场的变化还与环境变化密切相关，这些关联性研究有助于深入理解地球系统的整体运行机制。

地球基本磁场长期变化研究的前沿应用方向包括但不限于：地球内部结构探测与勘探、地质灾害监测与预警、导航系统与航天探测技术、环境变化与气候演变等领域。IGRF 和 WMM 等模型已被广泛应用于航空航天、导航系统、通信技术等工程领域，为这些领域的发展提供了重要的支持和保障。未来，随着科学技术的不断进步和研究方法的不断完善，相信地球基本磁场长期变化的研究会取得更加丰硕的成果，为人类社会的可持续发展做出更大的贡献。

1.3 研究内容与技术路线

研究内容：

- (1) 地球基本磁场各要素计算的计算机实现；
- (2) 1900 年以来地球基本磁场的长期变化特征；
- (3) WMM 和 IGRF 模型之间的差异。

技术路线：

IGRF 的球谐系数是基于一个半径为 6371.2 公里的参考球推导出来的。然而，地球并非理想的球体，而是略微扁平的椭球体。为了提高地磁场计算的准确性，通常需要考虑地球的扁率，通过坐标变换将球面坐标转化为椭球体坐标。这种转换能更准确地反映地球的实际形状，从而提高地磁计算的精度。

以矩阵 $P_n^m(\cos \theta)$ 表示勒让德函数， $\cos \theta$ 说明该函数以地心余纬 θ 的余弦值为自变量，

$\theta = 90^\circ - \varphi'$ ，可以推导出勒让德函数的递推关系。然后，通过球谐系数和高斯级数表达式，我们可以在地心球坐标系中计算出地磁场的三个分量 X' , Y' 和 Z' :

$$X' = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} [g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)] \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} \quad (1.1)$$

$$Y' = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} [g_n^m \sin(m\lambda) - h_n^m \cos(m\lambda)] \frac{mP_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta} \quad (1.2)$$

$$Z' = -\sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (n+1) \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} [g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)] P_n^m(\cos\theta) \quad (1.3)$$

为了描述地磁场的空间分布特征，经常将地磁场在北-东-地地理坐标系中表示为 7 个地磁要素 (F , H , X , Y , Z , D , I)。其中 F 为地磁场总强度， H 为地磁场水平强度， X 为地磁场北向分量， Y 为地磁场东向分量， Z 为地磁场垂直分量， D 为磁偏角， I 为磁倾角。将地心磁场矢量分量 X' , Y' 和 Z' 旋转到椭球参考系中，使用：

$$X = X' \cos(\varphi' - \varphi) - Z' \sin(\varphi' - \varphi) \quad (1.4)$$

$$Y = Y' \quad (1.5)$$

$$Z = X' \sin(\varphi' - \varphi) + Z' \cos(\varphi' - \varphi) \quad (1.6)$$

由 X , Y , Z 三个分量可以计算其余 4 个地磁要素：

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (1.7)$$

$$F = \sqrt{H^2 + Z^2} \quad (1.8)$$

$$I = \arctan(Z, H) \quad (1.9)$$

$$D = \arctan(Y, X) \quad (1.10)$$

在 IGRF (国际地磁参考场) 模型中，将地理坐标转换为地心坐标是因为地心坐标系对于地磁场计算更为自然和便利。地磁场是由地球内部产生的，使用地心坐标系（以地球质心为原点）可以更直接地描述地磁场的分布和变化。地理坐标系通常由经度、纬度和海拔高度（或椭球高度）表示，而地心坐标系（也称为 ECEF 坐标系，地球中心地球固定坐标系）则使用 X、Y、Z 三维直角坐标表示。转换过程主要涉及从球面坐标系转换为直角坐标系。

根据我们的目的，需要实现的函数功能：

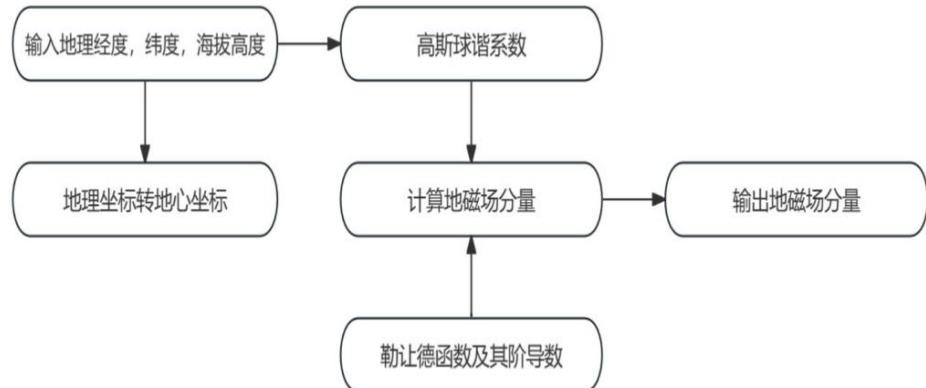


图 1-1 程序路线

1.4 预期成果

- (1) 获取一套可以方便用户使用的用于计算地球基本磁场各要素及其年变率的计算机程序；
- (2) 获得对 1900 年以来地磁场长期变化特征的客观描述；
- (3) 获得对基本场不同计算模型之间差异的定量数学描述。

第2章 地球基本磁场高斯球谐分析

2.1 地磁场的高斯理论

地磁场满足麦克斯韦方程组：

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \times H = 4\pi j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.2)$$

式中 B 为磁感应强度， H 为磁场强度， j 为电流密度， D 为电位移矢量。因为 $B = \mu H$ ，且设磁导率 $\mu = \mu_0$ ，所以 (2.1) 式变成：

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (2.3)$$

地球表面附近，大气的电导率 $\sigma \approx 0$ ，即可将空气视为绝缘体，故传导电流 $j = \sigma E = 0$ 。

我们知道地球电磁场是一个缓变场，所以位移电流 $\frac{\partial D}{\partial t} \approx 0$ 。故可以说地磁场强度 H 是一个无旋场，因此有 $\nabla \times H = 0$ ；这样就可以引进一个标量磁势 U ，使得 $H = -\nabla U$ 。

将上式代入 (2.3) 式后，就可以得到拉普拉斯方程：

$$\nabla^2 U = 0 \quad (2.4)$$

由此可见，只要 $\sigma \approx 0$ 及 $\frac{\partial D}{\partial t} \approx 0$ ，式处处成立。

我们假定地球是一个半径为 R 的球体。在以球心为原点的球坐标系中，极轴取为地球自转轴并指向北极， r 为球心 O 至测点 P 的距离， θ 为余纬度， λ 为经度，则式 (2.4) 的具体形式为：

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \lambda^2} = 0 \quad (2.5)$$

方程的通解为：

$$U(r, \theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} [r^{-(n+1)} (a_n^m \cos m\lambda + b_n^m \sin m\lambda) + r^n (c_n^m \cos m\lambda + d_n^m \sin m\lambda)] P_n^{(m)}(\cos \theta)$$

其中 a_n^m , b_n^m , c_n^m 与 d_n^m 为待定系数， $P_n^{(m)}(\cos \theta)$ 为缔合勒让德函数，其定义为：

$$P_n^{(m)}(\cos \theta) = \sin^m \theta \frac{d^m P_n(\cos \theta)}{d(\cos \theta)^m}, \text{ 其中 } P_n(\cos \theta) \text{ 是勒让德函数。}$$

施密特定义： $P_n^m(\cos \theta) = [\frac{2}{\delta_m} \cdot \frac{(n-m)!}{(n+m)!}]^{\frac{1}{2}} P_n^{(m)}(\cos \theta)$ ，其中当 $m=0$ 时 $\delta_m=2$ ； $m \geq 1$ 时 $\delta_m=1$

$P_n^m(\cos \theta)$ 称为施密特形式的缔合勒让德函数。又 $B = \mu_0 \nabla U = \nabla(\mu_0 U)$ ，则有：

$$\mu_0 U(r, \theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n [r^{-(n+1)} (A_n^m \cos m\lambda + B_n^m \sin m\lambda) + r^n (C_n^m \cos m\lambda + D_n^m \sin m\lambda)] P_n^m(\cos \theta)$$

其中 $A_n^m = \frac{\mu_0 a_n^m}{[\frac{2}{\delta_m} \cdot \frac{(n-1)!}{(n+1)!}]^{\frac{1}{2}}}$, B_n^m , C_n^m , D_n^m 和 b_n^m , c_n^m , d_n^m 的关系和上式相同。

将系数 A_n^m , B_n^m , C_n^m 和 D_n^m 改写成 $g_n^m = A_n^m R^{-(n+2)}$, $h_n^m = B_n^m R^{-(n+2)}$; $j_n^m = C_n^m R^{n-1}$, $\kappa_n^m = D_n^m R^{n-1}$

在地球表面上有 $r = R$, 故:

$$\mu_0 U(R, \theta, \lambda) = R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n [(g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) + (j_n^m \cos m\lambda + \kappa_n^m \sin m\lambda)] P_n^m(\cos \theta)$$

上式就称为地磁场磁势的高斯级数表达式, 其中 g_n^m 和 h_n^m 称为内源场系数, j_n^m 与 κ_n^m 称为外源场系数。

基本磁场起源于地球内部, 它是地磁场的主要成分。因为基本磁场只来源于地球内部, 故基本磁场磁势的高斯级数表达式为:

$$\mu_0 U = R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) \quad (2.6)$$

将式 (2.6) 代入 $H = -\nabla U$ 中可以得到基本磁场三分量在地球表面上的高斯级数表达式:

$$X(\theta, \lambda) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) \quad (2.7)$$

$$Y(\theta, \lambda) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (g_n^m \sin m\lambda - h_n^m \cos m\lambda) \frac{m}{\sin \theta} P_n^m(\cos \theta) \quad (2.8)$$

$$Z(\theta, \lambda) = -\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (n+1) (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) \quad (2.9)$$

2.2 地球基本磁场数学模型

地磁场是地球的关键特征之一, 不仅可以保护我们的星球免受太阳风和宇宙辐射的侵袭还在导航、通信等现代技术领域起到至关重要的作用。地磁场的变化可能影响全球范围内的各种活动, 包括航空、航海、地质研究和通讯。因此, 理解和预测地磁场的变化是地球科学研究的重要组成部分。在这种背景下, 科学家们开发了各种地磁场模型, 以帮助更好地描述和预测地磁场的特征。这其中, 国际地磁参考场 (IGRF) 和世界磁场模型 (WMM) 是两个最为重要的模型, 它们在地磁场研究和实际应用中扮演着关键角色。

高斯系数应当能够客观地反映全球范围内地磁场的基本特征。1964 年的世界地磁测量会议上讨论了采用统一的国际地磁参考场 (IGRF) 的必要性, 以避免不同作者因使用不同数据和地球模型而得出不同结果。1968 年 10 月, 国际地磁与高空物理学会 (IAGA) 召开专门会议, 批准了 1965 年的国际地磁参考场作为全球通用的地磁场标准。1965 年的 IGRF 包含 80 个高斯系数, 并计划每五年更新一次, 主要目的是更新高斯系数, 因为地磁场具有长期变化的特点。因此, 每五年就根据新的数据对模型进行修正, 以提高参考资料的准确性。最新的 IGRF 是第 13 版, 包含 195 个高斯系数。IGRF-13 的高斯球谐系数见附录表 1。

世界磁场模型 (WMM) 是描述全球主要地磁场及其缓慢变化的球谐模型, 由美国国家

环境信息中心（NCEI）和英国地质调查局（BGS）联合开发。它是美国国家地理空间情报局（NGA）和英国国防地理中心（DGC）的合作产品。WMM 是美国、英国以及国际组织（如北大西洋公约组织和国际水文组织）用于地磁导航和航向参考的标准模型，同时广泛应用于由非政府机构开发的导航和定位系统。由于地球外核液态部分的对流，地磁场会不断变化。因为这个系统在长时间尺度上呈混乱状态，无法完全预测这些变化，所以 WMM 的准确性会随时间缓慢降低，因此需要定期更新（与 IGRF 相似，每五年更新一次）。WMM2020 的高斯球谐系数见附录表 2。

2.3 坐标转换

国际地磁参考场(IGRF-13)的球谐系数是在半径为 6371.2km 的参考球中推导出来的，地球形状并非是理想的球体，而是更接近于一个旋转扁椭球体。为了提高地磁计算的精度，需要考虑地球的扁率。

地面点的位置可用大地经度 L ，大地纬度 B 和大地高 H 表示，则坐标转换公式如下：

$$L = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (2.10)$$

$$B = \arctan\left(\frac{Z + e^2 b \sin^3 \theta}{\sqrt{X^2 + Y^2 - e^2 a \cos^3 \theta}}\right) \quad (2.11)$$

$$H = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos B} - N \quad (2.12)$$

其中， $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$ ， $\theta = \arctan\left(\frac{Z \cdot a}{\sqrt{X^2 + Y^2} \cdot b}\right)$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+H) \cos B \cos L \\ (N+H) \cos B \sin L \\ [N(1-e^2) + H] \sin B \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

其中， N 为卯酉圈的半径， a 为地球椭球的长半轴， b 为地球椭球的短半轴。 X 表示该点在地心地固坐标系中的 X 轴坐标， X 轴指向地球赤道平面与本初子午线（ 0° 经线）的交点方向；表示该点在地心地固坐标系中的 Y 轴坐标， Y 轴位于赤道平面内，并与 X 轴正交，指向 90° 经线（东经 90° 方向）。

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

2.4 地心偶极子磁场磁矩及磁极计算原理

地磁场的磁势可以通过球谐函数展开的高斯级数来表示，地磁场磁势（磁矢势）的高斯级数表达式通常表示为：

$$\mu_0 U(R, \theta, \lambda) = R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n [(g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) + (j_n^m \cos m\lambda + \kappa_n^m \sin m\lambda)] P_n^m(\cos \theta)$$

系数 g_n^m , h_n^m , j_n^m , κ_n^m 称为高斯系数, 其中 g_n^m , h_n^m 称为内源场系数, j_n^m 和 κ_n^m 称为外源场系数。而 $n=1$ 的项相当于在地心放置一个磁偶极子产生的磁势。

假定地心偶极子的磁矩为 M , M 与地球自转轴夹角为 $\pi - \theta_0$, 经度角为 λ_0 ; θ_0 亦称极角, λ_0 即方位角; 偶极子的轴即地磁轴。这个偶极子在空间任一点 $P(r, \theta, \lambda)$ 处产生的磁势为:

$$U = \frac{M \cdot r}{4\pi r^3} = \frac{M_z P_1^0(\cos \theta) + M_x P_1^1(\cos \theta) \cos \lambda + M_y P_1^1(\cos \theta) \sin \lambda}{4\pi r^2}$$

由磁矢势表达式取 $n=1$, 得:

$$\mu_0 U_1 = \frac{R^3}{r^2} [g_1^0 P_1^0(\cos \theta) + g_1^1 P_1^1(\cos \theta) \cos \lambda + h_1^1 P_1^1(\cos \theta) \sin \lambda]$$

比较两式可知, 只需让: $\frac{\mu_0}{4\pi} M_z = R^3 g_1^0$, $\frac{\mu_0}{4\pi} M_x = R^3 g_1^1$, $\frac{\mu_0}{4\pi} M_y = R^3 h_1^1$, 即可得到 $U = U_1$

一个均匀磁化的球体的磁场也是一个偶极子场, 所以通常也说, 地磁场近似于一个均匀磁化球体的磁场。均匀磁化球体的磁矩与磁化强度的关系为: $M = VJ = \frac{4}{3}\pi R^3 J$, 式中 V 为球体体积, R 为球体半径, J 为磁化强度。

由此可得偶极子磁场的表达式为:

$$X = -g_1^0 \sin \theta + (g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda) \cos \theta \quad (2.14)$$

$$Y = g_1^1 \sin \lambda - h_1^1 \cos \lambda \quad (2.15)$$

$$Z = -2[g_1^0 \cos \theta + (g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda) \sin \theta] \quad (2.16)$$

就可以推出偶极子磁矩(常称地球磁矩)的大小:

$$M = \frac{4\pi}{\mu_0} R^3 \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2} \quad (2.17)$$

即只要知道一阶高斯系数, 就可算出地球磁矩。于是立即得到地心偶极子 M 的极角 θ_0 与方位角 λ_0 :

$$\tan \theta_0 = \frac{\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}}{|g_1^0|}, \quad \tan \lambda_0 = \frac{h_1^1}{g_1^1} \quad (2.18)$$

地心偶极子磁矩矢量 M 可以分解成互相垂直的三个分量 M_x , M_y , M_z 。其中 M_z 与地球自转轴重合, 而方向由地理北极指向南极, 常称之为轴向偶极子。 M_x , M_y 都位于赤道平面内, 二者的和矢量称为赤道偶极子。显然, 由于 g_1^0 比 g_1^1 和 h_1^1 要大得多, 所以在地心偶极子场中, 轴向偶极场占主要部分。

地磁轴与地球表面的两个交点称为地磁北极与地磁南极。它们分别位于地理北极与地理南极附近。必须注意的是, 地磁极与磁极是两个不同的概念。地磁南北极的连线是地磁轴, 即地心偶极子磁轴, 必然通过地心。磁极是由实测结果确定的, 它们是地磁图上倾角为 90°

的等偏线汇聚的两个点（实际上可由各年代高斯系数计算出）。两个磁极的连线不一定通过地心。

极角和方位角通常用来描述球坐标系中的点。在地理坐标系中，经纬度是用来描述点的位置的，经纬度与球坐标系中的极角与方位角的关系可用下式表示：

$$\varphi = 90^\circ - \theta_0 \quad (2.19)$$

$$\lambda = \lambda_0 \quad (2.20)$$

其中， φ 为地磁极的纬度， λ 为地磁极的经度， λ_0 为观测点的经度。

第3章 地球基本磁场长期变化特征

3.1 地心偶极子磁场长期变化特征

地心偶极子磁场是地球基本磁场的组成部分，约占全部磁场的 80—85%，是地磁场的主要部分，其形成主要源于地球内部液态外核的电导体流体运动。

地心偶极子磁场的长期变化主要包括以下几个方面：

(1) 偶极子磁矩每年以 0.05% 的速度衰减：地心偶极子磁场的一个显著特征是磁矩的长期衰减。这种衰减可能是由于地球内部的动力学过程，尤其是外核中铁合金的热对流，导致地心偶极子磁场的磁矩逐渐减小。这一现象在较长时间尺度上展示了地球内部动力学和热演变的影响；

(2) 偶极子每年以 0.05° 的速度沿经度方向向西进动：长期来看，地心偶极子磁场还表现为磁场方向的西向偏移。这一现象与地球磁极的运动有关，即地磁极的位置在时间上发生变化。这种西向偏移可能受到地外核中不均匀的加热和流动、地壳运动等多种因素的影响；

(3) 偶极子每年以 0.02° 的速度沿纬度方向向北移动。

地心偶极子磁场磁矩的长期演变：在本章节中，我们利用基于国际地磁参考场(IGRF)模型的地磁场分析程序研究偶极子场磁矩及磁极的长期变化。地磁场的强度尽管在一些地区逐年增加而在另一些地区逐年减小，但是平均而言，地磁场强度约以 $10\text{-}20\text{ nT/a}$ 的速度在逐年减弱。从 1900 年到 2020 年，地心偶极子磁场的磁矩呈现出逐渐减小的趋势。事实上，各年偶极子磁矩的计算结果表明，目前磁矩的衰减速度为 $m = -4.2 \cdot 10^{19} \text{ Am}^2/\text{a}$ ，所以 $m/M = -5.2 \cdot 10^{-4}/\text{a}$ ，也就是说，在最近一百年内，地球磁矩衰减了 5%，在这段时间内，磁矩从约 $8.32 \cdot 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 下降到约 $7.7 \cdot 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ ；如果地球磁矩按此速度一直衰减下去，那么在两千年以后，地球磁矩将变为零，地心偶极子磁场将不复存在。但考古地磁的研究表明，在漫长的历史年代中，地球磁矩并不总是单调衰减，而是表现为衰减-增长-再衰减的周期性的变化。例如，在两千年前，地球磁矩就是逐渐增长的。所以在谈到地球磁矩的衰减时，只是针对现代磁场而言的。

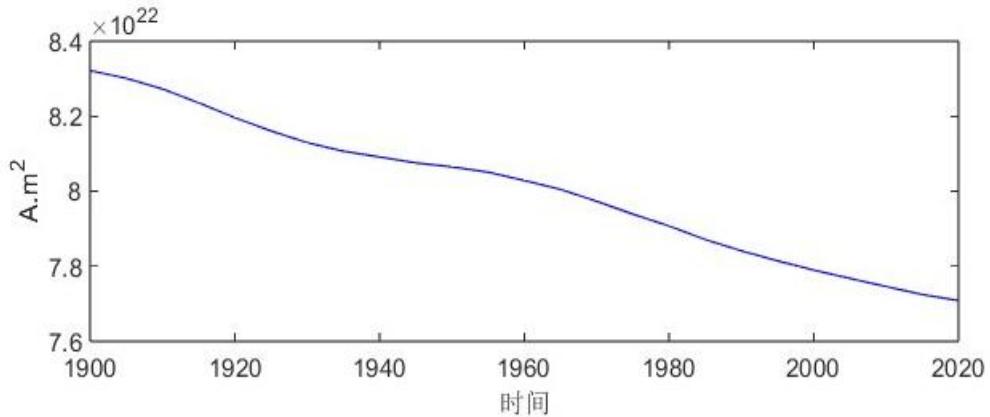


图 3-1 1900 年以来地心偶极子磁矩的长期变化

地球偶极子磁场变化是地磁场长期变化的一个重要特征。随着地磁场的长期变化, 磁层的大小与结构也会发生相应的变化, 从而引起近地环境的变化。当偶极矩变小时, 磁层会收缩, 磁层顶会逼近地球, 对于磁暴极为重要的环电流也会改变结构, 甚至难以形成。偶极矩减小到一定程度时, 磁极要发生倒转。极性倒转会使磁层结构完全翻转过来。在倒转期间, 磁极会移动到低纬或赤道附近, 本来位于高纬的极隙区会出现在低纬地区, 进而改变太阳风的能量输入, 也会影响能量的纬度分布和经度差异。

偶极矩的衰减与地磁场倒转有关系。地磁场最近的一次反极性事件发生在 2 万年前的 1 万年期间内。地磁场反转的一种可能模型认为极性的反转首先是场强的衰减, 在几千年内场强衰减为原来的三分之一, 同时偶极子轴有约 30° 左右的摆动, 然后沿 不规则的途径移到相反的极性, 场强开始上升, 其时间间隔为 10^3 到 10^4 年。

地磁极位置的变化: 利用磁场数据计算出的地磁南极位置呈现出复杂的轨迹, 同时清晰地显示了南极位置在时间上的演变; 1900 年地磁南极位置位于大约 $(107.3^\circ\text{E}, 81.5^\circ\text{S})$, 而到了 2020 年, 南极位置移动至 $(111.2^\circ\text{E}, 78.9^\circ\text{S})$ 。地球磁南极的位置在 1930 年左右发生转折, 由向东北漂移突然转向向西北漂移; 大约从 1960 年起, 加速向西北漂移, 可以估算出西向漂移速度约为 $0.05^\circ/a$, 北向漂移速度约为 $0.025^\circ/a$, 这与以前的认识是一致的。

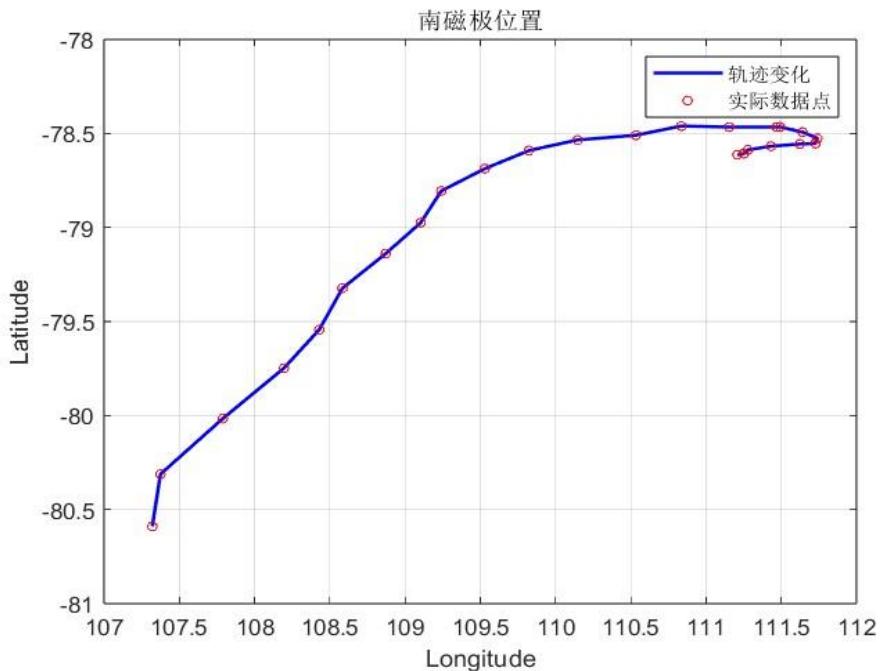


图 3-2 南磁极位置变化

利用地磁南极位置数据绘制地图，清晰地展示了地磁南极位置在地球表面的变化，提供了直观的全球范围内地磁南极位置演变的视觉工具。

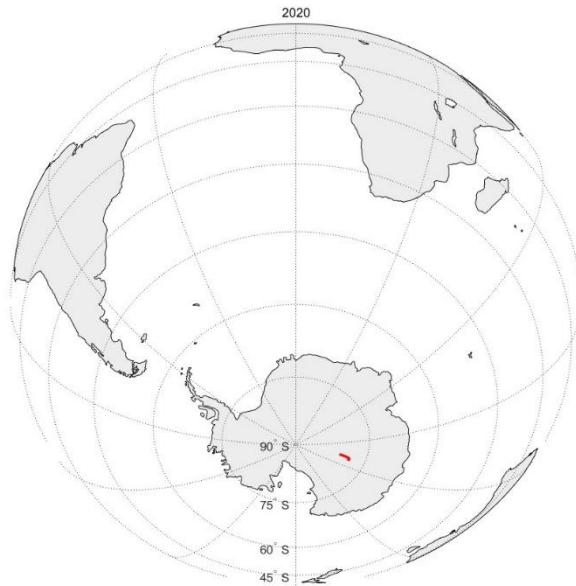


图 3-2 三维地球模型上的南磁极位置变化轨迹

3.2 非偶极子磁场长期变化特征

地球的非偶极子磁场是指地球磁场中不符合理想偶极子模型的部分。一个典型的偶极子磁场类似于一个简单的条形磁铁，具有两个主要的极点：北极和南极。相对而言，非偶极子磁场包括更复杂的磁场结构，它们可能包括额外的极点、异

常区域和其他偏离偶极子形态的特征。

地球磁场的主要来源是地球核心中液态铁的流动，形成所谓的地磁发电机。这种发电机主要产生偶极子磁场，但由于地核内部的复杂动力学和对流模式，导致了非偶极子磁场的出现。这些非偶极子成分不仅在强度和方向上有变化，还可能在空间上呈现复杂的形态。非偶极子磁场具有显著的长期变化特征，这些变化通常反映了地核内部的动力学过程以及地球磁场的整体演化。一些主要的长期变化特征如下：

(1) 位置漂移：非偶极子磁场的特征可能随着时间的推移而移动。这意味着特定区域的磁场强度和方向可能会发生变化。例如，南大西洋异常（South Atlantic Anomaly）是一个非偶极子特征突出的区域，它的范围和位置在几十年或更长时间尺度上都发生了变化；

(2) 强度变化：地球整体磁场的强度可能随着时间的推移而减弱或增强，这可能部分源于地核内部的流体动力学变化。这些变化会影响非偶极子磁场的强度，可能导致某些区域的磁场减弱，而其他区域则增强；

(3) 极移位和反转：虽然磁场极点的移动和反转主要与偶极子磁场有关，但非偶极子成分的变化可以影响这些过程。极移位（geomagnetic pole wandering）是指磁场的北极和南极随着时间的推移发生移动，而极反转（geomagnetic reversal）则是磁场南北极反转的过程。这些现象与地核对流的复杂性密切相关。

南大西洋异常：

南大西洋异常区（South Atlantic Anomaly, SAA）是地球上地磁场强度最低的区域之一，对卫星和其他空间设备有显著影响。IGRF-13 是最新发布的国际地磁参考场模型，它利用高斯球谐系数精确描述地球的地磁场分布。在本课题中，我们使用 Matlab 编写的程序，基于 IGRF-13 模型，计算并绘制了 2020 年 1 月 1 日地磁场要素的全球分布。从图 3-6 可以清晰地看到南大西洋异常区的轮廓和范围。该区域横跨 10°N 至 60°S 的纬度范围以及 20°E 至 100°W 的经度范围，其中心位于大约 (45°W, 30°S)。由于该异常区正好位于南美洲的巴西附近，因此也被称为巴西磁异常。

南大西洋异常区的形成与地球内核和地幔的动力过程密切相关。这一区域的磁场异常会对通过该区域的卫星和航天器产生影响，增加了电子设备受到辐射损坏的风险。因此，研究和监测南大西洋异常区对空间任务的规划和卫星的设计与保护具有重要意义。此外，南大西洋异常区的存在还提供了一个天然实验室，可以用于研究地球磁场的变化和地球内部的物理过程。通过详细分析该区域的地磁数据，可以帮助科学家更好地理解地球磁场的演化以及其与地球内部结构之间的关系。

总之，通过利用 IGRF-13 模型计算得到的南大西洋异常区的地磁场要素分

布图，我们可以更准确地了解该区域的磁场特性，这对地球科学的研究和实际应用具有重要的参考价值。

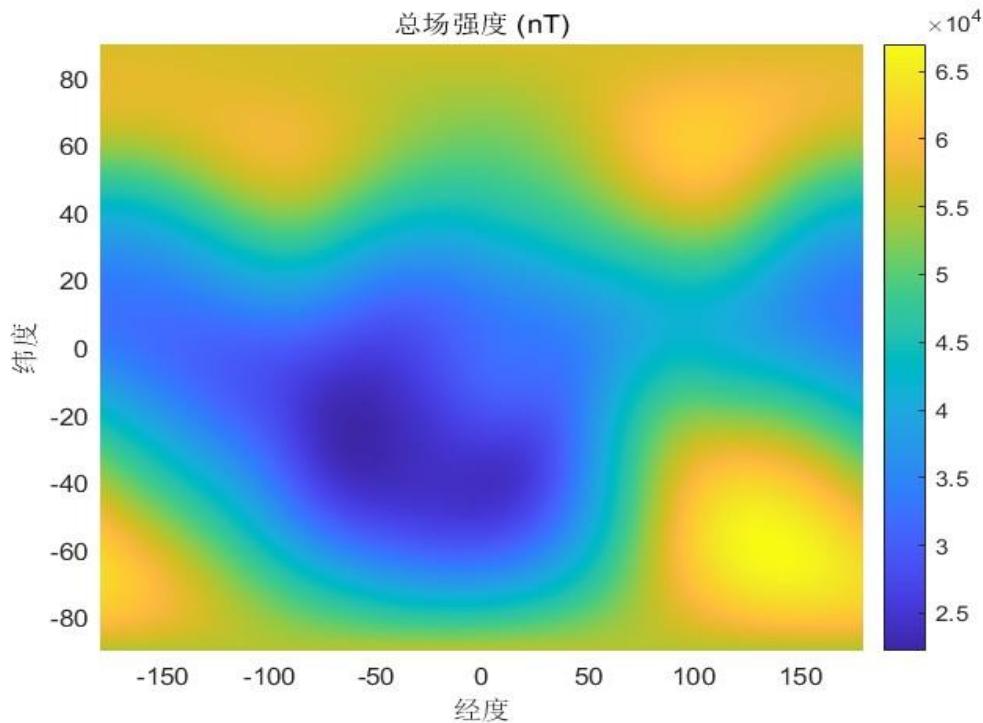
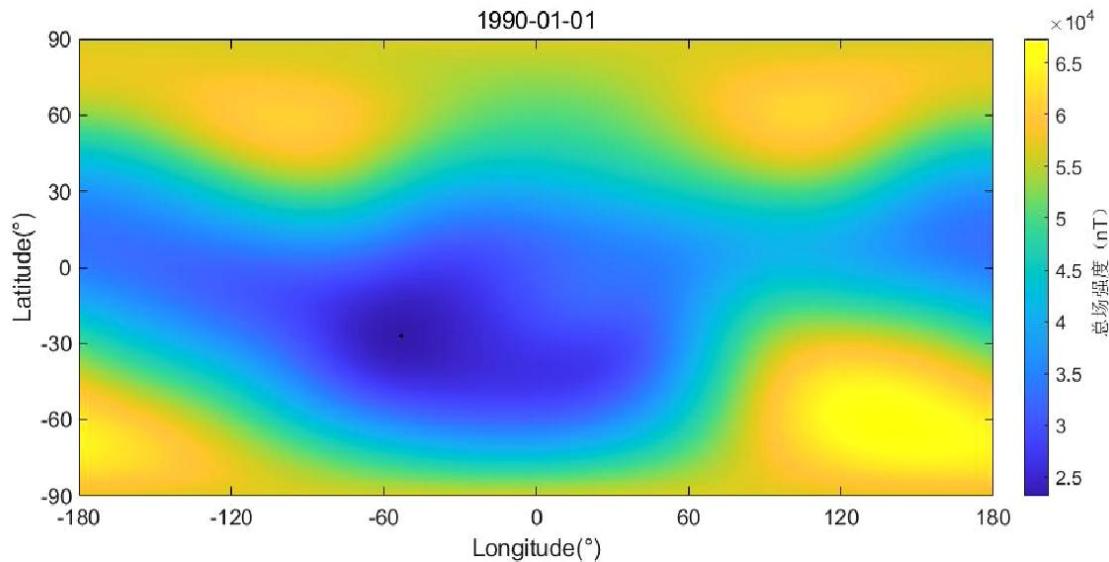


图 3-6 固定时间点地磁总场全球分布

为了研究 1990 年至 2020 年期间南大西洋异常区地磁总场强度的变化，我们选择每一年第一天的地磁总场强度作为该年的代表值，并将这一时间段内南大西洋异常区域极值点的位置变化显示在 2020 年地磁总场强度等值线填充图上。



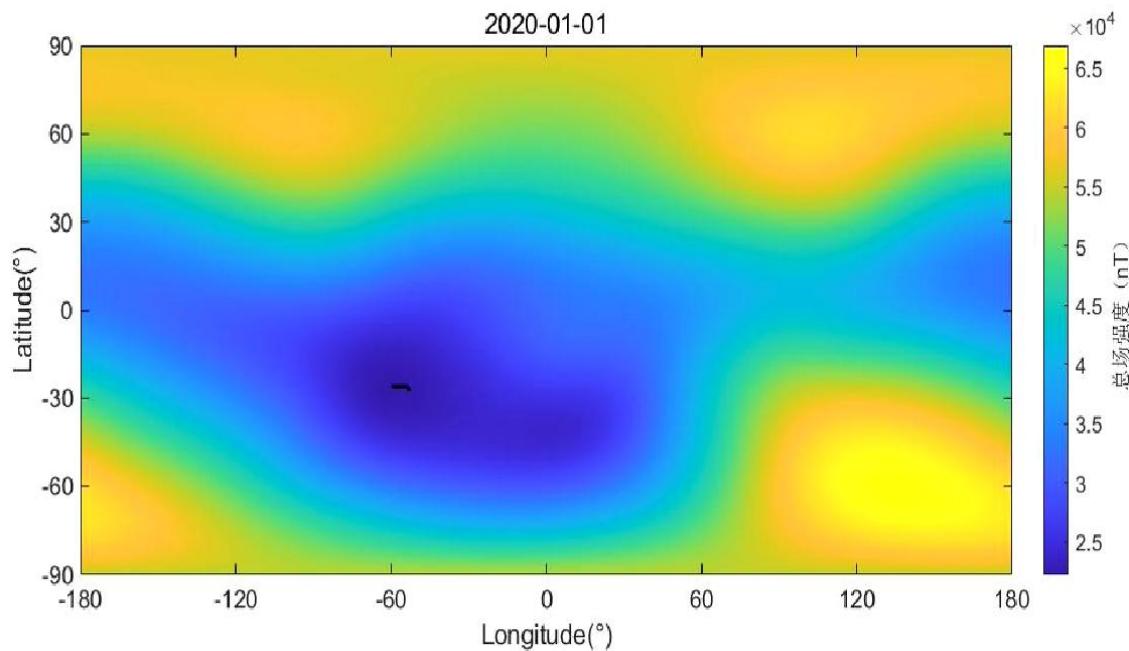


图 3-8 南大西洋异常区极值点位置变化轨迹

南大西洋异常区不仅表现出地磁场的减弱，其范围也在逐渐扩大。此外，该区域的中心每年向西移动约 0.3 经度。美国 NASA 的科学家甚至预测，如果南大西洋异常区继续以目前的速度扩大，到 2240 年，它将可能覆盖半个南半球。南大西洋异常区的这些现象暗示着地球的磁北极和磁南极可能即将翻转，但从地球漫长的历史来看，这个“即将”可能发生在明天，也可能在 3000 年后。

为了更加直观地显示一年内地磁场的变化，在总结了地球偶极子磁场和非偶极子磁场的长期变化特征后，我们利用基于国际地磁参考场模型（IGRF）的地磁场分析程序，计算了 2020 年每月第一天的地磁总场强度，并将其作为该月的代表值。为了展示地磁总场强度的变化，我们采用了除 1 月之外的其他月份的数值减去 1 月的数值的方法。然后将这些差值以等值线填充的形式显示在地球模型的展开图上，形成动态图。以下是 2 月份，7 月份及 12 月份的差值图像：

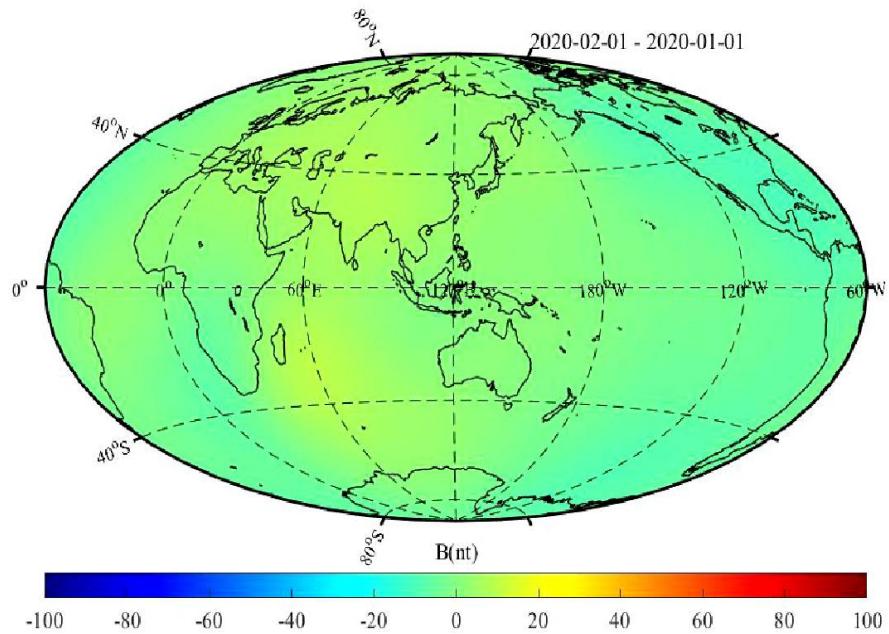


图 3-9 2月地磁总场强度差值

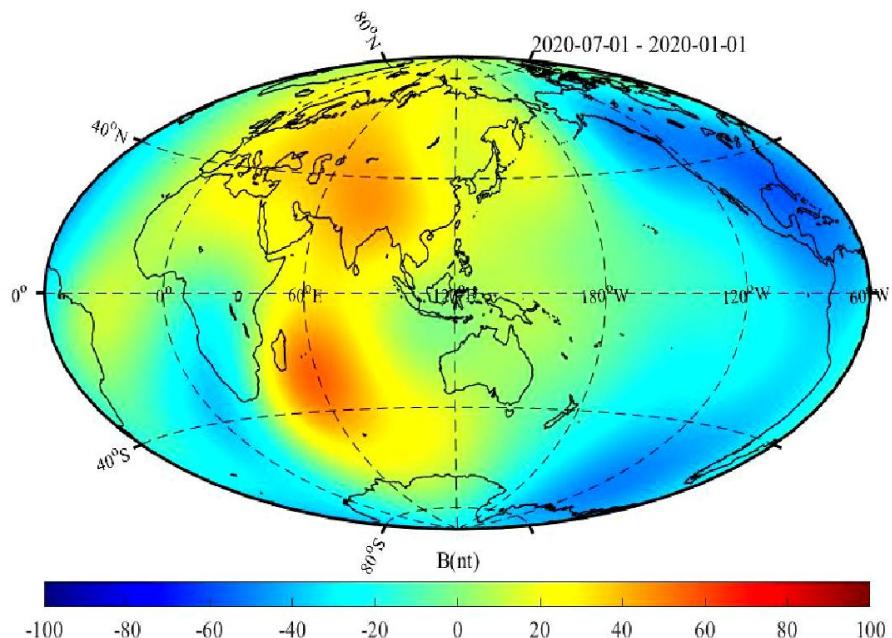


图 3-10 7月地磁总场强度差值

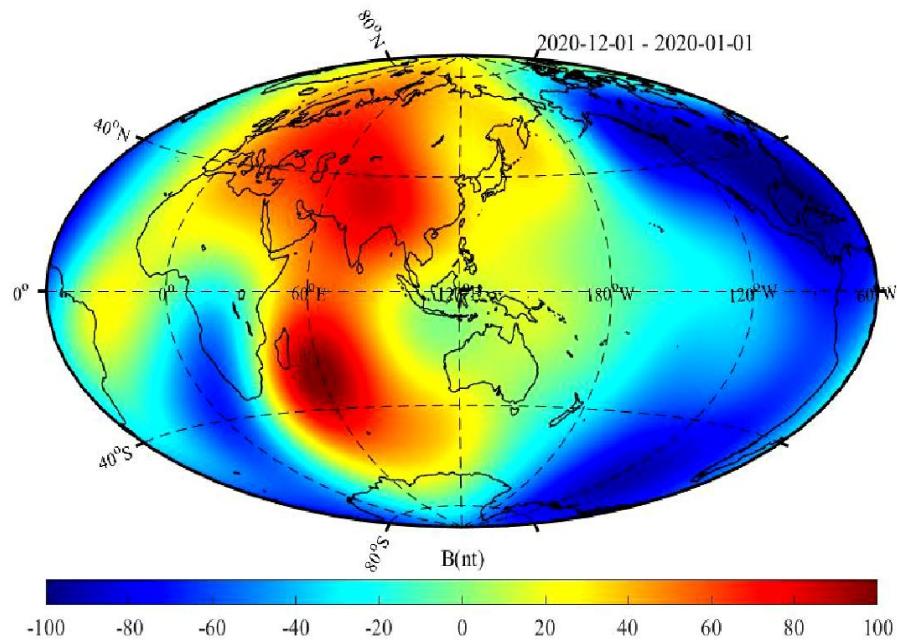


图 3-11 12 月地磁总场强度差值

可以看出，在一年的时间段内，地磁场总场强度的变化范围在几十到一百纳特斯拉（nT）之间。相对于地磁场总场强度平均几万纳特斯拉的值来说，这种变化并不明显。因此，地球基本磁场的变化是一个长期的过程。

3.3 地磁场要素年变率及其二阶年变率

在地球科学领域，地磁场的年变率及其二阶年变率是研究地球磁场动态性的重要内容。地磁场要素包括磁场强度、磁倾角和磁偏角等，这些要素随着时间呈现出不同程度的变化。磁场强度的年变率描述了地磁场强度在一年内的变化情况，而磁倾角和磁偏角的年变率则反映了地磁场方向相对于地表的倾斜和偏转变化情况。除了研究一阶年变率（即每年的变化速率），还可以研究地磁场要素的二阶年变率，即年变率的变化率。二阶年变率提供了地磁场变化的加速度信息，这种变化可能受到地球内部和外部环境的复杂影响。了解这些变化需要通过长期观测和研究。地磁场的年变率和二阶年变率是由地球内部的流体动力学过程驱动的，主要与外核液态金属的流动有关。太阳活动和地磁暴等外部因素也会对短期变化产生影响。通过对这些变化的分析，科学家可以揭示地球磁场的动态特性，预测未来的变化趋势，并提高对地磁现象的理解。

研究地磁场要素的年变率及其二阶年变率不仅对地球科学的发展具有重要意义，还具有广泛的应用价值。例如，在导航和定位系统中，精确的地磁场模型对于提高定位精度至关重要。在航天和卫星通信领域，了解地磁场变化可以帮助设计更有效的辐射防护措施，保护电子设备免受辐射损伤。通过长期观测和深入研究地磁场要素的年变率及其二阶年变率，我们可以更好地理解地球磁场的演化规律，揭示地球内部动力学过程，预测未来地磁场变化趋势，并为相关领域提供

理论和数据支持。这种研究不仅有助于基础科学的发展，还为应用科学和工程技术提供了重要的参考依据。

在地球科学领域，国际地磁参考场（IGRF）每隔五年更新一次其高斯球谐系数。这两代模型之间，我们通过样条插值方法得到每一年的高斯球谐系数，利用这些插值后的系数计算每年1月1日的地磁场要素值。此外，我们还采用样条插值方法获得每年其余时间点的地磁场要素值。通过这些数据，我们可以绘制所需的地磁场要素年变率曲线图。以下是计算2015-2020年时间段的地磁场要素年变率及其二阶年变率曲线图：

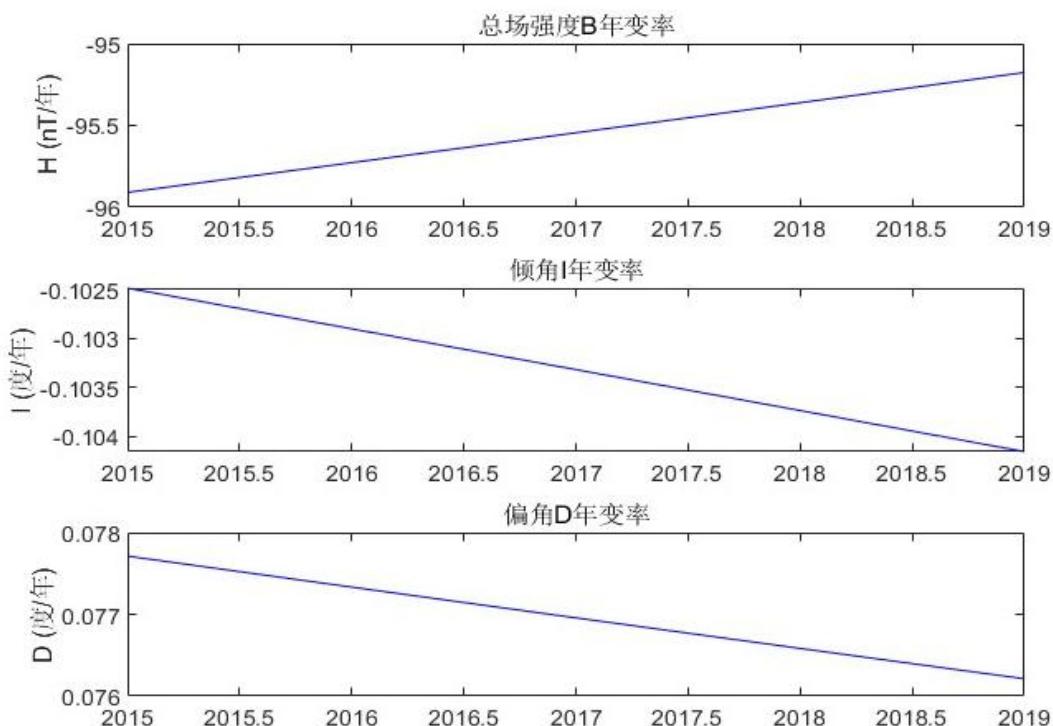


图3-12 2015-2020年地磁场要素年变率：(a) 总场强度年变率；(b) 地磁倾角年变率；(c) 地磁偏角年变率

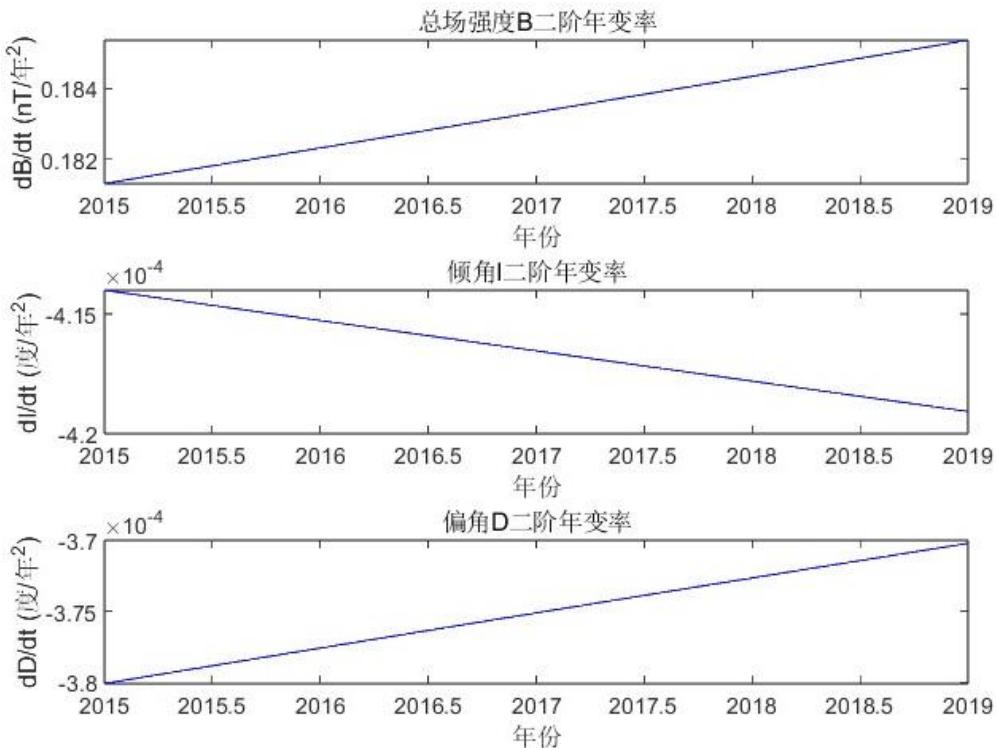


图 3-13 2015-2020 地磁场要素二阶年变率：(a) 总场强度二阶年变率；(b) 地磁倾角二阶年变率；(c) 地磁偏角二阶年变率

可以看出在该时间段内，地磁总场强度呈持续减小的趋势，尽管随着时间的推移，这种趋势逐渐减弱，变化值大约在 95 至 96 nT/yr 之间。地磁倾角也在持续减小，尽管这种变化在数值上看起来微弱，但其趋势却在不断增强。与地磁倾角类似，地磁偏角随着时间的推移也在不断增大，尽管变化趋势很微弱，但与地磁倾角不同的是，地磁偏角的变化趋势在不断减弱。

由于国际地磁参考场 (IGRF) 高斯球谐系数是每 5 年更新一次，为了连续计算并显示 1900 年以来的地磁场要素一阶及其二阶年变率，在每 5 年时间段之间对高斯球谐系数使用样条插值以使其连续，计算得到 1900-2020 年地磁场要素的一阶及二阶年变率曲线。

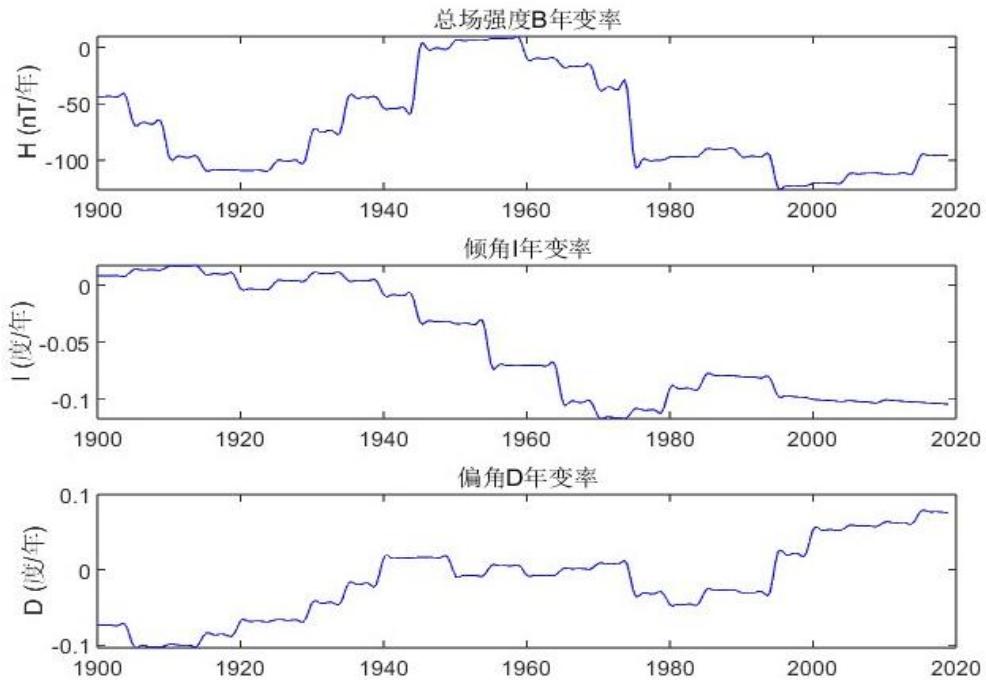


图 3-14 1900–2020 地磁场要素年变率：(a) 总场强度年变率；(b) 地磁倾角年变率；(c) 地磁偏角年变率

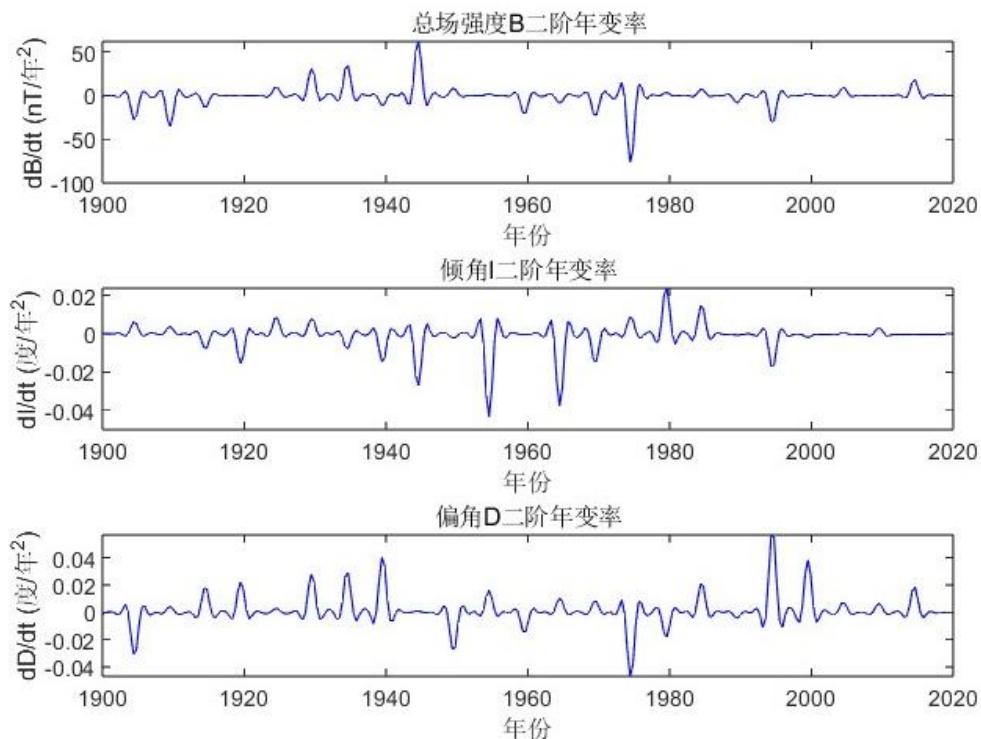


图 3-15 1900–2020 的地磁场要素二阶年变率：(a) 总场强度二阶年变率；(b) 地磁倾角二阶年变率；(c) 地磁偏角二阶年变率

总体上来看，从 1900 年至 2020 年，总场强度的年变率显示出显著的波动，在 20 世纪初期，总场强度的年变率相对较低，表明变化较为平缓，到了 20 世纪

中期，总场强度的年变率有所增加，显示出变化速率的加快，21 世纪初期，总场强度的年变率再次显著波动；磁倾角的年变率显示出显著的时间依赖性，在 20 世纪早期，磁倾角的变化速率较为平缓，在 20 世纪中期至后期，磁倾角的变化速率有所增加，21 世纪初期，磁倾角的年变率出现了显著的波动；磁偏角的年变率在整个 20 世纪和 21 世纪初期显示出显著的波动，20 世纪初期，磁偏角的变化速率较为平稳，随着时间的推移，特别是 20 世纪中期和 21 世纪初期，磁偏角的年变率显著增加，表明变化速率的加快。

地磁场要素的二阶年变率在这一时间段内变化不明显，仅在整 5 年时间的节点处有突变，这种突变在一阶年变率的曲线上也存在，它可能与选择的插值方式有关。

第4章 国际地磁参考场与世界地磁模型对比

国际地磁参考场（International Geomagnetic Reference Field，简称 IGRF）和世界地磁模型（World Magnetic Model，简称 WMM）是两个用于描述地球基本磁场的主要数学模型。它们广泛应用于导航、地球科学研究、卫星轨道计算等领域。尽管两者都用于描述地球磁场，但它们的设计理念、用途和更新周期有所不同。二者共同之处包括：（1）都是基于球谐分析法来描述地球磁场，使用类似的高斯系数表示偶极子和非偶极子成分；（2）它们都每五年更新一次，反映地球磁场的变化。二者不同之处包括：（1）IGRF 通常包含更高阶的球谐展开，适合研究和科学应用，反映了地球磁场的复杂性；（2）WMM 对应的球谐级数展开式阶数略低，但更注重导航和军事应用，更新更加频繁；（3）IGRF 更适合研究地磁场的长期趋势，而 WMM 在短期预测和导航方面更准确。

为了对国际地磁参考场和世界地磁模型进行定量对比分析，采用第十三代国际地磁参考场（IGRF-13）和最新的世界地磁模型（WMM2020）的高斯球谐系数，计算地磁场要素的全球分布情况。计算时间段为 2020 年 1 月–2024 年 12 月，若具体计算每天的地磁场值，计算量过大，故只计算每个月第一天的地磁场值作为该月的数值。将利用两种高斯球谐系数计算出来的地磁场要素值的差值以等值线填充图的形式展示在以中国区域为中心的地球模型展开图上，填充图从 2020 年 1 月开始进行动态变化，形象展示了两种地磁场模型之间的数值差异以及这种差异随时间的变化。

本文研究这两种地磁场模型的差异所选用的固定点经纬度坐标为 (42.283°N , -71.35°W)。该坐标对应于美国马萨诸塞州波士顿附近的一个位置。波士顿是一个重要的城市，位于北美洲的东海岸。波士顿有着悠久的地磁观测历史，许多早期的地磁观测和研究是在这里进行的，这使得这个位置的数据相对丰富和可靠，这些数据对于分析地磁场变化和进行模型验证非常有用，使用这个点位来验证和比较不同的地磁模型会更具科学意义。除此之外，中纬度地区的地磁特征相对稳定，不像极地地区那样复杂和变化多端。选择中纬度的一个点位可以减少极地复杂地磁效应的干扰，使得研究更加专注于模型的核心特性。截取 2020 年 1 月 1 日的地磁场要素差值图像，其中地磁总场强度差值图像如下所示。

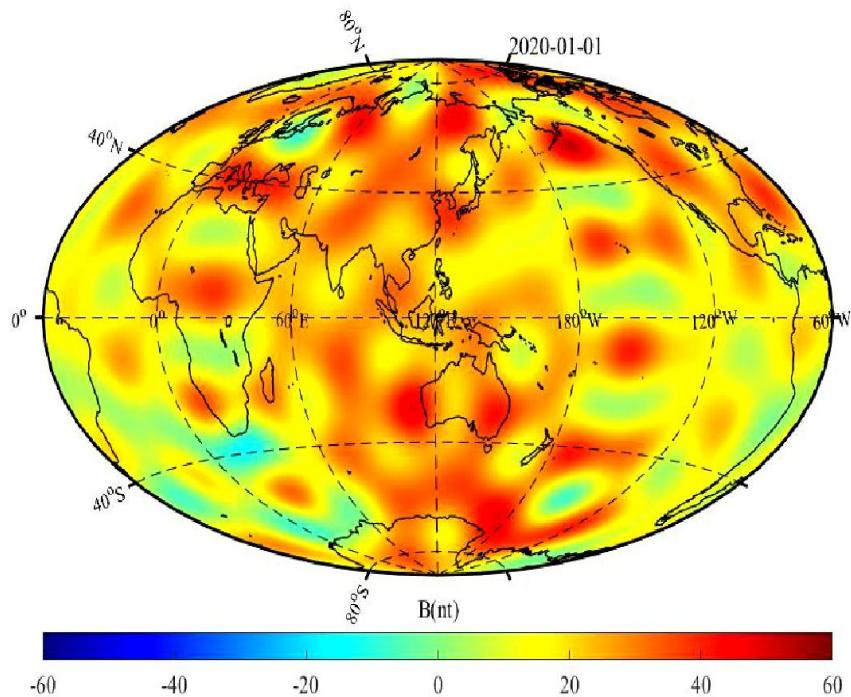


图 4-1 IGRF 和 WMM 总场强度差异全球分布

由总场强度差值全球分布图来看，由第十三代国际地磁参考场(IGRF-13)的高斯球谐系数计算出来的地磁总场强度与由最新一代世界地磁模型(WMM2020)的高斯球谐系数计算出来的地磁总场强度之间的差值从全球角度来看在 0-60 nT 之间。其中差值极大值区域集中在 60°E-180°W 的区域内，另外还有地中海和格陵兰岛两块区域。差值极小值区域主要有大西洋及太平洋西南地域。

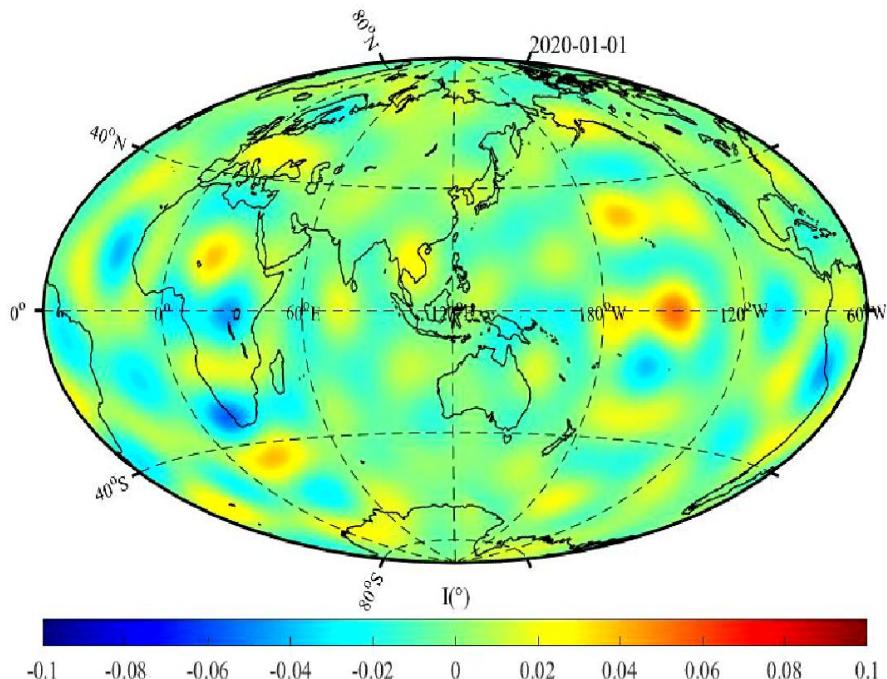


图 4-2 IGRF 和 WMM 磁倾角差异全球分布

总体上，IGRF 和 WMM 模型在全球大多数地区的磁倾角差异较小，通常在

0.1度以内。这表明两者在全球尺度上都能很好地拟合地磁场的变化。在一些地磁异常区，如南大西洋异常区，IGRF 和 WMM 模型的差异较明显。这些区域的地磁场具有显著的局部异常特征，模型的拟合可能存在不同处理方式。在地磁场变化剧烈的区域，如火山活动频繁或地壳运动活跃的地区，模型之间的差异可能增大。这些区域的地磁场受局部地质活动影响较大，模型难以准确拟合。

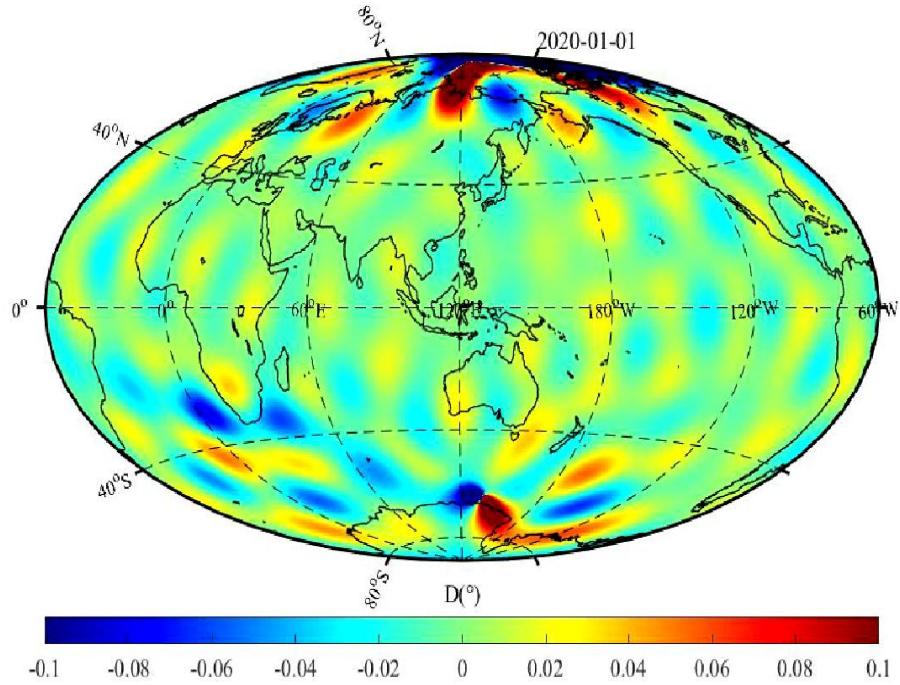


图 4-3 IGRF 和 WMM 磁偏角差异全球分布

全球大部分地区的磁偏角差异较小，通常在 0.1° 以内（图 4-3），这表明两种模型在大范围内对地磁场的描述较为一致。在某些区域，如高纬度地区、地磁异常区和地磁场变化剧烈的区域，差异可能会显著增大。北极和南极地区的地磁场变化复杂且观测数据稀少，IGRF 和 WMM 模型的差异较明显。

为了更加直观地比较两种地磁模型在地磁计算工作中的差异，我们以大致经过北京的 116°E 和 40°N 两条经纬线为计算对象，其中北纬 40° 线相应的经度范围为 $60^{\circ}\text{E}-100^{\circ}\text{E}$ ，而西经 116° 线相应的纬度范围为 $20^{\circ}\text{N}-30^{\circ}\text{N}$ ，取时间点为 2020 年 1 月 1 日，将分别用两种地磁模型计算得到的地磁总场强度随经度或纬度变化的曲线及其差值曲线绘制在同一张图中进行比较，如 4-2 和 4-3 图所示。

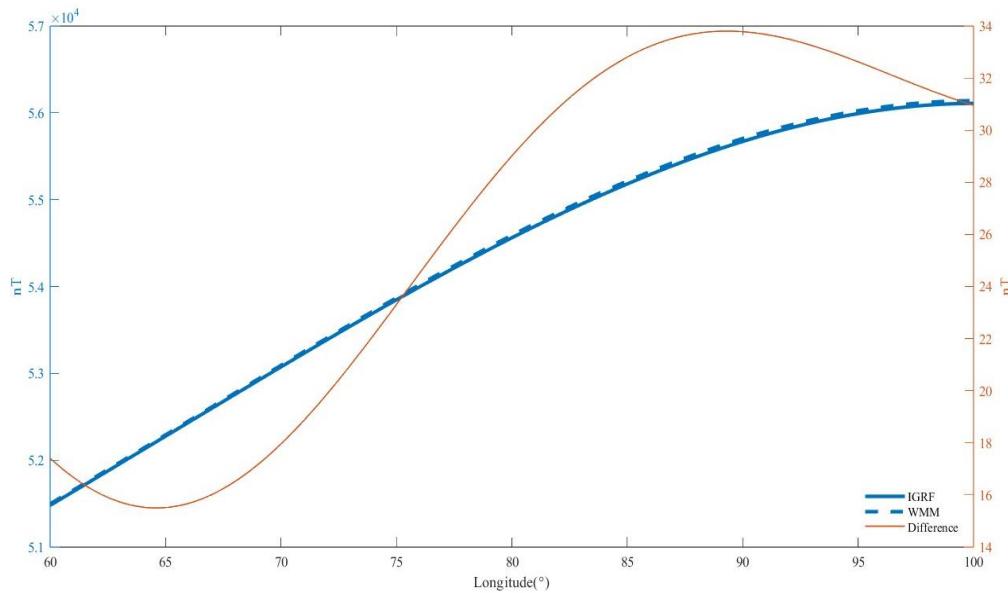


图 4-4 40° N 纬度线上 60° -100° 经度范围内 2020. 0 年 IGRF 和 WMM 模型对应的总场强度变化对比

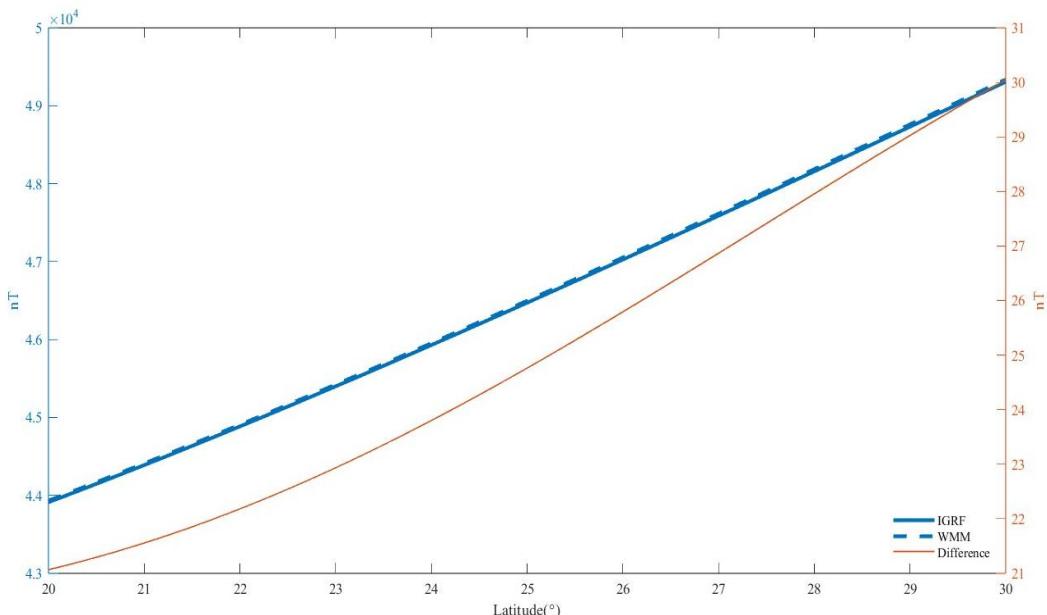


图 4-5 116° E 经度线上 20° -30° 纬度范围内 2020. 0 年 IGRF 和 WMM 模型对应的总场强度变化对比

在研究中，我们可以发现，IGRF 和 WMM 计算得到的地磁总场强度在一定范围内存在几十纳特斯拉（nT）的差异。这种差异相对于地磁总场强度的整体数值而言，可以被认为是一个常数。为进一步验证这一可能的规律，避免这是随时间出现的偶然情况，再次取时间点为 2000 年 1 月 1 日绘制相关曲线如下所示。

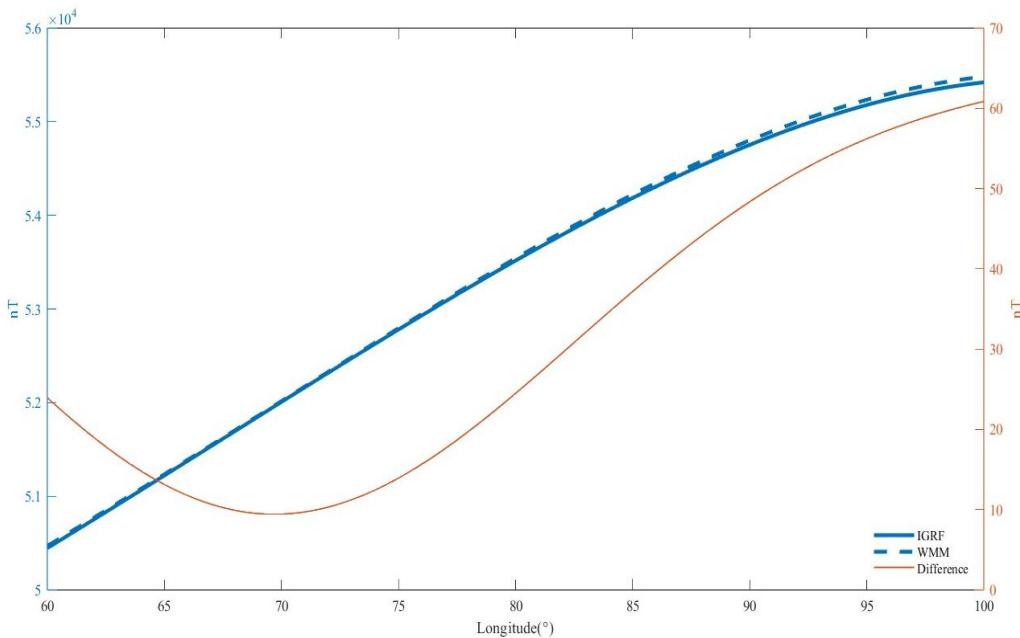


图 4-6 40° N 纬度线上 60° – 100° 经度范围内 2000. 0 年 IGRF 和 WMM 模型对应的总场强度变化对比

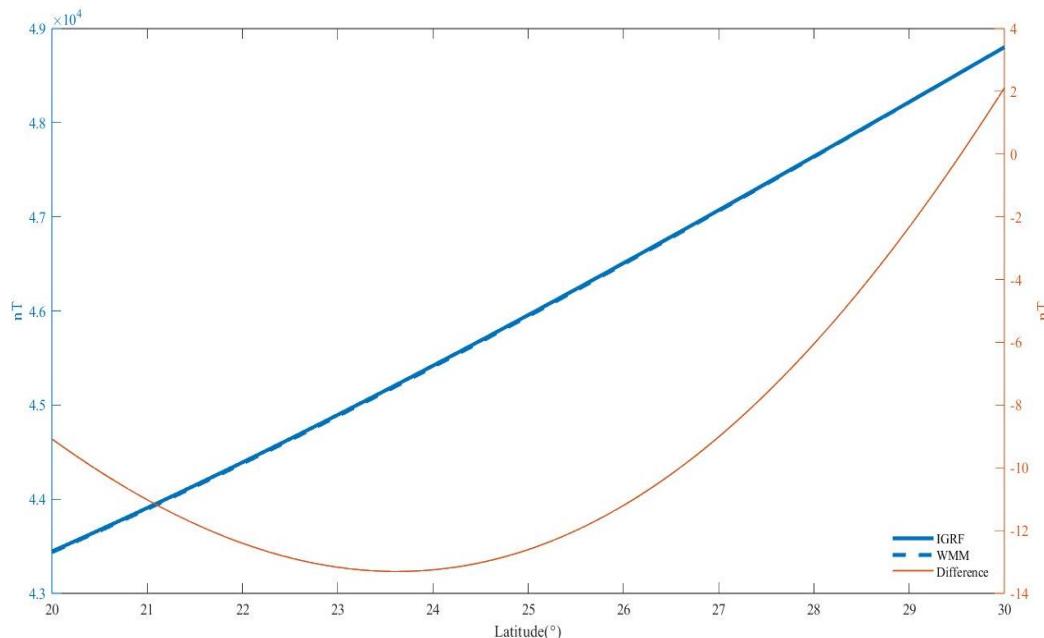


图 4-7 116° E 经度线上 20° – 30° 纬度范围内 2000. 0 年 IGRF 和 WMM 模型对应的总场强度变化对比

可以看出这并不是一种偶然情况，这表明在有限区域内两种地磁模型计算出的地磁场要素的差异不大。这种稳定的差异性对于科学的研究和实际的应用都有重要意义。在地质勘探中，稳定的差异性有助于更准确地解释磁异常数据。此外，对于空间天气预报，了解地磁模型的差异也有助于更好地预测地磁暴等现象对地球环境的影响。总之，国际地磁参考场（IGRF）和世界地磁模型（WMM）在有限范围内计算出的地磁场要素的差异性表现为一个接近常数的稳定值，这一发现

为进一步优化和应用地磁模型提供了重要依据。

结 论

本课题开发了一套基于最新球谐分析算法和地磁要素计算方法的地磁场长期变化分析程序，并运用该程序揭示自 1900 年以来地球基本磁场的演变规律。通过对文献的深入研究和数学算法的精确分析，我们确保所开发的算法能够较为准确地描述地球基本磁场的长期变化。借助 MATLAB 编程环境，我们开发了操作简便的分析程序，能够对地磁场数据进行处理、分析和可视化。分析程序主要分为高斯球谐分析，坐标转换以及高斯系数插值三部分，能够计算 1900-2025 年之间每一天的地磁场要素。通过分析程序得到的结果图，我们可以得出以下结论：

(1) 自 1900 年以来，地球基本磁场的长期变化特征主要表现为整体磁场强度的减弱和磁极的显著漂移。地磁北极和南极都在迅速移动，北磁极已经从加拿大向西伯利亚方向移动。与此同时，地磁场强度在全球范围内呈现减弱趋势，尤其是在南大西洋异常区，这一区域的磁场强度减弱得更为明显。这些变化可能与地球内部液态外核中熔融铁流动的变化有关，对航海、航空和卫星导航等系统产生了一定影响。

(2) 通过对历史地磁数据的处理和分析，我们获取了地球基本磁场要素及其一阶和二阶年变率的详细信息。对于磁场强度、磁倾角和磁偏角等地磁场要素，我们发现它们在时间尺度上存在着明显的变化趋势。自 1900 年以来，地磁场北向分量持续增强，每年的增量保持在 30-60 nT 之间；这些变化可能受到地球内部物质运动、地壳运动、太阳活动以及人类活动等因素的影响，需要进一步研究和探讨。

(3) 在对世界磁模型 (WMM) 和国际地球磁场参考模型 (IGRF) 之间的数据差异进行定量分析时，我们发现了它们在不同时间和地点的变化趋势。这些数据差异的存在为我们提供了更多探索地球磁场演变规律的线索，也提醒我们在利用地磁场模型进行研究时需要谨慎对待数据的差异性和不确定性。

当然，即便我们在研究中取得了一系列的成果，仍然不能忽视研究中所面临的一些限制和挑战。首先，我们必须认识到，地磁数据的获取和处理并非完全毫无问题。尽管我们努力确保数据的准确性和可靠性，但数据源的质量和采样间隔等方面的局限性仍可能对我们的研究结果产生一定的影响。其次，尽管我们所采用的算法在理论上经过了严格的验证和分析，但在实际应用中仍然可能存在一定的误差和偏差。这些误差可能源自于算法本身的局限性，也可能受到数据质量和处理方法等方面的影响。此外，我们所研究的时间跨度虽然较长，但仍然有可能无法覆盖所有可能的变化和趋势，从而可能导致我们对地球磁场变化规律的理解存在一定的片面性和不足。最后，我们的研究方法和技术手段虽然取得了一定的成果，但仍有待进一步的完善和改进。例如，我们可以尝试结合更多的地磁数据

和其他地球物理数据，采用更为精确的数学模型和算法，以提高我们对地球磁场演变规律的理解和预测能力。

综上所述，本课题为地球磁场长期变化研究提供了重要的理论和方法支持，为我们更好地理解地球磁场的演变提供了重要参考。在未来的研究中，我们将继续努力完善研究方法，深入探索地球磁场变化的机制，为地球科学领域的研究提供更加全面和深入的信息。

致 谢

时光匆匆，我即将告别大学校园，迈入新的人生旅程。回首四年求学之路，我心怀感激之情，深深地感谢那些在我成长路上给予支持和帮助的人们。首先，感谢成都理工大学地球物理学院的所有老师和工作人员。在这片学术殿堂中，我不仅收获了专业知识，更沐浴了一份浓厚的学术氛围。老师们的悉心教导和同学们的共同进步，让我深刻体会到了学习的乐趣和收获益匪浅，我将永远铭记在心；其次我要衷心感谢我的导师贾真教授。他不仅是我的学业导师，更是一位智慧渊博、慈爱关怀的引路人。在我迷茫时，他总是倾心指导，引领我探索学术的海洋；在我挫折时，他总是给予鼓励和信心；特别要感谢我的同学和朋友们。你们是我求学道路上最温暖的陪伴者，与我共同度过了无数个日日夜夜。在课堂上相互学习，在生活中彼此扶持，你们的陪伴与支持让我感受到了友情的珍贵，也让我的大学生活更加丰富多彩；当然，我也要深深地感谢我的家人。你们是我生命中最坚实的后盾，是我奋斗道路上永恒的依靠。感谢你们对我的包容和支持，是你们的关爱让我勇敢面对挑战，坚定向前；最后，我要感谢这段珍贵的时光，以及所有为我成长付出的人。毕业并不是结束，而是新的起点。在未来的征程中，我将怀揣感恩之心，继续前行，为梦想奋斗，为人生点亮希望。谢谢你们，愿我们共同书写更美好的未来！

参考文献

- Aubert,Julien, John.A.Tarduno, Catherine.L.Johnson. Observations and Models of the Long-Term Evolution of Earth's Magnetic Field'. Space Science Reviews ,155: 337-70.
- AN Zhen-Chang, WANG Yue-Hua. Global changes of non-dipole magnetic field for 1900-2000. Chinese J. Geophys (in Chinese) ,1999,42(2):169-177.
- AN Zhen-Chang. International geomagnetic reference field during 1945-1995. Progress in Geophysics (in Chinese) ,1992,7(2):54-60.
- Alken P, Thébault E, Beggan C D, et al. 2021. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. Earth, Planets and Space ,73(1):49.
- Biggin, Andrew.J, Geert H.M.A.Strik, Cor G.Langereis. 'Evidence for a very-long-term trend in geomagnetic secular variation'. Nature Geoscience ,1:395-98.
- Bullard E C, Freedman C, Gellman M, et al. The westward drift of Earth magnetic field. Phil. Trans. Roy.Soc ,1950, A243:67-92.
- 陈笑蔚, 王华沛. 基于IGRF模型对地球磁场长期变化速率的计算[R]. 中国地球科学联合学术年会 ,2019.
- Chulliat A, Macmillan S, Alken P, et al. 2015. The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020. National Geophysical Data Center, NOAA.
- Chulliat A, Brown W J, Alken P, et al. 2020. The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025. National Centers for Environmental Information, NOAA.
- 郭凤霞, 张义军. 地磁场长期变化特征及机理分析 [J]. 地球物理学报 ,2007,50(6):1649~1657.
- 李宏, 魏毅博, 邹维宝, 等. 2022. 基于IGRF和WMM模型的地磁匹配特征量的选择[J]. 地球物理学进展 ,37(4):1414-1421.
- Malin S R C. Geomagnetic secular variation and its changes, 1942.5 to 1962.5. Geophys. J. R. Astr ,1969,Soc. 17:415-441.
- 聂琳娟, 邱耀东, 申文斌等. 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):1229-1235,1291.
- 彭飞, 熊凌, 陈洋. 2020. 地磁模型构建仿真及匹配特征量的选择[J]. 自动化与仪表 , 35(8):97-92.
- Thébault, Erwan, Christopher C. Finlay, Ciarán D. Beggan, Patrick Alken, Julien Aubert, Olivier Barrois, Francois Bertrand, Tatiana Bondar, Axel Boness, and Laura Brocco. 'International geomagnetic reference field: the 12th generation'. Earth, Planets and Space ,67: 79.
- 王亶文. 二十世纪的地球偶极子磁场[J]. 地球物理学报 ,2005,48(1):52-55.
- 魏自刚, 徐文耀. 地磁场的漂移运动和强度变化 [J]. 地球物理学

报 ,2001,44(04):500-509.

魏自刚. 20世纪地磁场的剧烈变化[J]. 科学通报 ,2000,45(14):1563-1566.

徐文耀, 魏自刚. 地球磁场的西向漂移[J]. 地球物理学进展 ,1999,14(2):44-57.

Yukutake T. The westward drift of the magnetic field of the Earth. Bull. Earthquake Res. Inst ,1962,40:1-65.

附录

附表 1 第十三代国际地磁参考场高斯球谐系数

	阶数 n	次数 m	IGRF	SV
g/h			2020	2020-25
g	1	0	-29404.8	5.7
g	1	1	-1450.9	7.4
h	1	1	4652.5	-25.9
g	2	0	-2499.6	-11
g	2	1	2982.0	-7
h	2	1	-2991.6	-30.2
g	2	2	1677.0	-2.1
h	2	2	-734.6	-22.4
g	3	0	1363.2	2.2
g	3	1	-2381.2	-5.9
h	3	1	-82.1	6
g	3	2	1236.2	3.1
h	3	2	241.9	-1.1
g	3	3	525.7	-12
h	3	3	-543.4	0.5
g	4	0	903.0	-1.2
g	4	1	809.5	-1.6
h	4	1	281.9	-0.1
g	4	2	86.3	-5.9
h	4	2	-158.4	6.5
g	4	3	-309.4	5.2
h	4	3	199.7	3.6
g	4	4	48.0	-5.1
h	4	4	-349.7	-5
g	5	0	-234.3	-0.3
g	5	1	363.2	0.5
h	5	1	47.7	0
g	5	2	187.8	-0.6
h	5	2	208.3	2.5
g	5	3	-140.7	0.2

h	5	3	-121.2	-0.6
g	5	4	-151.2	1.3
h	5	4	32.3	3
g	5	5	13.5	0.9
h	5	5	98.9	0.3
g	6	0	66.0	-0.5
g	6	1	65.5	-0.3
h	6	1	-19.1	0
g	6	2	72.9	0.4
h	6	2	25.1	-1.6
g	6	3	-121.5	1.3
h	6	3	52.8	-1.3
g	6	4	-36.2	-1.4
h	6	4	-64.5	0.8
g	6	5	13.5	0
h	6	5	8.9	0
g	6	6	-64.7	0.9
h	6	6	68.1	1
g	7	0	80.6	-0.1
g	7	1	-76.7	-0.2
h	7	1	-51.5	0.6
g	7	2	-8.2	0
h	7	2	-16.9	0.6
g	7	3	56.5	0.7
h	7	3	2.2	-0.8
g	7	4	15.8	0.1
h	7	4	23.5	-0.2
g	7	5	6.4	-0.5
h	7	5	-2.2	-1.1
g	7	6	-7.2	-0.8
h	7	6	-27.2	0.1
g	7	7	9.8	0.8
h	7	7	-1.8	0.3
g	8	0	23.7	0

g	8	1	9.7	0.1
h	8	1	8.4	-0.2
g	8	2	-17.6	-0.1
h	8	2	-15.3	0.6
g	8	3	-0.5	0.4
h	8	3	12.8	-0.2
g	8	4	-21.1	-0.1
h	8	4	-11.7	0.5
g	8	5	15.3	0.4
h	8	5	14.9	-0.3
g	8	6	13.7	0.3
h	8	6	3.6	-0.4
g	8	7	-16.5	-0.1
h	8	7	-6.9	0.5
g	8	8	-0.3	0.4
h	8	8	2.8	0
g	9	0	5.0	0
g	9	1	8.4	0
h	9	1	-23.4	0
g	9	2	2.9	0
h	9	2	11.0	0
g	9	3	-1.5	0
h	9	3	9.8	0
g	9	4	-1.1	0
h	9	4	-5.1	0
g	9	5	-13.2	0
h	9	5	-6.3	0
g	9	6	1.1	0
h	9	6	7.8	0
g	9	7	8.8	0
h	9	7	0.4	0
g	9	8	-9.3	0
h	9	8	-1.4	0
g	9	9	-11.9	0

h	9	9	9.6	0
g	10	0	-1.9	0
g	10	1	-6.2	0
h	10	1	3.4	0
g	10	2	-0.1	0
h	10	2	-0.2	0
g	10	3	1.7	0
h	10	3	3.6	0
g	10	4	-0.9	0
h	10	4	4.8	0
g	10	5	0.7	0
h	10	5	-8.6	0
g	10	6	-0.9	0
h	10	6	-0.1	0
g	10	7	1.9	0
h	10	7	-4.3	0
g	10	8	1.4	0
h	10	8	-3.4	0
g	10	9	-2.4	0
h	10	9	-0.1	0
g	10	10	-3.8	0
h	10	10	-8.8	0
g	11	0	3.0	0
g	11	1	-1.4	0
h	11	1	0.0	0
g	11	2	-2.5	0
h	11	2	2.5	0
g	11	3	2.3	0
h	11	3	-0.6	0
g	11	4	-0.9	0
h	11	4	-0.4	0
g	11	5	0.3	0
h	11	5	0.6	0
g	11	6	-0.7	0

h	11	6	-0.2	0
g	11	7	-0.1	0
h	11	7	-1.7	0
g	11	8	1.4	0
h	11	8	-1.6	0
g	11	9	-0.6	0
h	11	9	-3.0	0
g	11	10	0.2	0
h	11	10	-2.0	0
g	11	11	3.1	0
h	11	11	-2.6	0
g	12	0	-2.0	0
g	12	1	-0.1	0
h	12	1	-1.2	0
g	12	2	0.5	0
h	12	2	0.5	0
g	12	3	1.3	0
h	12	3	1.4	0
g	12	4	-1.2	0
h	12	4	-1.8	0
g	12	5	0.7	0
h	12	5	0.1	0
g	12	6	0.3	0
h	12	6	0.8	0
g	12	7	0.5	0
h	12	7	-0.2	0
g	12	8	-0.3	0
h	12	8	0.6	0
g	12	9	-0.5	0
h	12	9	0.2	0
g	12	10	0.1	0
h	12	10	-0.9	0
g	12	11	-1.1	0
h	12	11	0.0	0

g	12	12	-0.3	0
h	12	12	0.5	0
g	13	0	0.1	0
g	13	1	-0.9	0
h	13	1	-0.9	0
g	13	2	0.5	0
h	13	2	0.6	0
g	13	3	0.7	0
h	13	3	1.4	0
g	13	4	-0.3	0
h	13	4	-0.4	0
g	13	5	0.8	0
h	13	5	-1.3	0
g	13	6	0.0	0
h	13	6	-0.1	0
g	13	7	0.8	0
h	13	7	0.3	0
g	13	8	0.0	0
h	13	8	-0.1	0
g	13	9	0.4	0
h	13	9	0.5	0
g	13	10	0.1	0
h	13	10	0.5	0
g	13	11	0.5	0
h	13	11	-0.4	0
g	13	12	-0.5	0
h	13	12	-0.4	0
g	13	13	-0.4	0
h	13	13	-0.6	0

附表 2 2020 年世界地磁模型高斯球谐系数

	阶数	次数	WMM	SV
g/h	n	m	2020	2020-2025

g	1	0	-29438.5	10.7
g	1	1	-1501.1	17.9
h	2	0	-2445.3	-8.6
g	2	1	3012.5	-3.3
g	2	2	1676.6	2.4
h	3	0	1351.1	3.1
g	3	1	-2352.3	-6.2
h	3	2	1225.6	-0.4
g	3	3	581.9	-10.4
g	4	0	907.2	-0.4
h	4	1	813.7	0.8
g	4	2	120.3	-9.2
h	4	3	-335	4
g	4	4	70.3	-4.2
h	5	0	-232.6	-0.2
g	5	1	360.1	0.1
g	5	2	192.4	-1.4
h	5	3	-141	0
g	5	4	-157.4	1.3
h	5	5	4.3	3.8
g	6	0	69.5	-0.5
h	6	1	67.4	-0.2
g	6	2	72.8	-0.6
h	6	3	-129.8	2.4
g	6	4	-29	-1.1
g	6	5	13.2	0.3
h	6	6	-70.9	1.5
g	7	0	81.6	0.2

h	7	1	-76.1	-0.2
g	7	2	-6.8	-0.4
h	7	3	51.9	1.3
g	7	4	15	0.2
h	7	5	9.3	-0.4
g	7	6	-2.8	-0.9
h	7	7	6.7	0.3
g	8	0	24	0
g	8	1	8.6	0.1
h	8	2	-16.9	-0.5
g	8	3	-3.2	0.5
h	8	4	-20.6	-0.2
g	8	5	13.3	0.4
h	8	6	11.7	0.2
g	8	7	-16	-0.4
h	8	8	-2	0.3
g	9	0	5.4	0
h	9	1	8.8	-0.1
g	9	2	3.1	-0.1
h	9	3	-3.1	0.4
g	9	4	0.6	-0.5
g	9	5	-13.3	-0.2
h	9	6	-0.1	0.1
g	9	7	8.7	0
h	9	8	-9.1	-0.2
g	9	9	-10.5	-0.1
h	0	-1.9	0	0
g	1	-6.5	3.3	0.1

h	2	0.2	-0.3	-0.1
g	3	0.6	4.6	0
h	4	-0.6	4.4	0
g	5	1.7	-7.9	-0.2
h	6	-0.7	-0.6	0.1
g	7	2.1	-4.1	-0.1
h	8	2.3	-2.8	-0.2
g	9	-1.8	-1.1	0.1
g	10	-3.6	-8.7	-0.1
h	0	3.1	0	0
g	1	-1.5	-0.1	0
h	2	-2.3	2.1	0.1
g	3	2.1	-0.7	0
h	4	-0.9	-1.1	0.1
g	5	0.6	0.7	0
h	6	-0.7	-0.2	0
g	7	0.2	-2.1	0.1
h	8	1.7	-1.5	0
g	9	-0.2	-2.5	-0.1
h	10	0.4	-2	0
g	11	3.5	-2.3	-0.1
h	0	-2	0	0
g	1	-0.3	-1	0
h	2	0.4	0.5	0
g	3	1.3	1.8	-0.1
g	4	-0.9	-2.2	0
h	5	0.9	0.3	0
g	6	0.1	0.7	0

h	7	0.5	-0.1	0
g	8	-0.4	0.3	0
h	9	-0.4	0.2	0
g	10	0.2	-0.9	0
h	11	-0.9	-0.2	0
g	12	0	0.7	0